

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ

Факультет інформаційних технологій та електроніки  
(повне найменування факультету)

Кафедра інформаційних технологій та програмування  
(повна назва кафедри)

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА  
до дипломного проекту (роботи)

освітньо-кваліфікаційного рівня магістр  
(бакалавр, спеціаліст, магістр)

спеціальність 171 «Електроніка»  
(шифр і назва напрямку підготовки)

на тему

**«ЕЛЕКТРОННИЙ ПРИСТРІЙ ОБРОБКИ ГІТАРНОГО ЗВУКУ З ФУНКЦІЄЮ  
КАСТОМІЗАЦІЇ НАЛАШТУВАНЬ»**

Виконав: студент групи Ел-23дм

Мельник О.І.  
(прізвище, та ініціали)

\_\_\_\_\_ (підпис)

Керівник Захожай О.І.  
(прізвище та ініціали)

\_\_\_\_\_ (підпис)

Завідувач кафедри Захожай О.І.  
(прізвище та ініціали)

\_\_\_\_\_ (підпис)

Рецензент Самойлова Ж.Г.  
(прізвище та ініціали)

\_\_\_\_\_ (підпис)

СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ  
(м. Київ)

Факультет \_\_\_\_\_ інформаційних технологій та електроніки \_\_\_\_\_  
Кафедра \_\_\_\_\_ інформаційних технологій та програмування \_\_\_\_\_

Освітньо-кваліфікаційний рівень \_\_\_\_\_ **магістр** \_\_\_\_\_  
(бакалавр, спеціаліст, магістр)

Спеціальність \_\_\_\_\_ **171«Електроніка»** \_\_\_\_\_  
(шифр і назва)

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри ЕА  
Захожай О.І. \_\_\_\_\_

“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2024 року

**З А В Д А Н Н Я**  
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Мельнику Олександр Ігоровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту: Електронний пристрій обробки гітарного звуку з функцією кастомізації налаштувань

Керівник проекту: Захожай Олег Ігорович д.т.н.  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджено наказом вищого навчального закладу від “ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ № \_\_\_\_\_

2. Строк подання студентом проекту(роботи) 10 грудня 2024 р.

3. Вихідні дані до проекту: \_\_\_\_\_ матеріали переддипломної практики \_\_\_\_\_

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань які потрібно розробити)

- 1) Аналітичний огляд
- 2) Підбір літератури
- 3) Розробка схеми
- 4) Виготовлення пристрою
- 5) Тестування пристрою

5. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_ 1 вересня 2024 року \_\_\_\_\_

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проектування	Строк виконання етапів	Примітка
1	Аналітичний огляд	01.09.2024-15.09.2024	
2	Підбір літератури	16.09.2024-01.10.2024	
3	Розробка принципової схеми	03.10.2024-21.10.2024	
4	Пошук помпонентів	22.10.2024-05.11.2024	
5	Виготовлення пристрою	07.11.2024-25.11.2024	
6	Тестування пристрою	26.11.2024-05.12.2024	

Студент \_\_\_\_\_ Мельник О.І.  
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник проекту \_\_\_\_\_ Захожай О.І.  
(підпис) (прізвище та ініціали)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: сторінок 66, рисунків 32, таблиць 5.

**Тема наукової роботи:** Електронний пристрій обробки гітарного звуку з функцією кастомізації налаштувань.

**Об'єктом дослідження є:** процеси обробки гітарного звуку та можливості індивідуального налаштування ефектів.

**Мета роботи:** створення електронного пристрою для обробки гітарного звуку, що дозволяє користувачеві кастомізувати параметри звучання відповідно до власних потреб.

**Що потрібно зробити в процесі роботи:** розробити технічне рішення, яке забезпечить обробку гітарного сигналу, реалізувати інтерфейс для кастомізації налаштувань, провести тестування пристрою на практиці.

**В результаті роботи:** створено діючий пристрій обробки гітарного звуку з можливістю кастомізації налаштувань, який забезпечує гнучке та якісне налаштування звуку відповідно до потреб користувача.

# Зміст

<b>ВСТУП</b> .....	6
<b>1. АНАЛІЗ СТАНУ ПРОБЛЕМИ</b> .....	8
1.1 Існуючі технічні рішення. ....	9
1.2 Аналіз цінності. ....	12
1.3. Результати аналізу цінності ....	17
<b>2. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ</b> .....	21
2.1 Принцип роботи дісторшну. ....	21
2.2. Принцип роботи еквалайзера.....	25
<b>3. РОЗРОБКА СХЕМИ</b> .....	31
3.1. Розробка плати дісторшн(спотворення). ....	31
3.2. Побудова десятизмугового еквалайзера.....	39
<b>4. Виготовлення проекту</b> .....	42
<b>4.1. Архітектура системи</b> .....	42
4.1.1. Опис модулів. ....	42
4.1.2. Вхідні та вихідні сигнали. ....	43
4.1.3. Блок живлення.....	43
4.1.4. Блоки спотворень Insanity Box. ....	43
4.1.5. Десятизмуговий еквалайзер.....	44
4.1.6. Світлодіодний блок драйверів.....	45
4.1.7. Перемикачі .....	46
<b>4.2. Виготовлення та тестування</b> .....	50
<b>СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ</b> .....	59
<b>ДОДАТКИ</b> .....	62
Додаток А .....	62
Додаток Б .....	64
Додаток В .....	65

## **ВСТУП**

У сучасній музичній індустрії електрогітара є одним з найважливіших інструментів, що визначають звучання багатьох популярних жанрів, від блюзу і року до хеві-металу. Її звукові можливості залежать не тільки від майстерності музиканта і характеристик інструмента, а й від засобів обробки сигналу, серед яких особливе місце займають педалі ефектів. Аналогові ефектори, поєднуючи в собі спотворення і еквалізацію (регулювання амплітудно-частотної характеристики), є важливими інструментами для музикантів, що дозволяють досягти унікального звучання і максимально налаштувати свій тембр.

З розвитком цифрових технологій на ринку з'явилася велика кількість цифрових процесорів ефектів. Хоча ці процесори ефектів дозволяють імітувати звуки і створювати найрізноманітніші ефекти, більшість професійних музикантів все ще віддають перевагу аналоговим пристроям через їх автентичне і тепле звучання. На думку багатьох експертів, аналогові схеми забезпечують більш природний сигнал, мінімізують втрати гармонік і додають звуку яскраву динаміку.

Це особливо важливо в таких жанрах, як хард-рок, панк і хеві-метал, де спотворення сигналу є основним ефектом. Завданням цього дослідження було створення універсального аналогового процесора ефектів, який може тонко налаштувати частотний спектр сигналу за допомогою багатосмугового еквалайзера і забезпечувати високоякісний дисторшн. Така комбінація функцій дозволяє музикантам контролювати всі аспекти тембру і адаптувати його до конкретних музичних стилів та індивідуальних потреб.

### **Об'єкт і предмет дослідження**

**Об'єкт дослідження:** аналогові пристрої обробки звуку для електрогітари.

**Предмет дослідження:** методи проєктування та реалізації аналогової педалі ефектів, що поєднує функції дисторшну та багатосмугового еквалайзера.

### **Мета та завдання дослідження**

**Мета роботи** полягає в розробці та створенні **аналогової педалі ефектів**, що забезпечує якісне спотворення сигналу та налаштування частотної характеристики звучання гітари.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі завдання

1. Провести **аналіз існуючих аналогових та цифрових педалей** ефектів на ринку.
2. Вивчити **теоретичні основи** формування спотворень у аналогових підсилювачах сигналу.
3. Дослідити принципи роботи **смугових фільтрів** для побудови багатосмугового еквайзера.
4. Розробити **схему педалі**, яка включатиме:
  - блок дісторшну на основі операційних підсилювачів та діодів для обрізання сигналу;
  - блок десятисмугового еквайзера для гнучкого налаштування звуку;
  - систему true bypass для забезпечення чистоти сигналу у вимкненому стані.
5. Виконати **моделювання та аналіз схеми** за допомогою програмного забезпечення для схемотехнічного аналізу (LTspice, Multisim).
6. Зібрати **робочий прототип пристрою** та провести його тестування.
7. Оцінити ефективність роботи педалі та порівняти її з аналогами на ринку.

### **Методи дослідження**

Використано теоретичний аналіз, моделювання електричних схем та експериментальні методи дослідження. Схеми були розроблені та протестовані в програмному середовищі LTspice, де можна аналізувати амплітудно-частотні характеристики та параметри підсилення. Практичні випробування проводилися на зібраній моделі пристрою з використанням реальних сигналів від електрогітари, які потім відтворювалися через підсилювач.

## 1. АНАЛІЗ СТАНУ ПРОБЛЕМИ.

Спотворення в підсилювачах зазвичай вважаються недоліком конструкції в більшості схем. Підсилювачі зазвичай використовуються для посилення сигналу без спотворень і збереження оригінального сигналу. Це, безумовно, не той випадок, коли проектується система обробки сигналу для електрогітар. Спотворення є важливою особливістю більшості гітарних підсилювачів, особливо для музикантів, що грають рок і хеві-метал. Для гітаристів цей звук відомий як гітарний тон. Кожен ланцюг в тракті сигналу, від самої гітари до підсилювача, динаміків підсилювача і навіть блоку живлення, впливає на загальний тон гітари. Від гітар, підсилювачів і ефектів до кабелів, які з'єднують їх разом, існує величезна індустрія, присвячена гітарам. Термін «ефект» відноситься до педалей і ланцюгів, які навмисно підключаються між гітарою і підсилювачем, щоб впливати на звучання гітари.

Педалі ефектів часто називають «педалями» або «педалями ефектів», оскільки вони розміщуються на підлозі перед гітаристом або гітарним обладнанням і регулюються гітаристом шляхом натискання ручок під час гри. В рамках цього проекту з усіх існуючих педалей ефектів будуть розглянуті лише педалі дисторшн і еквайзера. Спотворення гітарного сигналу викликається відсіканням. Існує два основних типи гітарних спотворень: м'який і жорсткий кліппінг. У музичній індустрії м'який кліппінг часто називають «овердрайвом», а жорсткий - «дисторшн». Ці педалі мають ефекти спотворення важкого металу, а звук гітар для хеві-металу майже виключно створюється за допомогою жорсткого кліпування завдяки точному сильно спотвореному звучанню, яке визначає музику цього жанру. Надалі термін «дисторшн» буде використовуватися для позначення жорсткого кліпування.

У найзагальнішому розумінні, жорстке відсікання - це відсікання піків і западин синусоїдального сигналу, з якого складається будь-який аудіосигнал. Існує два основних типи методів генерації спотворень для обробки сигналів електрогітари:



аналоговий і цифровий. Аналоговий дисторшн складається повністю з аналогових компонентів, не містить центрального процесора і не семплює. Багато хто в музичній індустрії вважає цей спотворення кращим методом. Цифровий дисторшн створюється шляхом семпліювання і оцифрування аналогового гітарного сигналу (оскільки фактичний аудіосигнал є повністю аналоговим), потім процесор зчитує вхідний сигнал і перетворює його за допомогою запрограмованих змін, перш ніж повернути сигнал в аналоговий вигляд перед вихідним гніздом педалі. Цифрові схеми спотворення є найкращою наближеною моделлю впливу аналогової схеми на гітарний сигнал. Багато музикантів вважають, що цифрові дисторшн додають гітарному тону стерильності і заважають грубості аналогового звучання.

Ця різниця є питанням думки, але її поділяють багато хто, в тому числі і ця група. Ця група не мала досвіду цифрової обробки сигналів і не мала часу, щоб перевести необхідну обробку в програму, яку можна було б завантажити в процесор, що вимагало б значного обсягу досліджень.

### 1.1 Існуючі технічні рішення.

Сьогодні на ринку існує безліч педалей дисторшн і еквайзерів. Приклади педалей з цими функціями: Boss Metal Zone, Electro Harmonix Metal Muff, MXR Dime Distortion, Marshall Jackhammer, Krank Distortus Maximus і MXR Ten Band Graphic EQ. Нижче порівнюються характеристики і ціни цих педалей з аналізом існуючих конкурентів. Частина аналізу конкурентів з точки зору впливу на гітарний тон є суб'єктивною і відображає думку групи. Педалі, для яких у групи не було доступу до схем, не могли розглядатися в нашому дизайні як пристрої спотворення.

Варіант 1: Рекомендована роздрібна ціна Boss Metal Zone: 160 доларів США



Мал.1. Педаль Boss Metal Zone

*Особливості:* Високе посилення. Трьохсмуговий графічний еквалайзер. Підбір середньої частоти. Живиться від акумулятора 9В або адаптера змінного струму.

*Мінуси:* Немає справжнього апаратного байпасу, що призводить до того, що ефект впливає на гітарний сигнал навіть у вимкненому стані. Багато шуму присутній на спотвореннях при включенні педалі, особливо коли на гітарі не грають. Схема вирівнювання виявилася не такою ефективною, як хотілося б.

Варіант 2: Metal Muff Electro Harmonix MSRP: 119 доларів США



Мал.1.1. Педаль Metal Muff

*Особливості:* Високе посилення. Трьохсмуговий графічний еквалайзер. Верхній буст для посилення високих частот. Справжній апаратний обхід. Живлення від акумулятора 9 В або адаптера змінного струму.

*Мінуси:* Трьохсмугове вирівнювання. Схеми недоступні.



Мал.1.2. Педаль MXR Dime Distortion

Варіант 3: MXR Dime Distortion MSRP: 217 доларів США  
*Особливості:* Високе посилення. Трьохсмуговий графічний еквайзер. Вісімнадцятивольтовий блок живлення для більшого запасу потужності підсилювача. Функція черпака середньої частоти.

*Мінуси:* Немає справжнього апаратного обходу. Трьохсмугове вирівнювання. Для живлення 18 В потрібні дві батареї по 9 В або адаптер змінного струму 18В. Ціна. Схеми недоступні.

Варіант 4: Marshall Jackhammer рекомендована роздрібна ціна: 119 доларів США



Мал.1.3. Педаль Marshall Jackhammer

*Особливості:* Високе посилення. Два режими спотворень, Трьохсмуговий графічний еквайзер. Підбір середньої частоти. Справжній апаратний обхід. Живлення від акумулятора 9 В або адаптера змінного струму

*Мінуси:* Немає схем. Трьохсмуговий еквайзер

Варіант 5: Krank Distortus Maximus MSRP: 225 доларів США



*Особливості:* Високе посилення. Справжній апаратний обхід. Трьохсмуговий еквайзер

*Мінуси:* Трьохсмуговий еквайзер. Ціна. Схеми недоступні.



Мал.1.5. Педаль MXR MSRP

Варіант 6: 10-смуговий графічний еквайзер MXR MSRP: \$223

*Особливості:* 10-смуговий графічний еквайзер. Коефіцієнт підсилення на вході і виході. Світлодіодний індикатор відсікання на повзунках посилення на вході та виході. Блок живлення 18 В для більшого простору підсилювача, живлення від адаптера змінного струму.

*Мінуси:* Немає справжнього апаратного байпасу. Блок живлення 18в. Схеми недоступні.

## 1.2 Аналіз цінності.

Продуктивність конкуруючих продуктів оцінювалася за шістьма характеристиками: спотворення при високому коефіцієнті підсилення, коефіцієнт шуму, джерело живлення, вирівнювання, режим байпасу і ціна. Ці характеристики були зважені від 0 до 3 і оцінені відповідно до важливості кожної з них. Кожній педалі-конкурентці було присвоєно оцінку від 0 до 3, щоб виміряти, якою мірою вона відповідає вимогам кожної характеристики. Детальна інформація про вагу та бали наведена в таблиці нижче.

		Бали	Опис
		Ознаки	Спотворення
2	Високе посилення, але тонке або каламутне звучання, позбавлене чіткості		
1	Помірно високе посилення, але недостатнє, повне звучання		
0	Чи не жорстке обрізання, непридатне для металу		
Шум	3		Тихо, коли не відтворюється і пристрій увімкнено
	2		Гул на високому посиленні, коли не грає, без шипіння або статичного та беззвучний в іншому випадку
	1		Гул, шипіння та статика, коли не грає
	0		Гул, шипіння, статичні або інші шуми, які дуже помітні в будь-який час включеного пристрою
Живлення	3		Пристрій може живитися як від однієї батареї 9 В, так і від адаптера змінного струму
	2		Пристрій живиться від кількох батарей 9 В або адаптера змінного струму
	1		Пристрій може живитися лише від адаптера змінного струму
	0		Н/Д
Виріювання	3		Десятисмуговий еквайзер з регулюванням рівня на вході та виході
	2		Менше десяти смугових еквайзерів, який добре працює, доступно багато налаштувань
	1		Менше десяти смугових еквайзерів, яких не вистачає в використовуваних налаштуваннях
	0		У комплекті немає еквайзера або еквайзер не має корисних налаштувань
Обхід	3		Справжній апаратний байпас, дрот замикає вхід на вихід, коли пристрій вимкнено
	2		Н/Д
	1		Н/Д
	0		Немає справжнього апаратного обходу, пристрій має буферизований обхід і впливає на звуковий сигнал у вимкненому стані
Варті	3		Дуже прийнятна ціна за якість та характеристики
	2		Справедлива ціна за якість та характеристики

		1	Завищена ціна за якість та характеристики
		0	Неприпустимо завищена ціна, гірша якість і характеристики

Таблиця 1. Оцінка для кожного критерію.

	Множник цінності
Високе посилення/спотворення	3
Фактор шуму	2
Живлення	1
Вирівнювання	3
Режим обходу	3
Ціна	2








Таблиця 1.2. Призначення множника цінності лоя аналізу значень

В аналізі цінності характеристики визначаються за пріоритетністю з вагою від 1 до 3. Вага 1 відповідає бажаним характеристикам, вага 2 - важливим характеристикам, а вага 3 - необхідним характеристикам. «Дисторшн з високим коефіцієнтом підсилення» отримав три бали, оскільки він є важливим для педалей дисторшн, що працюють з важким металом. «Фактор шуму» був ретельно розглянутий при оцінці конкурентів, але отримав два бали, оскільки він не є важливим, оскільки на ринку є продукти, що зменшують помітний шум. Для цілей цього проекту під «фактором шуму» мається на увазі шипіння і статична електрика, що генерується при ввімкненні педалі, коли на гітарі не грають. Характеристика «енергоспоживання» відображає ефективність конкуруючого дизайну з точки зору енергоспоживання, необхідного для його роботи.

Ефективність конструкції з точки зору енергоспоживання є бажаною, але не обов'язковою, тому цьому пункту присвоєно вагу 1. Бажаним джерелом живлення для педалі є одна 9В батарея, дуже поширене джерело живлення для ефекторів. «Вирівнювання» отримало вагу 3, оскільки воно є дуже важливим для налаштування тембру, який видає педаль. Найбільш настроюваний звук на ринку

- це 10-смуговий еквайзер з вхідним і вихідним рівнями. «Режим байпаса» означає, що педаль вимикається, але сигнал між гітарою і підсилювачем залишається на її шляху. Справжній апаратний байпас важливий для збереження цілісності сигналу, навіть коли пристрій вимкнено, тому ця функція має три рівні. Режим байпасу поділяється на дві категорії: або пристрій, що оцінюється, має справжній апаратний байпас і отримує 3 бали за цю функцію, або пристрій має буферний байпас і отримує 0 балів за цю функцію. «Ціна» педалі-конкурента оцінюється в 2 бали, оскільки вартість не є важливим фактором дизайну, але важливо врахувати її для ефективної оцінки педалей-конкурентів.

Таблиця 3. Аналіз вартості варіантів

Продукт			Характеристики						Підсумок
Вигляд	Бренд	Модель	Посилення/ Спотворення	Шум	Живлення	Вирівнювання	Обхід	Вартість	
	Boss	Metal Zone	2	1	3	1	0	1	16
	Electro Harmonix	Metal Muff	3	2	3	2	3	2	37
	Технологія MXR	Dime Distortion	2	2	2	2	0	0	18
	Marshall	Jackhammer	3	1	3	2	3	2	33
	Кранк	Distortus Maximus	3	2	3	2	3	0	31
	Технологія MXR	10-смуговий еквалайзер	0	3	3	3	0	1	20
	Наша педаль	Очікування	3	3	3	3	3	3	42



### 1.3. Результати аналізу цінності

**Boss Metal Zone** отримав загальну оцінку 16 балів за шкалою аналізу зважених значень. За «Спотворення з високим коефіцієнтом підсилення» Boss Metal Zone отримав оцінку D, оскільки, хоча він і забезпечує достатній рівень спотворення, його тон був досить тонким і недостатньо чітким в цілому. Шипіння, статика і гудіння були помітні в режимі обходу, коли на гітарі не грали. Живлення здійснюється від 9В батареї або адаптера змінного струму, за що він отримав трійку в категорії живлення. Вирівнювання Metal Zone було досить недбалим, і навіть витративши значну кількість часу на налаштування, група не змогла досягти прийняттого звучання: «Найкраще, що могло запропонувати Metal Zone - це тонкі високі і брудні низькі частоти, які не сподобалися вухам групи. «У категорії еквалайзерів Metal Zone отримав один бал. Пристрій має буферний обхід, і його вимкнення впливає на тембр гітари, тому в категорії «режим обходу» він отримав нуль. Metal Zone отримав один бал в категорії «ціна», оскільки рекомендована роздрібна ціна педалі становить 160 доларів США, педаль китайського виробництва з такою функцією Metal Zone отримав 1 бал в категорії «ціна», оскільки рекомендована роздрібна ціна в 160 доларів США є занадто високою для китайської педалі з такою функцією.

**Electro Harmonix Metal Muff** має загальний бал 37. Це найвищий бал серед педалей-конкурентів, протестованих експертами. Педаль відповідає або перевершує вимоги до продуктивності в усіх категоріях, окрім «Коефіцієнта шуму» і «Еквалайзера». Metal Muff - нерафінована педаль, яка отримала трійку за «високий коефіцієнт посилення спотворення», що зберігає повноту звучання без каламуті на низах і верхах, забезпечуючи при цьому величезне посилення, що ідеально підходить для важкого металу. Ця функція часто використовується лід-гітаристами на концертах, щоб додати об'єму гітарним соло, дозволяючи їм звучати чіткіше, ніж решті гурту. Metal Muff отримує D в специфікації коефіцієнта шуму через гул, що додається до гітарного тону на високих

налаштуваннях підсилення. Цей гул прийнятний, оскільки він не містить шипіння або статичного шуму, і зазвичай вважається нормальним при високому посиленні. Metal Muff може живитися від батареї 9В або адаптера змінного струму і отримує оцінку С в категорії живлення. Еквалайзер Metal Muff отримує оцінку D в категорії еквалайзерів за дуже ефективний 3-смуговий еквалайзер, але йому не вистачає можливості налаштування 10-смугового еквалайзера. Пристрій має справжній апаратний байпас, що надає йому «режим байпасу», характерний для трійки. Metal Muff має MSRP 119 доларів США і є повнофункціональною педаллю, виготовленою в США.

**MXR Dime Distortion** має загальну оцінку 18 балів. Ця педаль може забезпечити високий коефіцієнт підсилення, але не дозволяє занадто багато налаштувань тону. Вона отримала двійку в категорії High Gain Distortion, тому що має по суті єдину величину спотворення, і, на відміну від інших педалей, ручка гейна не дуже впливає на звук. При включенні Dime Distortion видає гудіння, гітара працює тихо, але без шипіння або статичної електрики, тому вона отримала двійку в категорії Noise Factor. Пристрій працює від 18 В постійного струму і вимагає двох 9 В батарейок або адаптера змінного струму, тому він отримав двійку в категорії Power Factor за те, що вимагає вдвічі більше батарейок, ніж стандартна педаль. Еквалайзер педалі є 3-смуговим і отримав 2 бали в розділі «Еквалайзер»; Dime Distortion отримав 0 балів в розділі «Режим обходу», оскільки не має справжнього апаратного обходу. Він також отримав нуль у розділі «Ціна» за спробу продати звучання відомих гітаристів у коробці і відповідну ціну, рекомендована роздрібна ціна - \$217.

Педаль **Jackhammer від Marshall** набрала 35 балів в таблиці аналізу цінності, отримавши трійку в категорії «Спотворення при високому коефіцієнті посилення» за дуже характерний і дуже важкий звук. «Фактор шуму» отримав 1 за статичний шум і шипіння на високих рівнях посилення і гул в сигналі. Jackhammer набрав 9 балів за критерієм «Живлення» за роботу від батареї 3В або адаптера змінного струму і двійку в категорії «Еквалайзер», оскільки 3-смуговий

еквалайзер Jackhammer ефективний, але не ідеальний 10-смуговий еквалайзер. Він має справжній апаратний байпас і отримує трійку в категорії «режим байпасу»; Jackhammer має розумну ціну в \$119 за свої функції і отримує 3 бали в ціновій категорії.

Krank Distortus Maximus отримав загальну оцінку 33, з трійкою за «спотворення з високим коефіцієнтом посилення», оскільки він забезпечує добре збалансоване важке спотворення. Distortus Maximus отримав два бали за «коефіцієнт шуму» за збалансований, важкий дисторшн; Distortus Maximus видає гул на високих рівнях підсилення, але без шипіння або дзижчання. Працюючи від однієї 9В батареї або адаптера змінного струму, Krank отримав два бали за «Вирівнювання», оскільки має трисмуговий еквалайзер, який добре працює. Виріб має справжній апаратний байпас і отримав три бали за «режим байпасу»; Krank набрав бали за «ціну» з рекомендованою роздрібною ціною \$225, що робить його найдорожчою педаллю дисторшн, розглянутою в цьому аналізі.

**10-смуговий еквалайзер MXR** отримав загальний бал 18. Цей продукт не є педаллю дисторшн і навмисно не забезпечує високе посилення за рахунок жорсткого відсікання, як інші педалі, тому він отримує нуль балів у цій категорії; він не створює шипіння або шуму при ввімкненому еквалайзері, тому він отримує трійку в категорії «Шумовий фактор». Живлення може подаватися тільки через адаптер на 18 В, звідси і нагорода в категорії «Живлення». Пристрій оснащено 10-смуговим еквалайзером з регулюванням вхідного і вихідного підсилення, а також світлодіодним індикатором обриву, який блимає повзунками вхідного і вихідного підсилення, якщо на вході або виході підсилювача виникає обрив. Ці функції дозволили MXR 10-смуговий еквалайзеру отримати трійку в категорії еквалайзерів, оскільки він не має справжнього апаратного байпаса, який дорівнює нулю в режимі «байпаса». З рекомендованою роздрібною ціною 223 долари США, це друга найдорожча педаль, розглянута в цьому аналізі вартості, і вона заслуговує на категорію «Ціна».

**Дизайн педалі над якою ведеться розробка** повинен в ідеалі включати в

себе найкращі аспекти кожного з критеріїв аналізу цінності і набрати три бали в кожній категорії. Це повинен бути відмінний дисторшн з високим коефіцієнтом посилення. Вона не повинна видавати шум при включенні або під час гри на гітарі. Вона повинна працювати від однієї 9В батареї, як і інші стандартні педалі; мати 10-смуговий еквайзер; і 10-смуговий контроль дисторшн, як і інші стандартні педалі. Педаль, розроблена групою, повинна мати справжній апаратний обхід і бути конкурентноздатною за ціною, щоб вийти на ринок. Педаль з усіма цими характеристиками набрала б 42 бали в таблиці аналізу вартості.

## 2. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ.

### 2.1 Принцип роботи дїсторшну.

З електронної точки зору ефект дїсторшн є результатом нелїнійної обробки сигналу, в якій вихідний сигнал системи вже не є лїнійно пропорційним вхідному. У математичному контексті це означає, що сигнал, який проходить через систему, перетворюється відповідно до певної нелїнійної передавальної функції  $y = f(x)$ , де  $x$  — вхідний сигнал, а  $y$  — вихідний сигнал. У лїнійних системах функція  $f(x)$  є простою множенням вхідного сигналу на коефіцієнт посилення. У випадку дїсторшну, функція стає нелїнійною, що призводить до появи гармонїчних і небажаних інтермодуляційних компонентів.

Кліппїнг є ключовим процесом у дїсторшні й виникає тоді, коли амплїтуда сигналу перевищує допустиме значення для системи. З математичної точки зору, функція обмеження (клїппїнгу) може бути описана як:

$$y = \begin{cases} A_{\max}, & x > A_{\max} \\ x, & -A_{\max} \leq x \leq A_{\max} \\ -A_{\max}, & x < -A_{\max} \end{cases}$$

де  $A_{\max}$  — це порогове значення обмеження. Для жорсткого клїппїнгу (hardclippinghard clipping) вихідний сигнал зрізається на рівні  $A_{\max}$  або  $-A_{\max}$ , що призводить до перетворення форми хвилі на більш схожу на прямокутну. Це, в свою чергу, викликає виникнення високочастотних гармонїк, оскільки перетворення хвилі з гладкої синусоїди в прямокутну призводить до різкого стрибка похідних — математично це пов'язано з розкладанням сигналу у ряд Фур'є.

Для м'якого клїппїнгу (softclippingsoft clipping) передавальна функція є більш плавною, і сигнал не обмежується жорстко, а поступово переходить до насичення. Прикладом нелїнійної функції для м'якого клїппїнгу є:

$$y = \tanh(kx),$$

де  $k$  визначає рівень насичення. Така функція призводить до згладжування піків сигналу і генерує менше високочастотних гармонік, порівняно з жорстким кліппінгом.

Гіперболічний тангенс тут є наближенням до поведінки лампового підсилювача, який природно обмежує сигнал на високих амплітудах.

З погляду електроніки, дисторшн виникає у різних компонентах залежно від їх конструктивних особливостей. Наприклад, у лампових підсилювачах дисторшн виникає через властивість ламп працювати у нелінійному режимі за високого сигналу. Лампи генерують переважно парні гармоніки, що на слух сприймається як тепле й музичне іскаження. У транзисторних підсилювачах нелінійність має інший характер: транзистори, особливо біполярні, схильні до жорсткого кліппінгу й генерують переважно непарні гармоніки, що робить звук більш жорстким і різким.

Цікавою особливістю є поява інтермодуляційних спотворень, які виникають при одночасній обробці кількох частот у нелінійній системі. Якщо вхідний сигнал складається з двох синусоїдальних частот  $f_1$  і  $f_2$ , нелінійна система генерує додаткові частоти виду  $f_1 + f_2$ ,  $f_1 - f_2$ , а також їх комбінації, що не є кратними гармоніками основних частот. Це призводить до «брудного» звучання, особливо при обробці складних звукових сигналів, таких як акорди чи багатоголосі партії.

У цифровій обробці дисторшн реалізується через дискретизацію та квантування сигналу, а також через математичне моделювання процесів кліппінгу. Цифровий дисторшн іноді супроводжується аліасингом — артефактом, що виникає, коли високочастотні компоненти сигналу, створені в результаті нелінійної обробки, не можуть бути правильно відтворені через обмежену частоту дискретизації. Для боротьби з цим застосовують техніку oversampling, тобто обробку сигналу на

значно вищій частоті, ніж стандартна, щоб уникнути накладання спектральних компонентів.

Таким чином, ефект дисторшн є результатом нелінійної обробки сигналу як в аналоговій, так і в цифровій системах. З математичної точки зору це призводить до модифікації гармонічного спектра сигналу, появи нових частотних компонентів і значної зміни форми хвилі. В електроніці це пов'язано з фізичними обмеженнями компонентів, такими як лампи, транзистори або цифро-аналогові перетворювачі, кожен з яких додає до сигналу свої унікальні нелінійності.

У контексті теорії сигналів та математичної обробки важливо розуміти роль гармонічного аналізу для опису ефекту дисторшн. Чистий сигнал із синусоїдальною формою хвилі можна представити як базову частоту, що є єдиним компонентом у його спектрі. Коли до сигналу застосовується дисторшн через нелінійність, хвиля починає змінювати форму, і це призводить до появи гармонік — додаткових частот, які є цілими кратними основної частоти. Зміна форми сигналу має прямий зв'язок із його спектральною характеристикою: чим більше хвиля відрізняється від синусоїди, тим багатший її спектр на гармоніки. Математично це описується через розклад Фур'є, який дозволяє представити будь-який періодичний сигнал як суму синусоїд з різними частотами та амплітудами:

$$x(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos(2\pi n f_0 t) + b_n \sin(2\pi n f_0 t)),$$

де  $a_n$  і  $b_n$  — коефіцієнти амплітуди гармонік, а  $n f_0$  — частота гармоніки. Якщо сигнал оброблено дисторшном, коефіцієнти  $a_n$  та  $b_n$  для вищих гармонік вже не дорівнюють нулю, оскільки форма хвилі змінилася, а це призводить до збагачення спектра новими компонентами.

Для пояснення на прикладі жорсткого кліппінгу: коли синусоїда «обрізається», її форма стає ближчою до прямокутної хвилі. Спектр прямокутної

хвилі містить гармоніки, що зменшуються обернено пропорційно порядку гармоніки:  $1/n$ , де  $n$  — номер гармоніки. Тобто з'являються всі непарні гармоніки (3-та, 5-та, 7-ма тощо), і їх амплітуда поступово спадає. Саме ці гармоніки додають «гостроти» й «грубості» звуку.

В електроніці виникнення дисторшну можна розглядати через статичні нелінійні перетворення. Якщо підсилювач має нелінійну характеристику передавання  $y = f(x)$  то вихідний сигнал залежить від вхідного у складний спосіб. Відповідно до теореми про нелінійність, сигнал, що подається на нелінійну систему, генерує не лише гармоніки, але й додаткові комбінаційні частоти через інтермодуляцію. Припустимо, на вході системи є дві частоти  $f_1$  і  $f_2$ . На виході, крім самих цих частот, з'являються складові  $f_1+f_2$ ,  $f_1-f_2$ ,  $2f_1 \pm f_2$  тощо. У транзисторних каскадах, де дисторшн часто виникає через навантаження на нелінійний р-п перехід, електричні характеристики вихідного струму перестають лінійно залежати від вхідної напруги. Це описується через поліноміальне наближення:

$$y(t) = c_1x(t) + c_2x^2(t) + c_3x^3(t) + \dots,$$

де  $c_1$  — коефіцієнт лінійного посилення, а  $c_2, c_3, \dots$  відповідають ступеням нелінійності. Члени другого і третього порядку відповідають за появу гармонік і міжгармонічних частот. Наприклад, квадратний член  $x^2(t)$  створює другу гармоніку, а кубічний  $x^3(t)$  генерує третю гармоніку. При цьому непарні гармоніки (3-тя, 5-та) характерні для жорсткого кліппінгу в транзисторах, а парні гармоніки (2-га, 4-та) переважають у лампових схемах.

У цифрових системах проблема нелінійної обробки сигналу ускладнюється через дискретизацію та обмежену розрядність квантування. Цифровий дисторшн виникає при перевищенні максимально допустимого значення амплітуди сигналу, після чого відбувається жорстке «зрізання». При цьому також виникає аліасинг — ефект, коли високочастотні гармоніки «віддзеркалюються» в межах



частоти Найквіста і створюють артефакти в нижньому спектрі. Для запобігання аліасингу використовують фільтри-антиаліаси та техніку oversampling, яка збільшує частоту дискретизації перед обробкою сигналу.

Таким чином, дисторшн є наслідком нелінійної обробки, що модифікує спектр сигналу через гармоніки, інтермодуляцію та інші нелінійні ефекти. Математичні моделі дозволяють точно описати цю поведінку через розклади Фур'є, поліноміальні апроксимації та нелінійні передавальні функції. В електроніці ж різні компоненти, такі як лампи, транзистори чи цифрові алгоритми, додають унікальні характеристики нелінійності, формуючи спектральний відбиток дисторшну.

## 2.2. Принцип роботи еквалайзера.

Еквалайзер, з математичної та електронної точки зору, є пристроєм або алгоритмом, що виконує частотну фільтрацію сигналу, тобто змінює амплітуду різних частотних компонент звукового сигналу. Основна ідея еквалізації базується на принципі лінійної фільтрації, де сигнал розкладається на частотні складові за допомогою перетворення Фур'є, а потім певні діапазони частот підсилюються або послаблюються відповідно до заданої функції передачі фільтра.

Математично це можна описати через систему, що має імпульсну характеристику  $h(t)$ . При обробці сигналу  $x(t)$ , еквалайзер виконує операцію згортки, яка в часовій області визначається як:

$$y(t) = x(t) * h(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau)h(t - \tau)d\tau,$$

де  $h(t)$  задає, як система (еквалайзер) впливає на кожен частотний складову сигналу. У частотній області еквалізація простіше описується через функцію передачі  $H(f)$ , яка є перетворенням Фур'є імпульсної характеристики  $h(t)$ . Для вхідного сигналу  $X(f)$  вихідний сигнал у частотній області  $Y(f)$  буде:

$$Y(f) = X(f) \cdot H(f),$$

де  $H(f)$  визначає підсилення або ослаблення для кожної частоти  $f$ . У випадку еквалайзера,  $H(f)$  — це функція, яка може мати різні форми залежно від типу фільтра: підсилення на низьких, середніх або високих частотах.

З електронної точки зору, еквалайзер побудований на основі фільтрів різного типу, кожен з яких впливає на певний діапазон частот. Фільтри можна розділити на пасивні (засновані на резисторах, конденсаторах та котушках індуктивності) та активні (що використовують операційні підсилювачі для більшої гнучкості). Основні види фільтрів, що використовуються в еквалайзерах:

1. Низькочастотний фільтр (Low-Pass Filter, LPF):

пропускає низькі частоти й поступово послаблює високі. Його функція передачі математично описується як:

$$H(f) = \frac{1}{\sqrt{1 + (f/f_c)^2}},$$

де  $f_c$  — частота зрізу, після якої відбувається значне ослаблення сигналу.

2. Високочастотний фільтр (High-Pass Filter, HPF):

протилежний до низькочастотного фільтра, пропускає високі частоти та послаблює низькі. Функція передачі має вигляд:

$$H(f) = \frac{(f/f_c)}{\sqrt{1 + (f/f_c)^2}}.$$

3. Смуговий фільтр (Band-Pass Filter, BPF): пропускає частоти в певному діапазоні  $[f_1, f_2]$ , а решту послаблює. Його функція передачі формується як добуток функцій низькочастотного та високочастотного фільтрів.

4. Параметричний фільтр: дозволяє точно налаштувати

частоту, ширину смуги (Q-фактор) та рівень підсилення чи ослаблення. Його функція передачі є більш складною й описується як:

$$H(f) = 1 + \frac{G \cdot (f^2 - f_0^2)}{f^2 + Q^{-1} f_0 f},$$

де  $G$  — коефіцієнт підсилення,  $f_0$  — центральна частота,  $Q$  — добротність.

З точки зору цифрової обробки сигналів (DSP), еквалайзер реалізується через дискретні фільтри, що застосовуються до цифрових сигналів. Найпоширенішими є фільтри з кінцевою імпульсною характеристикою (FIR) та фільтри з нескінченною імпульсною характеристикою (IIR). FIR-фільтри забезпечують стабільну обробку сигналу без зворотного зв'язку, а IIR-фільтри є більш ефективними, але можуть вносити фазові спотворення.

Цифровий еквалайзер працює за принципом дискретизації вхідного сигналу з подальшою фільтрацією у частотній або часовій області. У частотній області сигнал перетворюється через швидке перетворення Фур'є (FFT), потім до нього застосовується частотна функція  $H(f)$ , і результат повертається у часову область через обернене перетворення Фур'є (IFFT). У часовій області фільтрація здійснюється за допомогою рекурсивних рівнянь, де вихідний сигнал залежить від вхідного та попередніх значень виходу.

Таким чином, еквалайзер є інструментом, що математично реалізує частотну фільтрацію, застосовуючи функцію передачі для зміни амплітуд спектральних компонент. В електроніці він використовує активні та пасивні фільтри для обробки аналогових сигналів, а в цифровій обробці сигналів він працює через дискретні фільтри та перетворення Фур'є. Його основне завдання — дозволити точний контроль над спектральним балансом звукового сигналу, що робить його незамінним інструментом у звуковому дизайні, записі та відтворенні музики.

Детальніше розглядаючи роботу еквалайзера в контексті фізичної реалізації, слід згадати про фазові характеристики фільтрації та її вплив на

загальну форму сигналу. Хоча основною метою еквайзера є зміна амплітуди певних частотних діапазонів, фазовий зсув, який виникає під час фільтрації, також відіграє важливу роль. У реальних системах будь-який фільтр не лише змінює амплітуду складових сигналу, але й зсуває їх фази, що особливо помітно на межах діапазонів зрізу. Відповідно до фазової характеристики  $\theta(f)$ , яка є частиною комплексної функції передачі, для ідеального фільтра фазовий зсув має бути мінімальним або лінійним, щоб не вносити часових спотворень. Проте в реальних аналогових і цифрових еквайзерах зсув фаз неминучий і може призводити до так званих групових затримок, коли різні частотні компоненти сигналу проходять через фільтр із різною швидкістю.

У цифрових системах фазові спотворення часто компенсуються за допомогою лінійно-фазових фільтрів, які забезпечують однакову затримку для всіх частотних складових, завдяки чому сигнал після обробки зберігає свою форму. Для досягнення лінійної фази часто використовуються FIR-фільтри, оскільки їхня імпульсна характеристика є симетричною. Натомість IIR-фільтри, хоч і є обчислювально ефективнішими, за своєю природою нелінійно зрушують фазу сигналу.

Еквайзери також можна класифікувати за їхньою функціональністю на графічні та параметричні. Графічний еквайзер працює за допомогою вузькосмугових фільтрів, кожен із яких охоплює фіксований діапазон частот. З математичної точки зору, такий еквайзер є набором фільтрів із центрованими смугами, що працюють паралельно. Загальна передаточна функція є сумою впливів усіх фільтрів, де кожен із них змінює амплітуду своєї частотної смуги:

$$H_{\text{total}}(f) = \sum_{k=1}^N H_k(f),$$

де  $H_k(f)$  — функція передачі для  $k$ -го вузькосмугового фільтра. Це забезпечує точний контроль над амплітудою в певних діапазонах, але з меншою гнучкістю, ніж параметричний еквайзер.

Параметричний еквалайзер, навпаки, дозволяє користувачу налаштувати три основні параметри кожного фільтра: центральну частоту  $f_0$ , підсилення або ослаблення  $G$ , а також добротність  $Q$ , що визначає ширину смуги впливу фільтра. З математичної точки зору добротність  $Q$  впливає на крутизну та ширину функції передачі фільтра:

$$Q = \frac{f_0}{\Delta f},$$

де  $\Delta f$  — ширина смуги на рівні -3 дБ. Чим вище значення  $Q$ , тим вужча смуга частот, що піддається обробці, що дозволяє виконувати дуже точну корекцію.

В електронних реалізаціях еквалайзерів часто використовуються активні фільтри, побудовані на основі операційних підсилювачів (Op-Amps). За допомогою підключення резисторів і конденсаторів у різних конфігураціях можна реалізувати низькочастотні, високочастотні або смугові фільтри. Завдяки зворотному зв'язку в активних фільтрах досягається стабільне підсилення сигналу та більш точний контроль параметрів фільтрації.

Також слід розглянути сучасні цифрові еквалайзери, які працюють у реальному часі завдяки використанню дискретного перетворення Фур'є (DFT) або його оптимізованої версії — швидкого перетворення Фур'є (FFT). У таких системах сигнал розкладається на частотні складові, кожна з яких масштабується відповідно до функції передачі, після чого застосовується зворотне перетворення Фур'є для відновлення сигналу у часовій області. Оскільки цифрова обробка дозволяє працювати з високою точністю, сучасні еквалайзери здатні реалізувати складні фільтри з мінімальними фазовими спотвореннями та високою роздільною здатністю.

Застосування еквалайзера також має відношення до психоакустики, тобто сприйняття звуку людиною. Наприклад, підсилення низьких частот створює відчуття «вагомості» й «глибини» звуку, тоді як підсилення високих частот додає «чіткості» та «прозорості». Людське вухо має нерівномірну чутливість до різних

частот, що описується кривими рівної гучності (криві Флетчера-Мансона). Еквалайзер дозволяє компенсувати ці особливості, налаштовуючи баланс частот так, щоб звук сприймався природно або відповідав художньому задуму.

### 3. РОЗРОБКА СХЕМИ.

#### 3.1. Розробка плати дісторшн(спотворення).

Початковий дизайн був натхненний сучасними педалями ефектів, представленими на ринку. У моєму дослідженні ринку було розглянуто багато різних педалей ефектів, які забезпечують спотворення і вирівнювання.

Схема являє собою аналогову педаль, що складається з аналогових компонентів. Він має регулювання коефіцієнта посилення та гучності, а також параметричний, трьохсмуговий еквайзер. Повна схема педалі показана в додатку А.



Рис.3. Педаль Boss Metal Zone.

Педаль Boss Metal Zone, побудована на макетній платі, показана на рис.3. Вхідний і вихідний роз'єми були підключені до входу і виходу схеми педалі таким чином, щоб сигнал від електрогітари міг бути поданий в педаль, а його вихід міг бути відправлений на гітарний підсилювач.

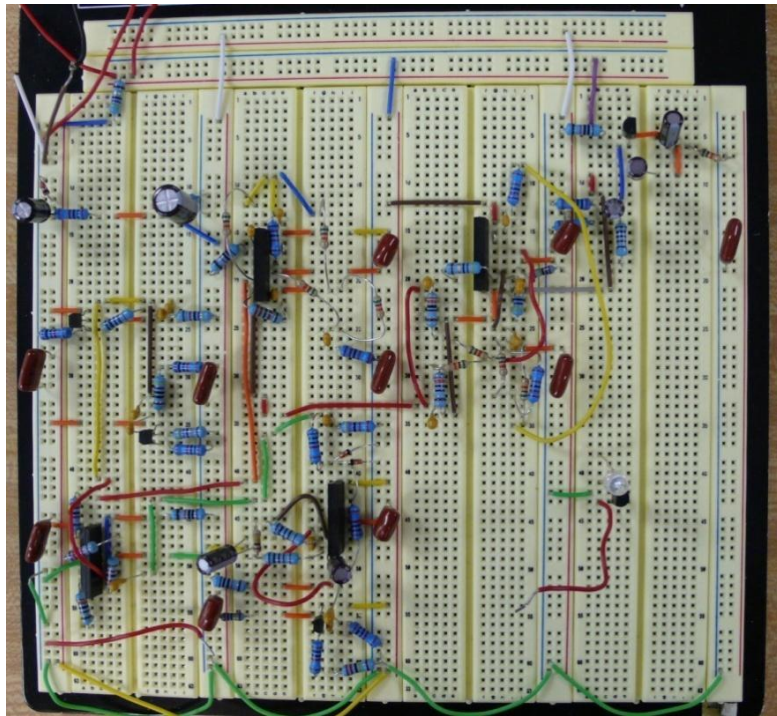


Рис.3.1. Педаль Boss Metal Zone, побудована на макетній платі

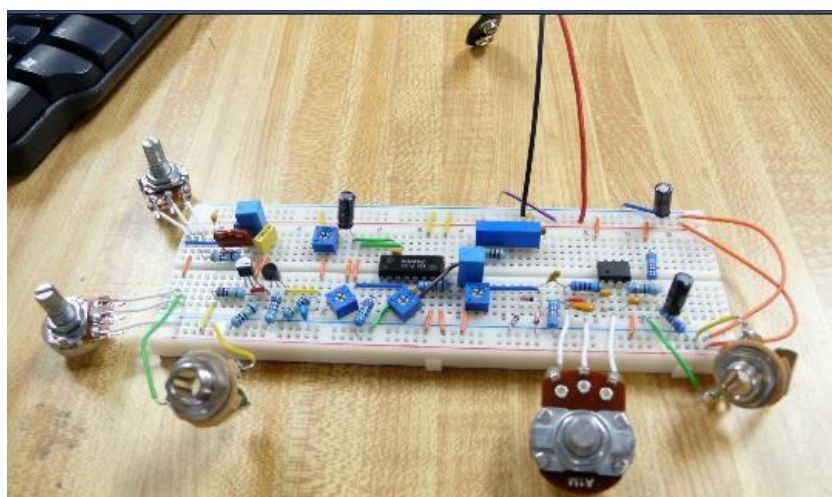
Педалі, зібрані на макетних платах, додають до сигналу небажаний шум. Цей надлишок шуму можна побачити в частотній області і почути, коли вихідний сигнал посилюється. Оскільки плата має власну ємність, деякий шум був очікуваним, але не настільки значним. Щоб зменшити шум, біля джерела живлення постійного струму було додано конденсатори фільтрації, а всі кабелі було вкорочено. Однак шум не вдалося зменшити до прийняттого рівня. Вихідні сигнали на кожному вузлі були проаналізовані за допомогою осцилографа, щоб спостерігати, як вони впливають на сигнали, що проходять через кожен блок.

Більшість небажаних шумів були спричинені секцією еквайзера. Вирівнювання педалей працювало неправильно. І низькі, і високі частоти були присутні паралельно в одному колі зворотного зв'язку підсилювача. При регулюванні ручкою потенціометра ці два діапазони мали небажаний вплив один на одного. Крім того, параметричний еквайзер виявився непотрібною функцією, оскільки підвищував лише одне значення добротності в середньочастотному діапазоні. Логічніше було б посилити ту саму смугу частот кількома значеннями добротності.



Педаць Boss Metal Zone є комерційною розробкою і тому має типові функціональні блоки, притаманні багатьом педалям, представленим на ринку. Насправді це є недоліком дизайну, тому що ці каскади є спільними для всіх педалей. Тому звукові семпли виходів педалі були переглянуті для наступного дизайну, щоб створити педаць з кращими характеристиками і унікальністю. Будівництво скриньки для божевілля.

Наступним розглянутим контуром спотворення був Insanity Vox. Схема цієї педалі наведена в Додатку А. Простота цієї схеми порівняно з Metal Zone відразу ж привернула нашу увагу. Завдяки накладенню трьох каскадів посилення один на одного, звук був не тільки чистішим, але і менш



спотвореним, більш настроюваним і набагато дешевшим у виробництві, ніж у Boss Metal Zone. Повна версія Insanity Vox, зібрана на макетній платі і займає менше половини місця, ніж Metal Zone, показана на рисунку 3.2.

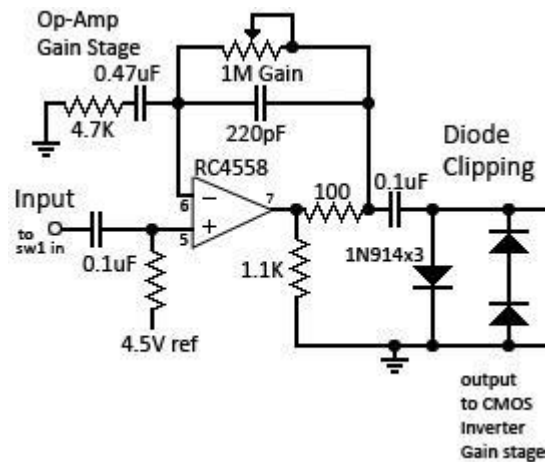


Рис. 3.2. Підсилення операційного підсилювача та каскади відсікання діодів  
Insanity Vox

Педаль має деякі схеми, схожі на Metal Zone, що притаманні багатьом схемам дисторшн, наприклад, каскад підсилення з підсилювачем і діодним відсікачем, як показано на рисунку 3.2. Однак Insanity Vox дозволяє більше контролювати посилення на цьому каскаді, використовуючи потенціометр 1 МОм в ланцюзі зворотного зв'язку замість потенціометра 250 кОм, який використовується в педалі Boss. Діодний відсікач після цього каскаду - це асиметричний відсікач з використанням трьох діодів 1N914. Приклад асиметричного діодного відсікання показано на Рис. 3.3.

Коли вхідний сигнал позитивний і наближається до прямої напруги діодів, діод з лівого боку вмикається, тобто зсувається вперед, і вихідна напруга обмежується прямою напругою діодів. Коли сигнал позитивний, лівий діод зміщений вперед і вихідна напруга обмежується прямою напругою діода 1N914, тобто 0,7 В. Коли сигнал негативний, два діоди з правого боку зміщені в прямому напрямку, і вихідна напруга обмежена до -0,7 В-0,7 В нижче рівня зміщення, тобто близько -1,4 В мінімум.

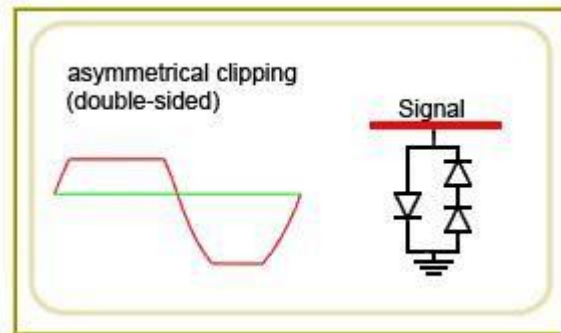


Рис. 3.3. Асиметричний сигнал і схема відсікання діодів

Слідом за каскадом посилення операційного підсилювача і асиметричним відсіканням діодів йде каскад посилення CMOS-інвертора. Схема посилення інвертора показана на Рис. 3.4. Він складався з двох небуферизованих CMOS-інверторів від мікросхеми CD4049AE, які живилися від лінії 9 В нашої схеми.

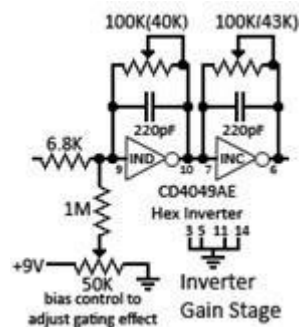


Рис. 3.4. Стадія посилення CMOS інвертора Insanity Vox.

Вхід каскаду посилення CMOS з'єднаний з діодним каскадом через ємнісний зв'язок для ізоляції каскаду посилення CMOS від зміщення по постійному струму попереднього каскаду. Оскільки CD4049AE - це мікросхема з гексагональним інвертором, на ній є ще чотири невикористовувані інвертори. Ці чотири невикористовувані входи інверторів заземлені для підтримки стабільності двох задіяних і для запобігання випадкових клацань у гітарному сигналі через витрки в мікросхемі. Напруга, що відповідає логічному максимуму інвертора CD4049AE, становить близько 3,5 В. Якщо користувач бажає, є потенціометр, який регулює зміщення входу першого інвертора, щоб зупинити ефект, який називається стробуванням. Гейтингом називають блокування гітарного сигналу, коли він падає нижче певного амплітудного порогу.

Цей ефект викликаний роботою інверторів. Кожен інвертор перетворює сигнал з логічного мінімуму (від 0 до 3,5 В) в логічний максимум (3,5 В на шині живлення або 9 В на зарядженій батареї) і з логічного максимуму в логічний мінімум. Коли CD4049AE перетворює логічний максимум в логічний мінімум, на виході виходить нижня межа логічного мінімуму або від 0 до 0,05 В. Опір зворотного зв'язку кожного інвертора можна регулювати за допомогою підлаштування. Потенціометр зворотного зв'язку першого інвертора встановлено на 40 кОм, а другого - на 43 кОм. Коефіцієнт підсилення у відкритому контурі CD4049AE становить приблизно 30.

Опір кола зворотного зв'язку зміщує інвертор в лінійну робочу область, але викликає ефект Міллера. Дзеркальний ефект означає, що на вході інвертора з'являється дзеркальний резистор, а значення резистора зворотного зв'язку ділиться на коефіцієнт підсилення відкритого кола інвертора. Це означає, що опір Міллера на вході першого інвертора становить  $40 \text{ кОм}/30$  або приблизно 1,33 кОм. Цей резистор включений послідовно з резистором 6,8 кОм, що дає загальний вхідний опір 8,13 кОм. Коефіцієнт підсилення кожного інвертора розраховується простим діленням резистора зворотного зв'язку на вхідний опір і взяттям від'ємного значення, яке дорівнює  $-40 \text{ кОм}/8,13 \text{ кОм}$  або приблизно мінус 5. Оскільки між двома каскадами інвертора немає вхідного опору, вхідний імпеданс відбивається на вході другого інвертора. Імпеданс інвертора становить  $43 \text{ кОм}/30$ , або приблизно 1,43 кОм.

Коефіцієнт підсилення другого інвертора становить  $-43 \text{ кОм}/(1,43 \text{ кОм} + 6,8 \text{ кОм})$ , тобто приблизно -5,2. Коефіцієнт підсилення всього каскаду інвертора дорівнює добутку коефіцієнта підсилення першого каскаду на коефіцієнт підсилення другого каскаду, що дає коефіцієнт підсилення каскаду CMOS-інвертора приблизно 26. При роботі з напругою живлення 9 В смуга пропускання CD4049AE становить приблизно 1,5 МГц, що є достатнім для цілей цієї педалі.

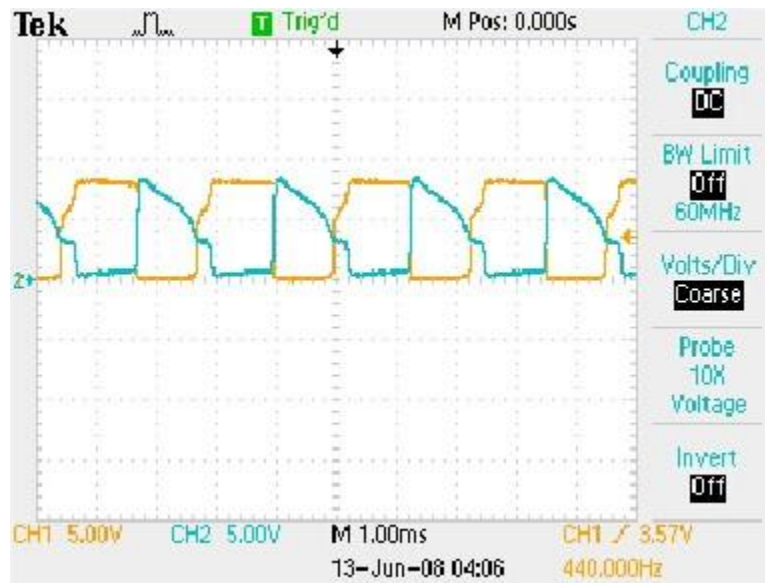


Рис. 3.5. До і після другого інвертора.

Працюючи в лінійному діапазоні, кожен CMOS-інвертор в корпусі CD4049AE може забезпечити посилення на 30-40 дБ, тобто від 31,6 до 100 разів, з смугою пропускання близько 1,5 МГц при напрузі 9 В. Додавання резистора в ланцюг зворотного зв'язку обмежує струм в CMOS. Зі збільшенням опору коефіцієнт підсилення і смуга пропускання зменшуються. Користувач може регулювати резистори для вибору правильного тону для бажаного звучання; оскільки вхідний і вихідний імпеданс CMOS-інвертора високий, за CMOS-каскадом слідує JFET-каскад посилення, показаний на Рис. 3.6.

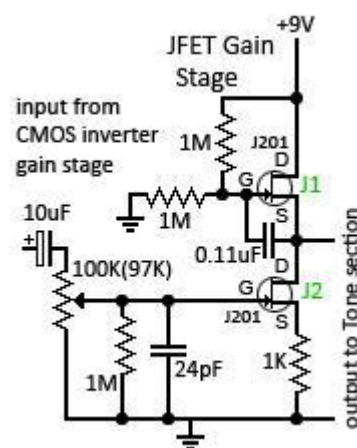


Рис. 3.6. Стадія посилення JFET у Insanity Vox

Полярний конденсатор 10 мкФ зліва від транзисторного каскаду підсилення блокує зміщення сигналу за постійним струмом. Також є потенціометр підлаштування, який регулює рівень сигналу перед каскадом підсилення; резистор 1 МОм і паралельно з ним конденсатор 24 пФ утворюють фільтр

низьких частот, який блокує всі частоти, крім 6,631 кГц. Транзисторний каскад підсилення складається з двох N-канальних JFET J201; поділ напруги на два резистори 1 МОм встановлює опорну напругу вихідного сигналу на рівні 4,5 В. Струм стоку J1 дорівнює струму стоку J2. Вхідний сигнал гітари подається на затвор J2, а джерело J2 заземлюється так, щоб напруга на затворі-джерелі дорівнювала вхідному сигналу VIN:

$$ID2 = \beta(VGS2-VTO)^2 = \beta(VIN2-VTO)^2 \text{ [Рівняння 1]}$$

У рівнянні 1  $\beta$  - це провідність, а  $VTO$  - порогова напруга JFET-пристрою. Вихідна напруга дорівнює комбінації струму стоку і опору 1 кОм і показана рівнянням 2.

$$VOUT - 0 = ID2 (1 \text{ к}\Omega) \text{ [Рівняння 2]}$$

Підстановка рівняння 1 в рівняння 2 дає рівняння 3, яке є прямою залежністю між вхідним сигналом і вихідним сигналом. Рівняння 3 показує, що вихідний сигнал зростає експоненціально зі збільшенням вхідного сигналу. Отже, зі збільшенням амплітуди вхідного сигналу коефіцієнт підсилення ( $VOUT/VIN$ ) також зростає по експоненті:

$$VOUT = \beta (VIN-VTO)^2 (1 \text{ к}\Omega) \text{ [Рівняння 3]}$$

Insanity Vox мав ряд привабливих особливостей, які були додані до остаточного дизайну: Кожен каскад підсилення в Insanity Vox давав саме той звук, який ми хотіли. Регульований диференціал, який можна відрегулювати за допомогою викрутки, коли корпус педалі відкритий, був бонусом. Користувачі можуть попередньо встановити ці значення на кожному етапі схеми, щоб налаштувати звук під свій власний стиль.

### 3.2. Побудова десятизмугового еквалайзера.

Принцип роботи десятизмугового еквалайзера полягає в тому, що десять частот в акустичному діапазоні гітарного підсилювача вибираються виробником при побудові еквалайзера. Користувач має можливість регулювати рівні кожної з десяти частот за допомогою слайдових потенціометрів.

Друкована плата, яка використовувалася для створення та перевірки еквалайзера, а схема підключення вимикача та роз'єму показана на Рис. 3.7.

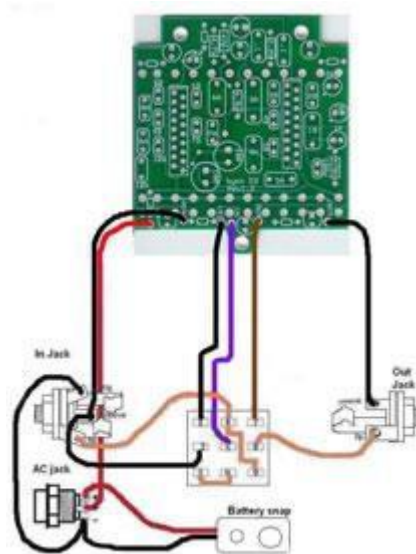


Рис. 3.7. Схема підключення десятизмугового еквалайзера РСВ і перемикача. На Рис. 3.7. представлений вид друкованої плати знизу. Вид друкованої плати зверху показаний на Рис. 3.8. Области, де розташовані слайдові потенціометри для регулювання десяти частотних діапазонів, виділені червоним кольором. Два з повзункових потенціометрів призначені для рівня (регулювання гучності) на вході і виході еквалайзера.

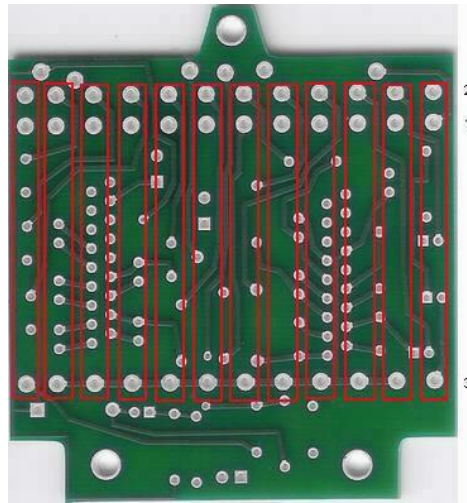


Рис. 3.8. Розміщення слайдових потенціометрів для десятисмугового еквалайзера.

Спочатку еквалайзер було протестовано окремо від підсилювача. Для цього було підключено акумулятор, заземлення, вхідний і вихідний кабелі. Вхідний сигнал подавався з напругою 140 мВ і частотою 440 Гц, основною частотою звуку «А» електрогітари. Сигнал спостерігався в частотній області. Потім повзунковий потенціометр регулювали, щоб побачити, що відбувається в частотній області. На рисунку 18 показано результати, отримані при встановленні всіх потенціометрів у найнижче положення, окрім потенціометра, встановленого на 3,3 кГц. Частота з найбільшою амплітудою - 440 Гц, показана в лівій частині осцилографа на діаграмі нижче; смуга еквалайзера на частоті 3,3 кГц знаходиться на повному рівні з коефіцієнтом підсилення близько 5 для цієї частоти. Зверніть увагу, що на цій частоті спостерігається сплеск, який приблизно в 5 разів перевищує амплітуду шуму. Це збільшення частоти також спричиняє сплеск гармонік 3,3 кГц, причому кожна наступна гармоніка має половину амплітуди попереднього сплеску.



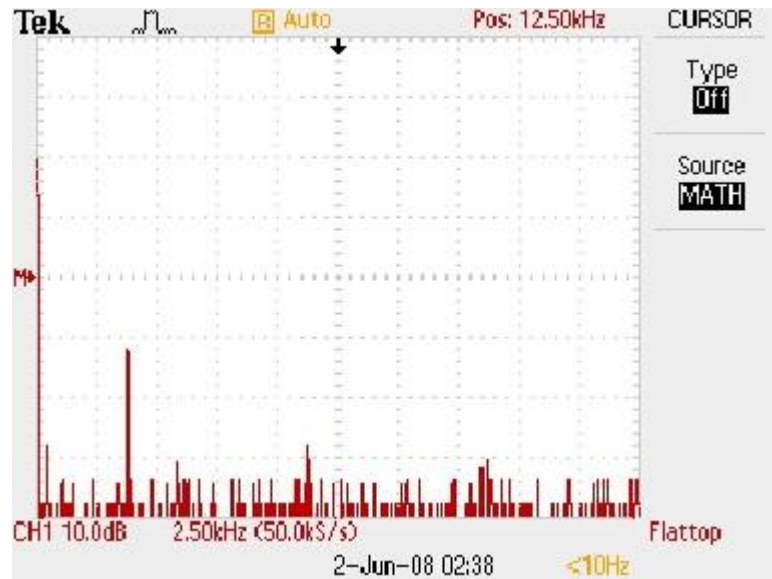


Рис. 3.9. Діапазон 3,3 кГц, посиленний десятисмуговим еквайзером.

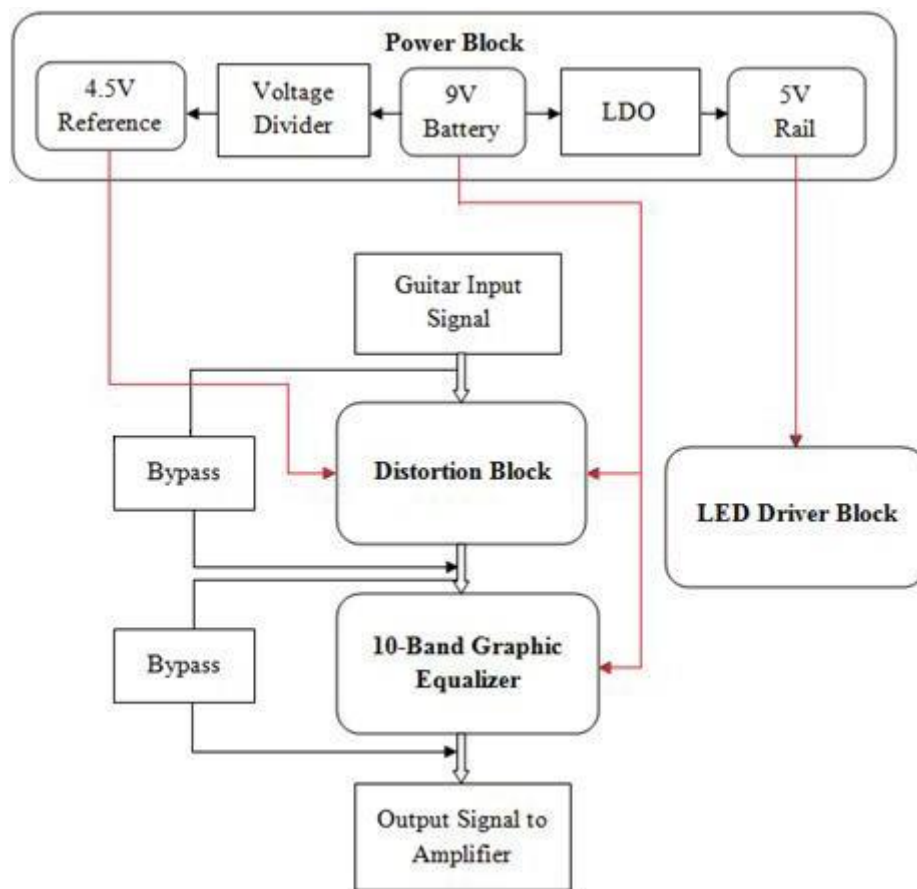
Аналогічні тести були проведені в інших частотних діапазонах з тими самими результатами. Також є можливість регулювати кілька частот одночасно: Еквайзер був підключений до виходу Insanity Vox, зібраного на макетній платі, після того, як тести підтвердили, що еквайзер працює коректно. Вхідний роз'єм був підключений до стартового порту Insanity Vox, як і раніше. Потім на еквайзер подали живлення з лінії 9В схеми Insanity Vox, а вихідний роз'єм підключили до виходу еквайзера. Сигнал з гітари був поданий на вхід, і еквайзер працював, як і очікувалося. Регулювання частотного діапазону сигналу за допомогою потенціометра відповідало зміні частоти звуку, що надходив зі схеми спотворення Insanity.

## 4. Виготовлення проекту

### 4.1. Архітектура системи.

Загальна структурна схема нашого остаточного дизайну показана на Рис. 4.1. Він складається з блоку живлення, блоку спотворень, десятисмугового еквайзера та блоку драйверів LED. Є опція обходу блоку спотворень, блоку еквайзера або обох. Це досягається за допомогою перемикачів. Електропроводки перемикача, а також кожен окремий функціональний блок описаний в наступних розділах.

Рис. 4.1. Блок-схема системи.



#### 4.1.1. Опис модулів.

Ця педаль містить модифіковану схему Insanity Vox, включаючи 10-смуговий еквайзер і логіку світлодіодних драйверів. Ця педаль має дві функції: її можна використовувати як педаль дисторшн, педаль еквайзера або як обидві. Це досягається за допомогою байпасної схеми, вбудованої в два ізоляційні перемикачі. Кожен функціональний блок детально описаний в наступних розділах.

#### 4.1.2. Вхідні та вихідні сигнали.

Кожна нота гітари, що грається, має пікову напругу від 140 мВ до 1,4 В. Вихідний опір гітари становить приблизно 1 МОм і повинен бути узгоджений з вхідним опором пристрою. Імпеданс підсилювача також становить приблизно 1 МОм і також повинен бути узгоджений з вихідною стороною пристрою. Вихідний сигнал від цієї педалі до підсилювача буде в діапазоні 0-9 В від піку до піку.

#### 4.1.3. Блок живлення.

Джерело живлення для схеми педалборду складалося з батареї 9 В і простого дільника напруги з двома резисторами 10 кОм, що забезпечує опорну напругу 4,5 В для зсуву сигналу між шинами 0-9 В підсилювача каскаду спотворення. Спочатку він також був розроблений для подачі 4,5 В на І-транзистор і мікросхему інвертора для живлення світлодіодів у блоці драйверів світлодіодів, але виявилось, що простий дільник напруги не може бути використаний для керування світлодіодним навантаженням, тому було використано 5 В лінійний стабілізатор напруги (LDO); вхідна напруга на LDO становить 9 В від батареї, і LDO забезпечує постійну вихідну напругу 5 В на блоці драйверів світлодіодів.

#### 4.1.4. Блоки спотворень Insanity Box.

В якості операційного підсилювача використовувався підсилювач RC4458, розроблений з низьким рівнем шуму. Для більшого підсилення в ланцюзі зворотного зв'язку Insanity box було використано потенціометр на 1 МОм. Операційний підсилювач має дуже високий вхідний опір, тому розміщення підсилювача на першому каскаді посилення враховує високий вихідний опір електрогітари. Після каскаду підсилення в Insanity Box були використані асиметричний діодний відсікач, інвертор і JFET каскади підсилення, тому що звук спотворення педалі ідеально підходить для даного застосування, а інвертор можна регулювати для зміни коефіцієнта підсилення і різних рівнів диференціала, що додатково налаштовується користувачем.

#### 4.1.5. Десятисмуговий еквалайзер.

Для 10-смугового еквалайзера було встановлено схему еквалайзера, придбану на сайті [buildyourownclone.com](http://buildyourownclone.com) і показано в Додатку А. Використано дві п'ятиканальні мікросхеми графічного еквалайзера ВА3812L, що живляться від лінії 9В. Звуковий діапазон підсилювача для електрогітари становить від 100 Гц до 6,2 кГц, тому частоти еквалайзера були обрані таким чином, щоб підкреслити 10 частот у цьому діапазоні. Рівняння нижче описує ці частоти.

$$\text{Частота} = 2\pi \cdot 1,2 \text{ кОм} \times 68 \text{ кОм} \times C1 \times C2$$

У середині ВА3812L розміщено резистори номіналом 1,2 кОм і 6,8 кОм. Полярні частоти, вибрані для цього діапазону: 100 Гц, 330 Гц, 410 Гц, 620 Гц, 820 Гц, 1 кГц, 2,2 кГц, 3,3 кГц, 4,1 кГц і 6,2 кГц. Зверніть увагу, що на вищих частотах поширення є логарифмічним, а не лінійним, оскільки вухо не може розрізняти близькі частоти. Використовуючи це рівняння, для кожної частоти було підібрано по два конденсатори. Вибір конденсаторів, що відповідають кожній частоті, показано в таблиці 5.

Таблиця 5: Вибір частоти і номіналів конденсаторів для десятисмугового еквалайзера

Частота	C1	C2
100 Гц	1мкФ	.027мкФ
330 Гц	.33мкФ	.0082мкФ
410 Гц	.27мкФ	.0068мкФ
620 Гц	.18мкФ	.0047мкФ
820 Гц	.15мкФ	.0033мкФ
1 кГц	.1мкФ	.0027мкФ
2,2 кГц	.068мкФ	.001мкФ
3,3 кГц	.033мкФ	820pF
4,1 кГц	.027мкФ	680pF
6,2 кГц	.018мкФ	470 пФ

Коефіцієнт підсилення на кожній полюсній частоті регулюється десятьма повзунковими потенціометрами 100кОм. Кожен потенціометр

підключено до операційного підсилювача з негативним зворотним зв'язком через резистор 470кОм у колі зворотного зв'язку. Рівняння підсилення для кожного діапазону частот наведено нижче. Значення рухомого потенціометра можна змінювати вручну і позначається змінною 'R'. Коефіцієнт підсилення =  $470\text{кОм} \cdot R$

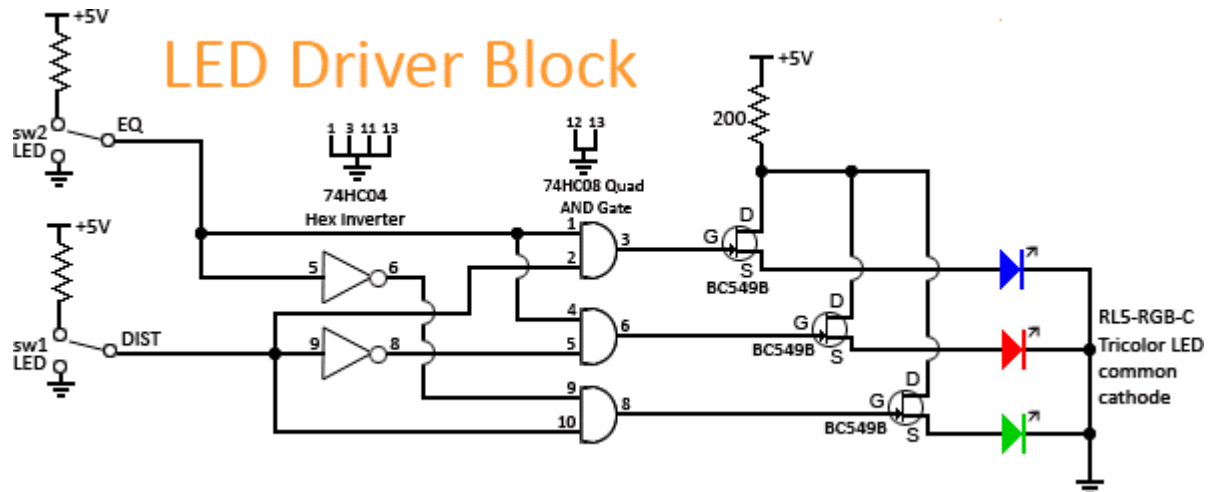
#### 4.1.6. Світлодіодний блок драйверів

Для світлодіодного блоку драйверів використовувалися логічні вентиля і триколірний світлодіод. Цей світлодіод має три анода і загальний катод. Коли на кожен анод подається достатня напруга, світлодіод загориться одним з трьох кольорів. Три кольори: червоний, синій і зелений. Зелений колір означає, коли використовується лише спотворення, червоний означає, коли використовується лише еквалайзер, а синій означає, коли використовуються обидві функції. Це показано в таблиці істинності нижче.

Таблиця 6: Таблиця істинності для LED-логіки

Входи		Виходи		
Спотворення	Еквалайзер	Синій	Червоний	Зелений
0	0	0	0	0
1	0	0	0	1
0	1	0	1	0
1	1	1	0	0

З цієї таблиці істинності була виведена схема, показана на схемі нижче.



Логічна схема світлодіода вимагала двох І-транзисторів і трьох інверторів; три транзистори були включені для забезпечення того, щоб виходи І-транзисторів не перевантажувалися і щоб на світлодіоди подавалася правильна напруга. Витоки цих транзисторів були підключені до 5 В через резистор 200 Ом, щоб обмежити струм до  $5 \text{ В} / (200 + 100) \text{ Ом} = 17 \text{ мА}$  (червоний анод світлодіода має прямий опір 100 Ом) Кожен відповідний анод світлодіода був підключений до джерела транзистора. Прямий опір синього і зеленого анодів становить 175  $\Omega$  замість 100  $\Omega$  для червоного анода, тому струм споживання низький і знаходиться в межах специфікації світлодіода, оскільки він становить  $5 \text{ В} / (200 + 175) = 13 \text{ мА}$ . Цього було достатньо, щоб вивести світлодіоди на видимий рівень.

#### 4.1.7. Перемикачі

Перемикачі 3PDT в нашій конструкції є виносними з'єднаннями. Наша педаль здатна перемикатися між режимами спотворень і еквайзера або мати можливість увімкнути обидві функції разом. Якщо жодна з функцій не використовується, педаль має істинний байпас. Для цього було використано два перемикачі 3PDT (triple pole double throw).

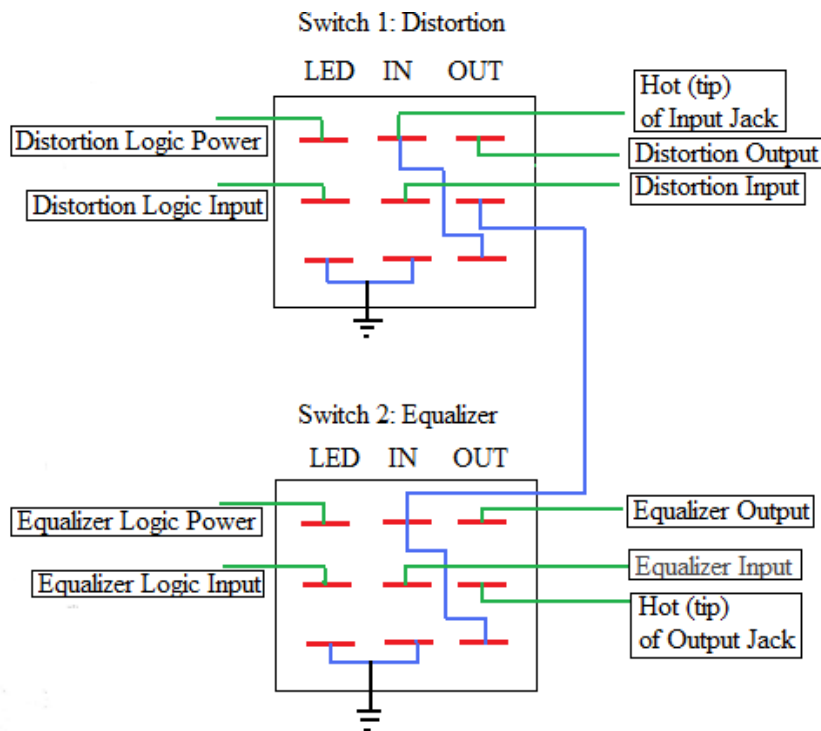


Рис. 4.2. Схема підключення перемикача.

Середній ряд кожного перемикача складається з полюсів. Верхнє і нижнє положення є перекидними. Перемикач може перебувати у двох положеннях: всі три полюси у верхньому положенні або всі три полюси у нижньому положенні, тобто перемикач є триполюсним подвійним перекидним (3PDT). Обидва перемикачі використовують умовне позначення «вгору», щоб вказати, що певний функціональний блок знаходиться в положенні «увімкнено», а умовне позначення «вниз», щоб вказати, що блок знаходиться в положенні «вимкнено» або «байпас».

Налаштування перемикачів спотворення і еквалайзера дуже схожі. Перший стовпчик відображає логіку світлодіодів, середній стовпчик - вхід кожного блоку, а останній - вихід кожного блоку. Коли всі три полюси знаходяться у верхньому положенні, функціональний блок увімкнено. В увімкненому положенні на логіку світлодіода подається високий логічний рівень (5 В), що вказує на те, що функціональний блок увімкнений, і світлодіод світиться відповідним кольором. У розімкнутому положенні входи і виходи також підключені до входів і виходів цього функціонального блоку. Коли перемикач знаходиться в закритому положенні (вниз), входи логіки світлодіода і функціонального блоку заземлені або від'єднані безпосередньо від ланцюга.

Вхідний сигнал подається безпосередньо на виходи, а верхній центральний вивід з'єднується з нижнім правим виводом. На вхід блоку дисторшн подається вихідний сигнал від електрогітари. Вихідний сигнал з підсилювача подається на вхід перемикача еквайзера у включеному положенні; на вхід еквайзера подається чистий гітарний сигнал з вимкненим підсилювачем і спотворений сигнал з підсилювача.

На виході підсилювача - чистий гітарний сигнал з вимкненим дисторшеном і еквайзером, спотворений сигнал з вимкненим еквайзером і згладжений сигнал з вимкненим дисторшеном. Якщо дисторшн або еквайзер вимкнено, його входи заземлені.

Вхідні та вихідні роз'єми - це позапанельні з'єднання, подібні до перемикачів. Схему вхідних і вихідних роз'ємів показано на рис.4.3. Вхідний роз'єм - це 1/4-дюймовий стереороз'єм для гітари, що складається з трьох клем. Гніздова клема підключена до заземлення, кільцева - до заземлення акумулятора, а кінцева - до виходу гітарного сигналу. Обидва кінці гітарного кабелю мають моно штекери, і коли моно кабель підключається до стерео роз'єму, гніздо і кільцевий з'єднання замикаються. Оскільки гільза кабелю з'єднує гільзу і кільцеві клеми роз'єму разом, ця функція підключає батарею до ланцюга тільки тоді, коли гітарний кабель підключений до входу педалборда. Якщо кабель не підключений, батарея не підключена і, відповідно, не розряджається, коли педаль не використовується. Вихідний роз'єм схожий на вхідний, але має дві клеми, які підключаються тільки до вихідного сигналу і заземлення. Штекер гітарного кабелю - це моно штекер. Зображення моно штекера з вхідним і вихідним роз'ємами показано нижче.



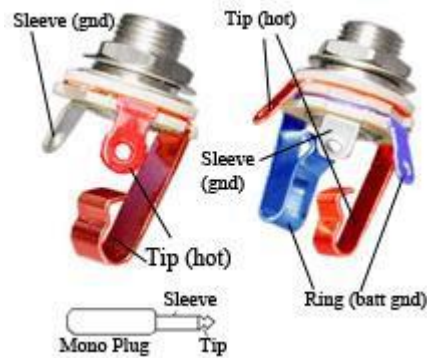


Рис. 4.3. Вхідний роз'єм (праворуч) і вихідний роз'єм (ліворуч)

Вхідні та вихідні роз'єми - це позапанельні з'єднання, подібні до перемикачів. Схему вхідних і вихідних роз'ємів показано на рис. 4.3. Вхідний роз'єм - це 1/4-дюймовий стереороз'єм для гітари, що складається з трьох клем. Гніздова клема підключена до заземлення, кільцева - до заземлення акумулятора, а кінцева - до виходу гітарного сигналу. Обидва кінці гітарного кабелю мають моно штекери, і коли моно кабель підключається до стерео роз'єму, гніздо і кільцевий з'єднання замикаються. Оскільки гільза кабелю з'єднує гільзу і кільцеві клеми роз'єму разом, ця функція підключає батарею до ланцюга тільки тоді, коли гітарний кабель підключений до входу педалборда. Якщо кабель не підключений, батарея не підключена і, відповідно, не розряджається, коли педаль не використовується. Вихідний роз'єм схожий на вхідний, але має дві клеми, які підключаються тільки до вихідного сигналу і заземлення. Штекер гітарного кабелю - це моно штекер. Зображення моно штекера з вхідним і вихідним роз'ємами показано нижче.

## 4.2. Виготовлення та тестування

Остаточний дизайн друкованої плати був створений за допомогою JLCPCB, компанії-виробника друкованих плат, яка надає власне програмне забезпечення для друкованих плат; після отримання друкованої плати всі компоненти схеми були спаяні між собою. Задня частина друкованої плати, де вона була прикручена до дна коробки, показана на рисунку 4.4. Резистори, конденсатори та інтегральні схеми знаходяться з цього боку. Потенціометр підлаштування також знаходиться знизу, тому користувачеві потрібно лише відкрутити декілька гвинтів, щоб відкрити коробку, і йому не потрібно знімати плату, щоб отримати доступ до неї, коли він захоче налаштувати її для налаштування звуку.



Рис. 4.4. Вигляд друкованої плати знизу з припаяними деталями.

Після отримання друкованої плати було швидко виявлено кілька конструктивних недоліків. По-перше, отвори для повзункових потенціометрів в ланцюзі еквайзера були розташовані неправильно. Крім того, отвори на друкованій платі не мали достатнього діаметру для встановлення потенціометрів. Щоб вирішити цю проблему, в отвори були впаяні зміщені штифти, які можна було трохи зігнути, щоб компенсувати проблему з вимірюванням. Після того, як усі деталі було припаяно до друкованої плати, вихідний роз'єм підсилювача було підключено безпосередньо до виходу ланцюга спотворення для перевірки блоку спотворення схеми. Спочатку потенціометр тону мав проблеми після того, як його кілька разів перепаювали, тому його було замінено. Схема спотворення звучала краще, ніж при

тестуванні на макетній платі. Це сталося тому, що плата мала меншу ємність, ніж макетна плата; вхідний роз'єм блоку еквалайзера був припаяний безпосередньо до входу схеми еквалайзера, а вихідний роз'єм - до виходу схеми еквалайзера, і ця конфігурація була протестована з сигналом електрогітари. Результати показали, що вихідний сигнал не надходив з блоку еквалайзера на підсилювач. Для налагодження схеми спочатку було перевірено паяні з'єднання роз'ємів. Потім дизайн друкованої плати був ще раз перевірений, щоб переконатися, що всі доріжки розміщені правильно; після того, як дизайн друкованої плати і роз'ємів був підтверджений, було перевірено потенціометр повзунка. Перевірка специфікацій потенціометрів показала, що потенціометри були підключені в неправильному порядку - 10 з 12 повзункових потенціометрів в ланцюзі еквалайзера вимагали перехрещення контактів двох рядів потенціометрів. Щоб вирішити цю проблему, рухомі потенціометри блоку еквалайзера були припаяні до плати перфоратора, дроти перехрестили знизу і припаяли зі зміщенням.

У фінальній конструкції зміщені штирі були випаяні і дроти припаяні безпосередньо до отворів друкованої плати. Це було пов'язано з тим, що дроти під ним згиналися під кутами, щоб підійти до зміщених отворів, що чинило тиск на паяні з'єднання та самі дроти, що призводило до розриву деяких проводів і ускладнювало налагодження, якщо щось піде не так. Видалення зміщених штифтів призвело до поломки колодок на друкованій платі, які потребували ремонту. У процесі було доопрацювання деяких слабких паяних з'єднань і виявлено поляризований конденсатор, який роздувався. Також був замінений конденсатор, який був впаяний у зворотному порядку.

Вид зверху нашої друкованої плати перед проводкою перемикача та обхідною схемою показаний на Рис.4.5, показуючи всю підключену та зміщену від друкованої плати продуктивності. Він також показує потенціометри посилення, тону та гучності, які є позабортними з'єднаннями.

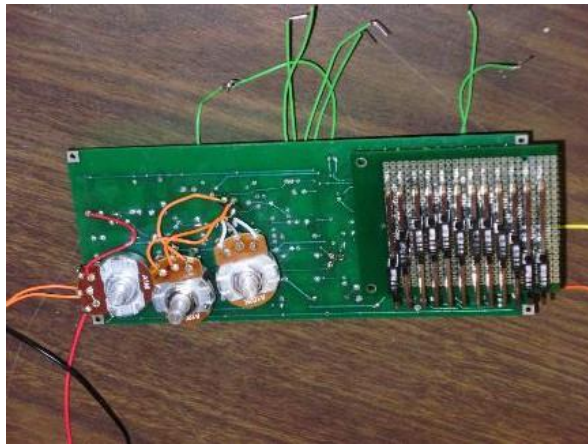


Рис.4.5. Вид зверху кінцевої друкованої плати перед підключенням перемикача.

На Рис.4.6. показаний вид знизу нашої кінцевої друкованої плати перед підключенням вимикача. Зелені дроти будуть підключенням до вимикачів. Дроти, що відходять від лівої та правої сторін друкованої плати, призначені для вхідного та вихідного роз'ємів, які також є автономними з'єднаннями.

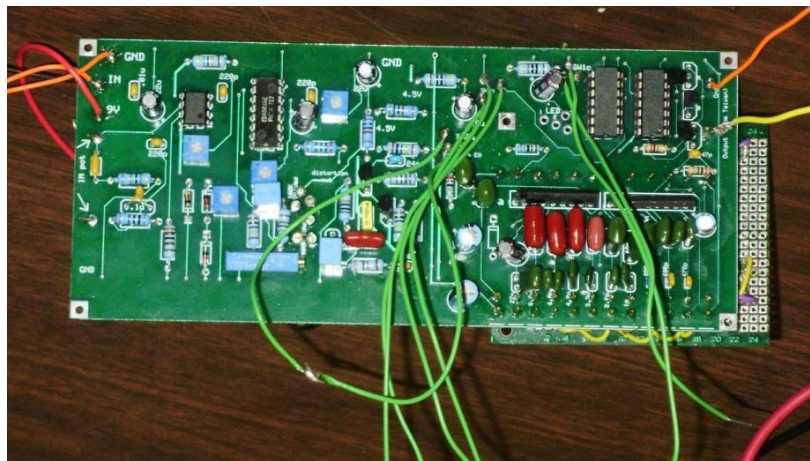


Рис.4.6. Вид знизу кінцевої друкованої плати перед підключенням вимикача.

Коли потенціометри на повзунку знаходяться в правильному положенні, вихідний сигнал отримується з блоку еквайзера, але якщо один з потенціометрів зміщується за певну точку, чути гучний писк. Цей писк, ймовірно, спричинений забрудненим потенціометром або поганим

з'єднанням на платі або друкованій платі. Тестування світлодіодного ланцюга за допомогою одного з перемикачів показало, що ланцюг працює, але світлодіоди дуже тьмяні.

Наступним логічним кроком для перевірки було подати напругу, коли світлодіоди повинні світитися: Опорна напруга 4,5 В була встановлена простим дільником напруги з двома резисторами, з'єднаними послідовно, і не повинна була живити або навантажувати ланцюг світлодіодів. Опорна напруга 4,5 В. Проблему було вирішено шляхом обрізання дротів, що з'єднували тестові точки з драйвером світлодіодів і світлодіодним ланцюгом, і заміни їх лінійним стабілізатором на 5 В. Світлодіоди стали яскравішими, оскільки LDO подавав правильну напругу на ланцюг світлодіода і знімав навантаження з тестової точки. Використаний LDO був здатний подавати до 150 мА, набагато більше струму, ніж вимагав світлодіодний блок; опорна напруга 4,5 В використовувалася для зсуву сигналу в центрі шини 0-9 В операційного підсилювача блоку спотворень.

Коли перемикач було підключено до електромережі і повторно протестовано блоки спотворень і еквалайзера, було виявлено, що схема має специфічний фазовий шум з коливальними частотами. Було зроблено висновок, що цей додатковий шум був спричинений тим, що проводка в вимикачі та інші зовнішні з'єднання працювали як антена, приймаючи електромагнітні поля від інших сусідніх електронних пристроїв та освітлення в приміщенні. Цю проблему було вирішено шляхом розміщення ланцюга в педальній коробці або металевому корпусі для блокування перешкод. Також у цей момент перестав працювати належним чином блок дисторшн. При увімкненні частина сигналу проходила через підсилювач, тому спотворення все ще було чутно, але здавалося, що десь у блоці спотворення було переривчасте з'єднання. Простеживши шлях сигналу за допомогою мультиметра і перемістивши вихідні роз'єми в різні місця підсилювача, стало зрозуміло, що проблема полягала в зламаному потенціометрі, що регулює гучність.

Потенціометри, що використовуються в регуляторах посилення, гучності і тембру підсилювача, виявилися більш чутливими до температури, ніж очікувалося. Потенціометри механічно дуже стабільні, але цю механічну стабільність переплутали з термостійкістю, і потенціометри для різних застосувань були перепаяні під час проектування без жодного попередження про те, скільки разів вони були перепаяні. Виводи потенціометра і матеріал, що з'єднує їх з внутрішньою частиною потенціометра, дуже чутливі до температури і можуть витримати лише кілька впливів високих температур, необхідних для пайки або паяння. Потенціометр було замінено, і ланцюг спотворення продовжив функціонувати, як і раніше. Оздоблення Алюмінієва коробка, обрана для розміщення друкованої плати, має розміри 7,5 «x4,3 “x2,4” Сама друкована плата має розміри 7 “x3 ”x1 1/2» разом з перемикачами, роз'ємами та потенціометрами. Додатковий простір був потрібен з боків і знизу для встановлення перемикачів, роз'ємів і потенціометрів. Всі місця на коробці, які потребували свердління, були виміряні та розмічені. Найскладнішим виявилось свердління отворів для 12 рухомих потенціометрів у блоці еквалайзера. Перш ніж просвердлити отвори, їх доводилося багато разів вимірювати, і врешті-решт довелося розширити ще на 1,5 дюйма. Потім у верхній частині були просвердлені отвори для потенціометрів гучності, підсилення, тембру, світлодіодів і педалей. Кінцевий результат показано на

Рис.4.7, де світлодіод світиться синім кольором, вказуючи на те, що використовуються функції спотворення і еквалайзера.

Рис.4.7. Кінцева педаль у футлярі

Найзручнішим способом розміщення гнізд виявилось розміщення двох гнізд, що виступають із задньої частини коробки, оскільки з боків коробки не вистачало місця. Перший отвір, просвердлений для гнізд, був занадто високим, оскільки не враховував висоту потенціометрів під ручками посилення, тембру і гучності. Щоб виправити це, отвори було просвердлено трохи нижче початкових. На Рис. 4.8, показано вхідні і вихідні роз'єми на задній панелі коробки. Тут тільки вхідний роз'єм підключений до кабелю від гітари для відображення світлодіодного індикатора роботи. Це пов'язано з тим, що вхідний кабель повинен бути підключений до педалі, щоб під'єднати батарею для живлення педалі. На рис.4.8 показана педаль з таким же положенням перемикача, але без



підключеного вхідного гнізда і без індикатора. Це пояснюється тим, що коли до вхідного гнізда не підключено кабель, батарея деактивується для економії енергії.



Рис.4.8. Вхідний і вихідний роз'єми встановлені на коробці, світлодіод горить зеленим кольором, що вказує на те, що блок спотворень включений і блок еквалайзера знаходиться в обході.



## ВИСНОВКИ

В результаті цих досліджень була розроблена і створена універсальна аналогова педаль ефектів для електрогітари, що поєднує в собі функції високоякісного дисторшн і багатосмугового еквайзера. В ході досліджень були проаналізовані існуючі технічні рішення і виявлені основні недоліки сучасних комерційних педалей, такі як відсутність справжнього байпаса, обмежений функціонал еквайзера, високий рівень шуму і висока вартість. На основі цього були визначені ключові вимоги до нового пристрою, такі як здатність забезпечувати чистий сигнал в режимі байпасу, якісне жорстке відсікання характерних звуків і можливість гнучкого налаштування частотного спектру за допомогою 10-смугового еквайзера. Теоретичний аналіз принципів нелінійних спотворень і викривлень допоміг визначити найкращий спосіб досягнення ефекту за допомогою операційних підсилювачів і діодів, які забезпечать необхідне гармонійно багате звучання. Також були вивчені принципи роботи смугових фільтрів для створення багатосмугового еквайзера, важливого для тонкої настройки тембру. Схемотехнічне проектування та моделювання здійснювалося в LTspice і Multisim, що дозволило детально проаналізувати амплітудно-частотну характеристику пристрою та оптимізувати його роботу. До складу пристрою увійшли блок спотворень на основі операційного підсилювача з несиметричним діодним відсіканням, 10-смуговий еквайзер для корекції частотного спектру та система істинного шунтування, що забезпечує чистоту сигналу при вимкненні. Для практичного використання пристрою був зібраний прототип, який був протестований на друкованій платі. Результати тестування показали високу якість спотворень завдяки гнучкому регулюванню підсилення, ефективну роботу 10-смугового еквайзера без додавання шумів та повне збереження чистоти гітарного сигналу завдяки застосуванню справжнього обходу Boss Metal Zone, Electro Harmonix Metal Muff та MXR 10 Band EQ, продемонструвавши, що розроблений пристрій

має значні переваги з точки зору функціональності, якості звуку та можливості тонкого налаштування тембру. Таким чином, була досягнута основна мета дослідження: створення універсальної аналогової педалі ефектів з функціями дисторшн і багатосмугового еквайзера. Розроблена педаль є ефективним і конкурентоспроможним рішенням, що забезпечує музикантам необхідний рівень регулювання гучності в таких жанрах, як хард-рок, панк і хеві-метал. Подальші дослідження можуть бути зосереджені на інтеграції цифрових елементів для збільшення функціональності пристрою та оптимізації конструкції для зменшення енергоспоживання та вартості.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- **Horowitz P., Hill W.** *The Art of Electronics*. – Cambridge University Press, 2015. – 1220 p.
- **Zölzer U.** *DAFX: Digital Audio Effects*. – Wiley, 2011. – 624 p.
- **Ballou G.** *Handbook for Sound Engineers*. – Focal Press, 2015. – 1784 p.
- **Roberge J.** *Operational Amplifiers: Theory and Practice*. – Wiley, 1975. – 430 p.
- **Lancaster D.** *Active Filter Cookbook*. – Newnes, 2006. – 250 p.
- **Sedra A. S., Smith K. C.** *Microelectronic Circuits*. – Oxford University Press, 2019. – 1368 p.
- **Self D.** *Small Signal Audio Design*. – Focal Press, 2020. – 784 p.
- **Jung W.** *Op Amp Applications Handbook*. – Analog Devices, Newnes, 2005. – 896 p.
- **Darrin J.** *Analog Audio Electronics*. – Focal Press, 2021. – 350 p.
- **Williams T.** *Analog Filter Design*. – Elsevier, 1995. – 313 p.
- **Boscarino P.** *Designing Analog Chips for Audio*. – Self-published, 2019. – 410 p.
- **Cordell B.** *Designing Audio Power Amplifiers*. – McGraw-Hill Education, 2010. – 609 p.
- **Meyer S., Meyer R.** *Practical Audio Amplifier Design*. – Newnes, 2017. – 290 p.
- **Zumbahlen H.** *Linear Circuit Design Handbook*. – Analog Devices Inc., Newnes, 2008. – 960 p.
- **Winder S.** *Analog and Digital Filter Design*. – Newnes, 2002. – 450 p.
- **Tobey R., Graeme J., Huelsman L.** *Operational Amplifiers: Design and Applications*. – McGraw-Hill, 1995. – 368 p.
- **O'Sullivan T., Keane B.** *Analog Electronics for Audio Applications*. – CRC Press, 2018. – 328 p.
- **Audio Circuits by Linear Technology** – [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.analog.com>

- **Texas Instruments Application Notes for Audio Amplifiers** – [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.ti.com>
- **National Semiconductor Audio Handbook** – [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.ti.com/lit>
- **Baxandall P. J.** *Audio Power Amplifier Design*. – Newnes, 2001. – 325 p.
- **Douglas Self** *Audio Power Amplifier Design Handbook*. – Elsevier, 2013. – 608 p.
- **Bishop O.** *Electronics: Circuits and Systems*. – Routledge, 2011. – 250 p.
- **Terman F. E.** *Electronic and Radio Engineering*. – McGraw-Hill, 1955. – 1012 p.
- **Haigh D. G.** *Practical Analog Electronics for Technicians*. – Newnes, 2006. – 270 p.
- **Leach W. M.** *Introduction to Electroacoustics and Audio Amplifier Design*. – Kendall Hunt Publishing, 2017. – 400 p.
- **Frindle G.** *Designing Audio Signal Chains*. – Routledge, 2018. – 350 p.
- **Ott H. W.** *Noise Reduction Techniques in Electronic Systems*. – Wiley, 2009. – 464 p.
- **Collins N.** *Introduction to Analog Audio Effects Circuits*. – Self-published, 2019. – 320 p.
- **Schwarz A.** *The Complete Audio Amplifier Design Manual*. – McGraw-Hill Education, 2017. – 270 p.
- **Eargle J.** *Handbook of Recording Engineering*. – Springer, 2003. – 440 p.
- **Fisher J.** *Electronic Filters for Audio Applications*. – Newnes, 2007. – 276 p.
- **Beckwith R.** *Analog Circuit Design: Art, Science and Personalities*. – Springer, 2019. – 425 p.
- **Rowland C.** *Build Your Own Audio Valve Amplifiers*. – Routledge, 2018. – 300 p.
- **Dimitriou D.** *Analog Electronics in Music Signal Processing*. – CRC Press, 2016. – 290 p.

- **Hurst S.** *Designing Active Crossovers for Audio Applications*. – Newnes, 2012. – 352 p.
- **Altmann J.** *Practical Audio Electronics: Analog Effects Circuits*. – Focal Press, 2015. – 240 p.
- **Schultz M.** *DIY Audio Projects: Building Analog Sound Circuits*. – McGraw-Hill, 2021. – 278 p.
- **Gray P. R., Meyer R. G.** *Analysis and Design of Analog Integrated Circuits*. – Wiley, 2009. – 896 p.
- **Dunlap D.** *Analog Circuit Techniques for Audio Processing*. – Newnes, 2018. – 245 p.
- **Horlacher J.** *Understanding Audio Circuits: Components and Applications*. – Routledge, 2020. – 310 p.
- **Farnell S.** *Guitar Amplifier Electronics: Analog Design Fundamentals*. – Self-published, 2016. – 370 p.
- **Bastian M.** *Analog Music Effects with Operational Amplifiers*. – Newnes, 2017. – 284 p.
- **Stark H.** *Guitar Pedals: Designing Analog Effects Circuits*. – Focal Press, 2019. – 200 p.
- **Graeme J. G.** *Applications of Operational Amplifiers: Third-Generation Techniques*. – McGraw-Hill, 2013. – 350 p.
- **Weir C.** *Power Supplies for Audio Circuits*. – Newnes, 2011. – 320 p.
- **Brown J.** *Analog Signal Processing for Musicians and Engineers*. – Springer, 2015. – 390 p.
- **Moog R.** *Fundamentals of Analog Music Synthesis*. – Springer, 2016. – 280 p.
- **Linsley Hood J.** *Valve and Transistor Audio Amplifiers*. – Newnes, 1997. – 300 p.
- **Benson C.** *Analog Filter Design for Audio Engineers*. – Wiley, 2018. – 278 p.

## ДОДАТКИ

## Додаток А

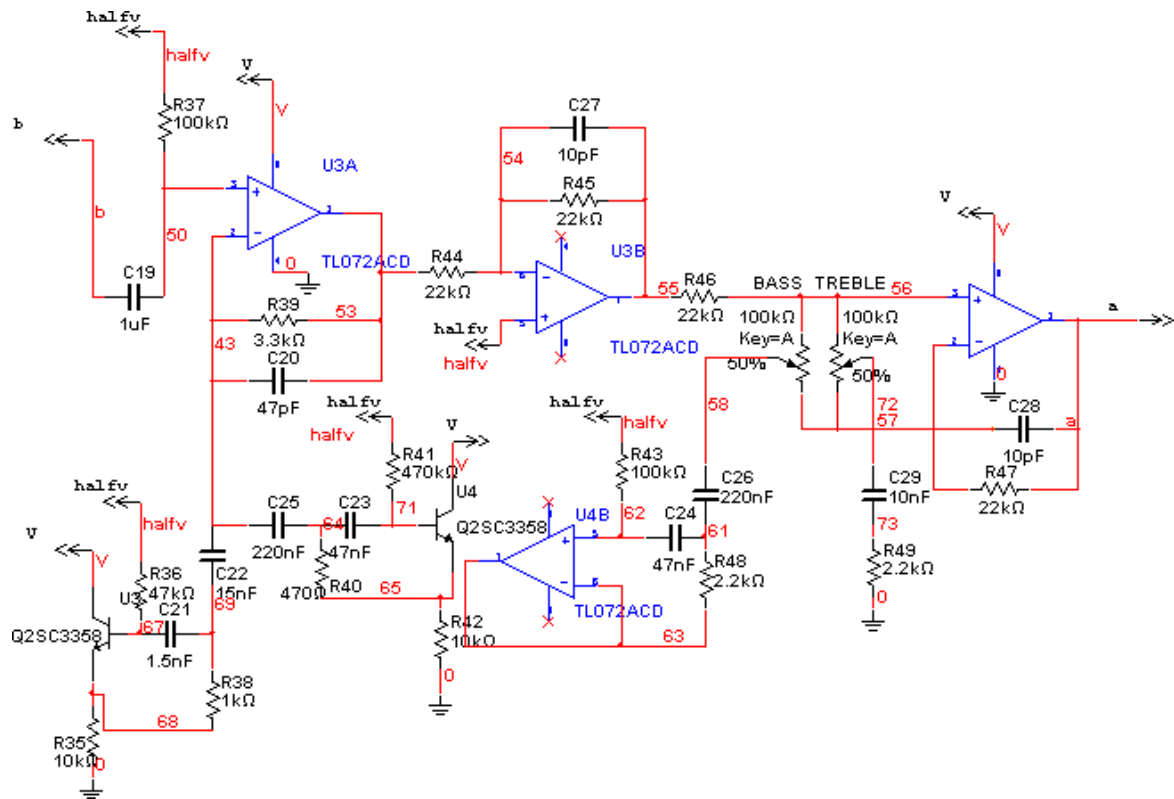


Рис.5.1. Схема Boss Metal Zone - Частина 1

## Продовження Додатку А

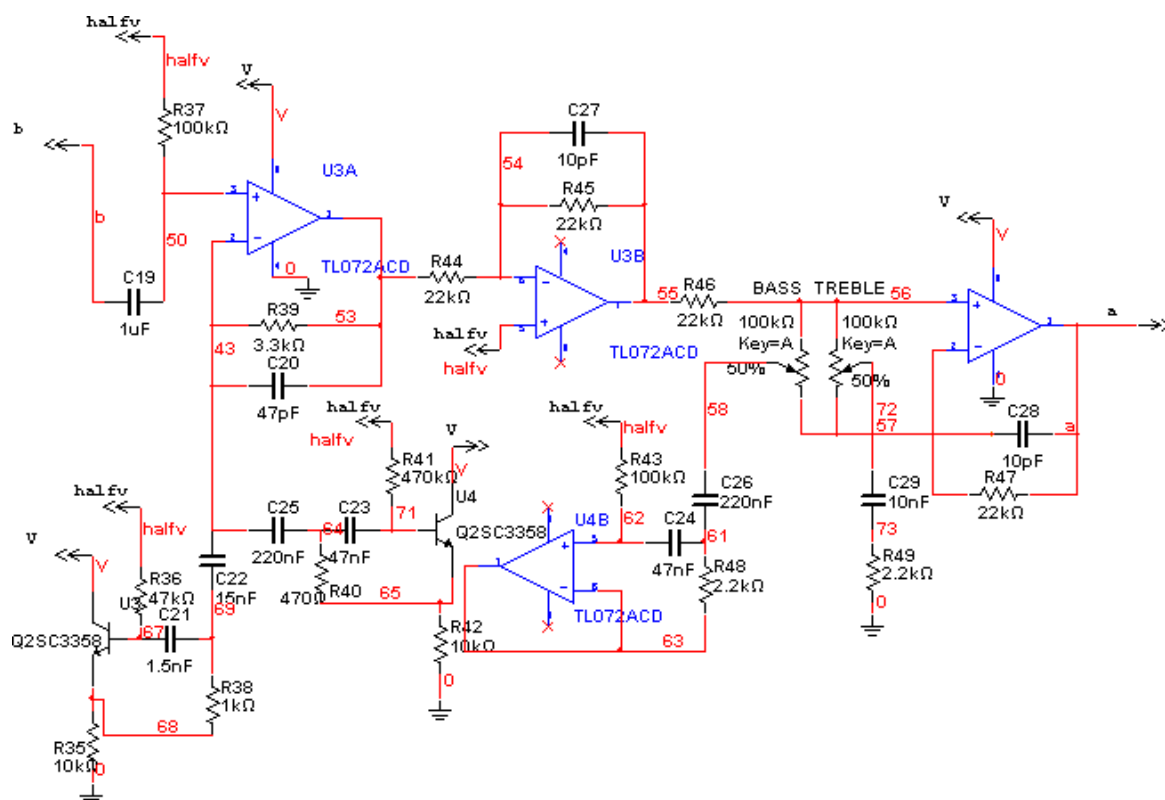


Рис.5.1.1: Схема Boss Metal Zone - Частина 2

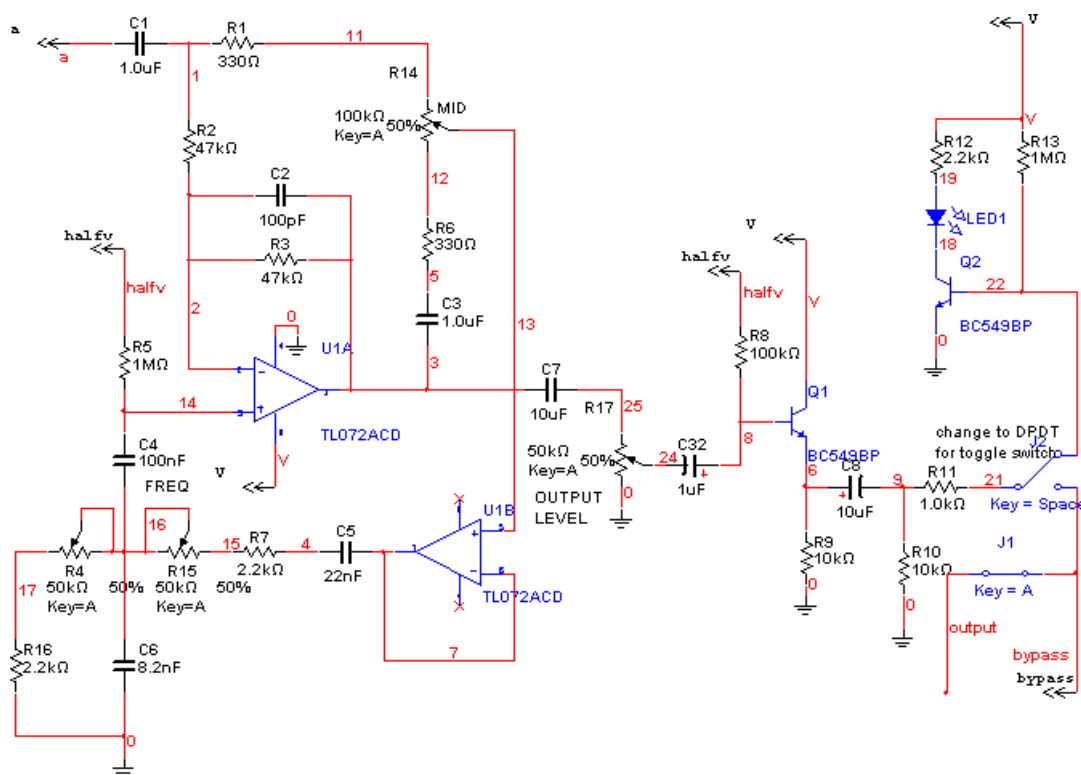


Рис.5.1.2: Схема Boss Metal Zone - Частина 3

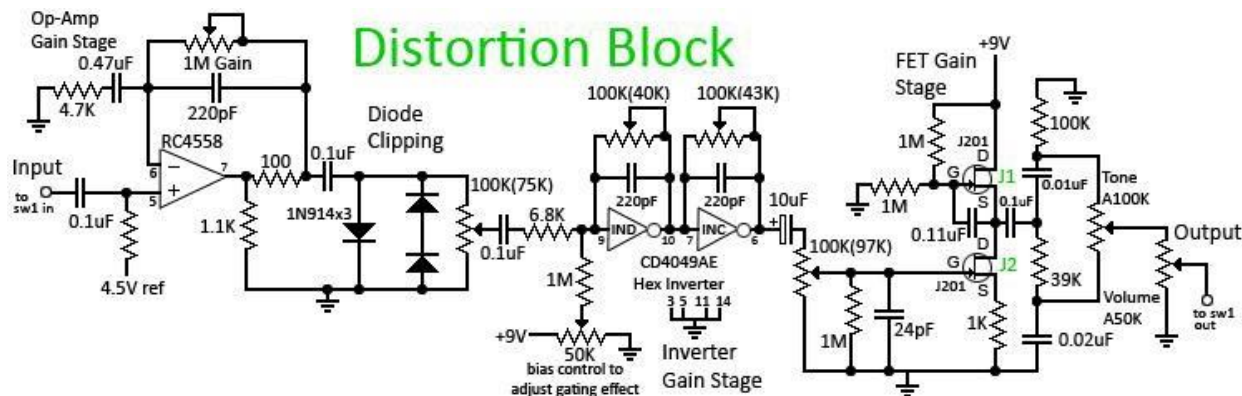


Рис. 5.2: Електрична схема блоку дісторшн(спотворення) яка розроблялася в цій роботі

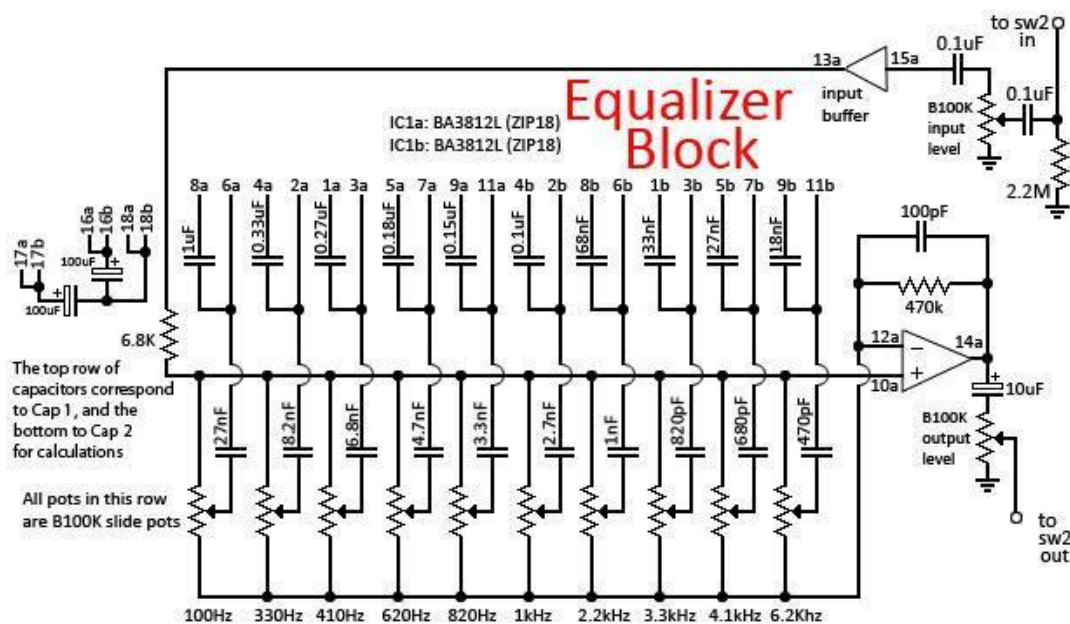


Рис.5.2.1: схема 10-ти смугового еквайзера.



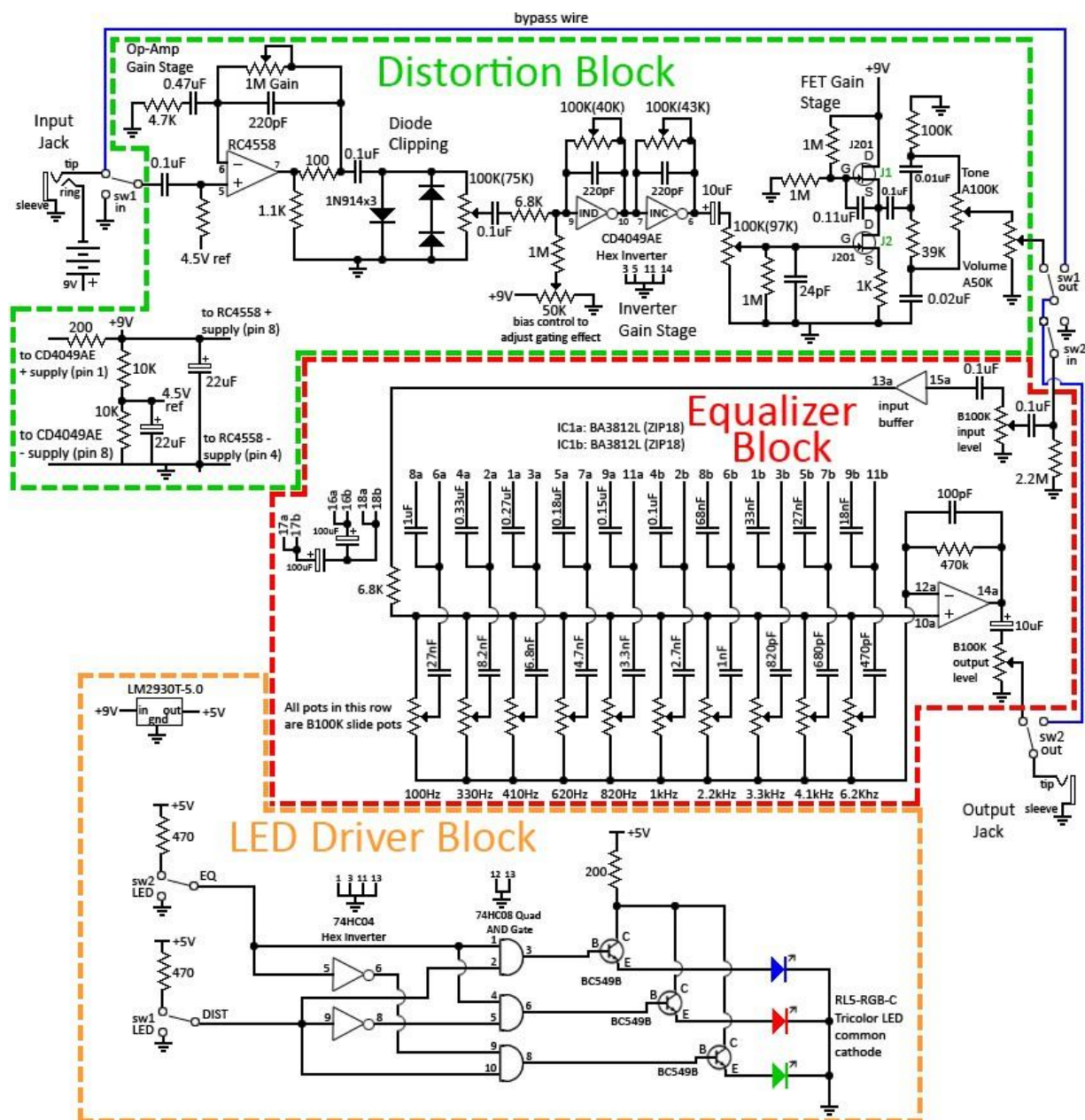


Рис. 5.3: Повна схема педалі.