

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Радіотехнічний факультет
Кафедра прикладної радіоелектроніки**

До захисту допущено:

Зав. кафедри

_____ Андрій МОВЧАНЮК

« ____ » _____ 20__ р.

**Дипломний проєкт
на здобуття ступеня бакалавра
за освітньою програмою «Інтелектуальні технології радіоелектронної
техніки»,
за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка»
на тему**

«_____ Багатоканальний підсилювач низької частоти з цифровою
_____ обробкою сигналу _____»

Виконав (-ла):

студент (-ка) IV курсу, групи РЕ-21

_____ Сугоняко Іван Володимирович

прізвище, ім'я, по батькові

(підпис)

Керівник: Асистент Стешенко В. Д.

посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ім'я, по батькові

(підпис)

Рецензент:

_____ посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ім'я, по батькові

(підпис)

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

Студент (-ка) _____

Київ – 2026 року

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Радіотехнічний факультет
Кафедра прикладної радіоелектроніки**

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)
Спеціальність 172 «Телекомунікації та радіотехніка»
Освітня програма «Інтелектуальні технології радіоелектронної техніки»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри

Андрій

МОВЧАНЮК

(підпис)

« ____ » _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проєкт студента

Сугоняко Іван Володимирович

1. Тема проєкту «Багатоканальний підсилювач низької частоти з цифровою обробкою сигналу»
керівник проєкту Асистент Стешенко В. Д.
посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ім'я, по батькові
затверджені наказом по університету від 14 квітня 2026 р. № _____
2. Строк подання студентом проєкту 15 червня 2026 року
3. Вихідні дані до проєкту: Технічні вимоги до пристрою.
4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які розробляються)
Розділ 1. Загальні відомості про високоякісні аудіосистеми
Розділ 2. Формування концепції пристрою
Розділ 3. Розробка підсилювальної частини
Розділ 4. Розробка цифрової частини
Розділ 5. Розробка системи живлення пристрою
Розділ 5. Розробка корпусу пристрою
5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо):
структурна схема пристрою; електрична принципова схема підсилювача;
електрична принципова схема блока живлення; друкована плата підсилювача;
друкована плата блока живлення; презентація до захисту.

6. Консультанти проєкту, з вказівкою розділів, що до них відносяться

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Нормоконтроль			

1 . Дата видачі завдання 14 квітня 2026 року

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту	Терміни виконання етапів проєкту	Примітки
1	<i>Затвердження теми проєкту</i>	<i>14.04.2026–18.04.2026</i>	
2	<i>Вивчення та аналіз завдання</i>	<i>19.04.2026–25.05.2026</i>	
3	<i>Аналіз існуючих рішень і технологій</i>	<i>26.04.2026–01.05.2026</i>	
4	<i>Розробка концепції та структури пристрою</i>	<i>02.05.2026–14.05.2026</i>	
5	<i>Розробка основних систем пристрою</i>	<i>15.05.2026–03.06.2026</i>	
6	<i>Розробка корпусу та компонування</i>	<i>04.06.2026–05.06.2026</i>	
7	<i>Оформлення пояснювальної записки та графічних матеріалів</i>	<i>06.06.2026–08.06.2026</i>	
8	<i>Передзахист</i>	<i>09.06.2026</i>	
9	<i>Захист</i>	<i>17.06.2026</i>	

Студент-дипломник _____ (підпис) Сугоняко І. В. _____ (підпис)

Керівник проєкту _____ (підпис) Стешенко В. Д. _____ (підпис)

АНОТАЦІЯ

У дипломному проєкті представлено розробку багатоканального підсилювача низької частоти з вбудованою DSP-обробкою сигналу. Пристрій призначений для роботи у звичайному стереорежимі, а також у дво- та трисмугових акустичних системах з окремим підсиленням частотних смуг.

У роботі розглянуто принципи цифрового розділення аудіосигналу та використання FIR-фільтрів для отримання лінійнофазної характеристики. DSP-тракт реалізовано на основі ADAU1452 та AD1938, а підсилювальну частину — на TDA7293 з вихідною потужністю близько 50 Вт на канал.

Розроблено структурну схему, електричні принципові схеми, друковані плати підсилювача і блока живлення, систему керування на ESP32-WROOM-32 та корпус пристрою. Передбачено автономне керування через OLED-дисплей, енкодер і кнопки.

Ключові слова: багатоканальний підсилювач, DSP, ADAU1452, AD1938, TDA7293, FIR-фільтр, цифровий кросовер, ESP32.

ANNOTATION

The diploma project presents the development of a multichannel low-frequency audio amplifier with built-in DSP signal processing. The device is intended for operation in a standard stereo mode, as well as in two-way and three-way acoustic systems with separate amplification of individual frequency bands.

The paper considers the principles of digital audio signal separation and the use of FIR filters to obtain a linear-phase response. The DSP section is based on the ADAU1452 processor and the AD1938 audio codec, while the power amplifier section is implemented using TDA7293 integrated amplifiers with an output power of approximately 50 W per channel.

The project includes the development of the structural diagram, electrical schematic diagrams, printed circuit boards for the amplifier and power supply, an ESP32-WROOM-32-based control system, and the device enclosure. Autonomous control is provided through an OLED display, rotary encoder, and push buttons.

Keywords: multichannel amplifier, DSP, ADAU1452, AD1938, TDA7293, FIR filter, digital crossover, ESP32.

ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЄКТУ

№ з/п	Формат	Позначення	Найменування	Кількість листів	Примітка
1	A4	PE21.468731.001 ПЗ	Пояснювальна записка	55	
2	A3	PE21.468731.001 Е1	Структурна схема пристрою	1	
3	A3	PE21.468731.002 ЕЗ	Модуль підсилювача потужності. Схема електрична принципова	1	
4	A4	PE21.468731.002 ПЕЗ	Модуль підсилювача потужності. Перелік елементів	1	
5	A3	PE21.468731.003	Модуль підсилювача потужності. Друкована плата	1	
6	A3	PE21.468731.004 ЕЗ	Силовий блок живлення. Схема електрична принципова	1	
7	A4	PE21.468731.004 ПЕЗ	Силовий блок живлення. Перелік елементів	1	
8	A3	PE21.468731.005	Силовий блок живлення. Друкована плата	1	

					PE21.468731.001					
ЗМ.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата						
Розробив	Сугоняко І.В.				Багатоканальний підсилювач низької частоти з цифровою обробкою сигналу			Лім.	Лист	Листів
Перевірів	Стешенко В. Д								1	
								PE-21, РТФ		
Н. Контр.										
Затвердив										

Пояснювальна записка
до дипломного проєкту
на тему: «Багатоканальний підсилювач низької частоти
з цифровою обробкою сигналу»

Київ — 2026 року

ЗМІСТ

Перелік скорочень.....	3
Вступ.....	4
1 Загальні відомості про високоякісні аудіосистеми	5
1.1 Параметри, що визначають якість відтворення звуку.....	5
1.2 Переваги багатосмугових акустичних систем	8
1.3 Способи розділення аудіосигналу на частотні смуги	9
1.4 Особливості цифрової фільтрації аудіосигналу	12
1.5 Цифрові фільтри та досягнення лінійнофазної характеристики....	14
1.5.1 IIR-фільтри.....	14
1.5.2 FIR-фільтри.....	15
2 Формування концепції пристрою.....	16
2.1 Аналіз існуючих рішень	16
2.2 Технічні вимоги до пристрою.....	18
2.3 Структура пристрою	19
3 Розробка підсилювальної частини	21
3.1 Обґрунтування вибраної архітектури підсилення	21
3.2 Електрична принципова схема підсилювача	24
3.3 Вибір елементної бази підсилювача	26
3.4 Друкована плата підсилювача	28
4 Розробка цифрової частини	32
4.1 Вибір архітектури DSP	32
4.2 Розробка алгоритмів обробки сигналу	34

					РЕ21.468731.001 ПЗ			
ЗМ.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата	Багатоканальний підсилювач низької частоти з цифровою обробкою сигналу	Лім.	Лист	Листів
Розробив	Сугоняко І.В.						1	
Перевірів								
Н. Контр.						РЕ-21, РТФ		
Затвердив								

4.3 Система керування підсилювачем	38
5 Розробка системи живлення пристрою.....	41
5.1 Аргументація схемотехнічних рішень.....	41
5.2 Електрична принципова схема силового блока живлення	44
5.3 Друкована плата силового блока живлення.....	46
6 Розробка корпусу пристрою	47
Висновки	50
Список використаних джерел.....	51
Додатки	56

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

АС — акустична система

DSP — Digital Signal Processing, цифрова обробка сигналу

FIR — Finite Impulse Response, фільтр зі скінченною імпульсною характеристикою

IIR — Infinite Impulse Response, фільтр з нескінченною імпульсною характеристикою

DAC — Digital-to-Analog Converter, цифро-аналоговий перетворювач

ADC — Analog-to-Digital Converter, аналого-цифровий перетворювач

НЧ — низькочастотний канал

СЧ — середньочастотний канал

ВЧ — високочастотний канал

АЧХ — амплітудно-частотна характеристика

ККД — коефіцієнт корисної дії

DMOS — Double-Diffused Metal-Oxide-Semiconductor

					РЕ21.468731.001 ПЗ	Лис
						3
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

ВСТУП

Сучасні аудіосистеми дедалі частіше будуються за активним принципом, коли частотне розділення сигналу виконується до підсилювачів потужності, а кожна смуга акустичної системи має окремий канал підсилення. Такий підхід дозволяє точніше узгоджувати роботу НЧ-, СЧ- та ВЧ-динаміків, зменшувати вплив пасивних елементів кросовера та підвищувати гнучкість налаштування акустичної системи.

Найбільш ефективним способом реалізації активного розділення є використання цифрової обробки сигналу. DSP-процесор дозволяє виконувати фільтрацію, маршрутизацію каналів, регулювання рівнів, введення часових затримок та корекцію характеристик без зміни апаратної частини пристрою. На відміну від аналогових кросоверів, параметри цифрової системи задаються програмно, що спрощує адаптацію під різні конфігурації акустичних систем.

Окремою перевагою DSP-обробки є можливість застосування FIR-фільтрів з лінійною фазочастотною характеристикою. Для багатосмугової акустичної системи це має принципове значення, оскільки в зоні частотного розділення одночасно працюють сусідні динаміки. Тому важливо забезпечити не лише правильний розподіл сигналу за частотами, а й часове узгодження між сформованими смугами.

Незважаючи на поширення DSP-технологій, на практиці такі рішення реалізуються як окремі зовнішні процесори без підсилювачів потужності або як вбудовані модулі для активних акустичних систем. У першому випадку користувач повинен додатково використовувати підсилювач, у другому — пристрій прив'язується до конкретної конструкції акустичної системи. Тому актуальною є розробка універсального зовнішнього підсилювача з інтеграцією цифрової обробки аудіосигналу в одному корпусі, який стане ультимативним рішенням для вирішення задач з точним налаштуванням багатосмугової акустичної системи.

					РЕ21.468731.001 ПЗ	Лис
						4
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ВИСОКОЯКІСНІ АУДИОСИСТЕМИ

1.1 Параметри, що визначають якість відтворення звуку

Якість звучання формується не окремим параметром, а сукупністю характеристик системи, які впливають як на технічні показники, так і на суб'єктивне сприйняття звуку слухачем.

Існують три фундаментальні характеристики, які фактично описують поведінку будь-якої акустичної або електронної системи:

- амплітудно-частотна характеристика (АЧХ);
- фазочастотна характеристика (ФЧХ);
- імпульсна характеристика (ІХ).

Ці характеристики є нерозривно пов'язаними між собою та описують одну й ту саму систему з різних точок зору. Зміна будь-якої з них неминуче впливає на інші.

АЧХ визначає, як система змінює амплітуду сигналу залежно від частоти. Саме вона показує, які частоти підсилюються, а які послаблюються. У акустичних системах АЧХ безпосередньо впливає на тональний баланс звучання, глибину басу, деталізацію середніх частот та яскравість високочастотного діапазону. Приклад зображено на рисунку 1.1.

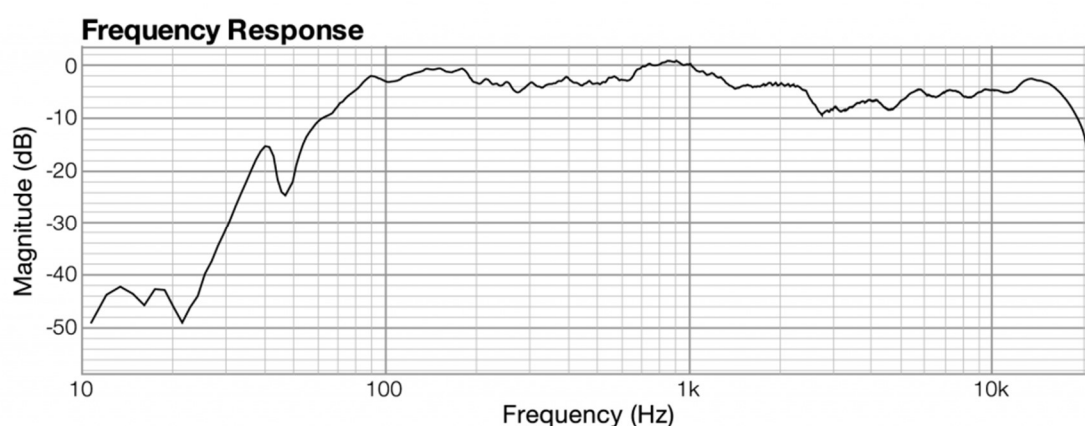


Рисунок 1.1 — Приклад амплітудно-частотної характеристики

ФЧХ описує зміну фази сигналу залежно від частоти. Вона характеризує часові зміщення між різними спектральними складовими сигналу під час проходження через систему. Нелінійна ФЧХ призводить до того, що окремі частотні компоненти приходять до слухача у різний момент часу, що може викликати погіршення просторової картини звучання. Приклад зображено на рисунку 1.2.

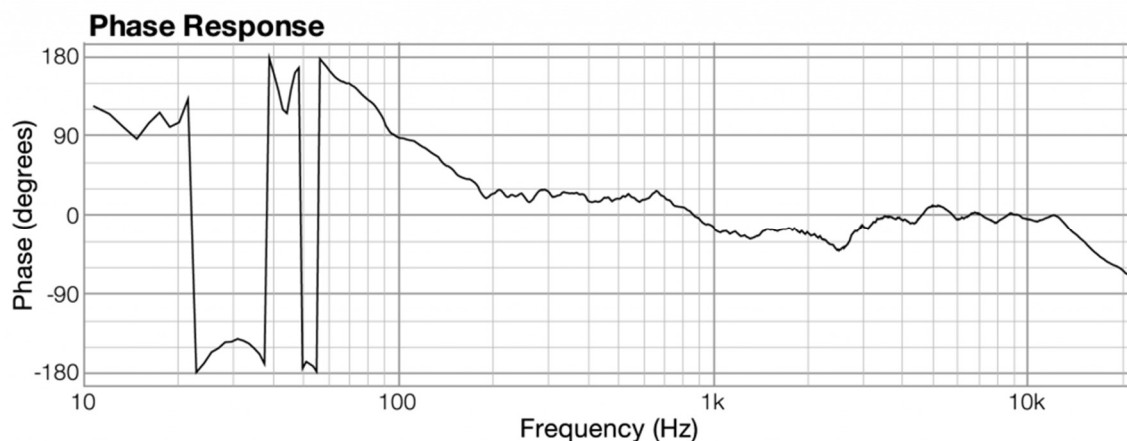


Рисунок 1.2 — Приклад фазочастотної характеристики

Імпульсна характеристика (Рисунок 1.3) відображає реакцію системи на одиничний короткий імпульс. Вона є найбільш повним описом системи у часовій області, оскільки містить інформацію як про амплітудні, так і про фазові властивості. Саме з імпульсної характеристики математично можуть бути отримані АЧХ та ФЧХ системи за допомогою перетворення Фур'є.

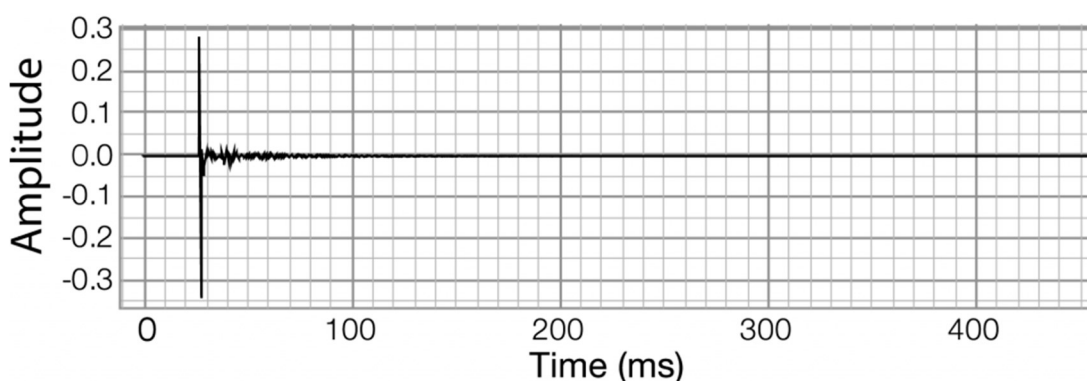


Рисунок 1.3 — Приклад імпульсної характеристики

Між цими характеристиками існує фундаментальний взаємозв'язок. В традиційних системах будь-яка зміна амплітудної характеристики неминуче впливає на фазову характеристику системи. Аналогічно, зміна фазової характеристики змінює форму імпульсної. Через це неможливо незалежно змінювати лише одну характеристику без впливу на інші. Особливо важливим є взаємозв'язок між ФЧХ та імпульсною характеристикою. Якщо система має нелінійну фазову характеристику, короткий імпульс після проходження через неї розтягується у часі. У свою чергу, система з лінійною ФЧХ забезпечує більш точне відтворення імпульсних сигналів, оскільки всі частотні складові проходять із однаковою часовою затримкою.

Також важливим показником якості аудіотракту є коефіцієнт гармонічних спотворень (THD). Його підвищений рівень призводить до появи у вихідному сигналі додаткових спектральних складових, яких не було у вхідному сигналі. У результаті погіршується чистота звучання, знижується деталізація та з'являється характерне перевантажене або «жорстке» звучання системи. Особливо критичними гармонічні спотворення є для високочастотного діапазону та роботи системи на високих рівнях потужності.

Недостатня потужність підсилювача може призводити до перевантаження вихідних каскадів та появи нелінійних спотворень при високих рівнях сигналу. Крім цього, нестабільність системи живлення або значні просадки напруги під навантаженням можуть погіршувати динамічні характеристики системи та впливати на якість відтворення низькочастотного діапазону. Наявність достатнього запасу по потужності дозволяє підсилювачу стабільно працювати навіть при значних динамічних навантаженнях.

Наявність паразитних шумів у сигнальному тракті призводить до маскування слабких компонентів аудіосигналу, погіршення мікродинаміки та втрати дрібних деталей звукового матеріалу. Особливо помітним це стає під час відтворення тихих фрагментів композицій, де навіть незначний рівень шуму може суттєво погіршувати сприйняття звучання. Саме тому при проектуванні аудіосистем важливими є мінімізація власних шумів

					РЕ21.468731.001 ПЗ	Лис
						7
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

підсилювальних каскадів, забезпечення високого співвідношення сигнал/шум у всіх вузлах системи.

Як висновок, при проектуванні аудіосистем необхідно враховувати велику кількість взаємопов'язаних параметрів, кожен із яких безпосередньо впливає на якість звучання та стабільність роботи. Баланс між частотними, фазовими, шумовими та енергетичними характеристиками визначає ефективність побудови сучасного аудіотракту та формує основні вимоги до його проектування.

1.2 Переваги багатосмугових акустичних систем

Звуковий діапазон охоплює широкий спектр частот — від низькочастотних коливань до високочастотних складових. Вимоги до випромінювача на різних ділянках цього діапазону суттєво відрізняються. Для відтворення низьких частот динамік повинен переміщувати значний об'єм повітря, тому йому потрібні велика площа дифузора, достатній хід рухомої системи та висока механічна міцність. Водночас передача високочастотних складових вимагає малої маси рухомих елементів і здатності швидко змінювати положення відповідно до форми сигналу. Ці вимоги суперечать одна одній, тому один випромінювач не може однаково ефективно працювати в усьому звуковому діапазоні.

Як наслідок, під час відтворення складного музичного сигналу широкосмуговий динамік одночасно відпрацьовує повільні коливання великої амплітуди та швидкі коливання малої амплітуди. Через це середньо- і високочастотні складові фактично відтворюються рухомою системою, яка в цей момент уже зміщена низькочастотним сигналом. Такий режим роботи призводить до інтермодуляційних спотворень і знижує точність передачі дрібних деталей звукового матеріалу.

Окремою проблемою є нерівномірність характеристик у різних частинах діапазону. Поблизу власних резонансів рухомої системи можливе підсилення окремих частот, а на верхній межі робочого діапазону зростає вплив маси дифузора, втрат у матеріалі та механічних деформацій. У результаті широкосмуговий випромінювач має обмеження не лише за діапазоном

					РЕ21.468731.001 ПЗ	Лис
						8
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

відтворення, а й за рівнем спотворень, рівномірністю АЧХ та точністю передачі перехідних процесів.

Для усунення зазначених недоліків у високоякісних акустичних системах використовується багатосмуговий принцип побудови. У такому випадку кожен випромінювач працює лише в тому діапазоні, для якого його конструкція є найбільш ефективною. Низькочастотний динамік забезпечує необхідний звуковий тиск у басовій області, середньочастотний відтворює основну частину музичної та мовної інформації, а високочастотний передає верхню частину спектра.

1.3 Способи розділення аудіосигналу на частотні смуги

Для коректної роботи багатосмугової системи вхідний аудіосигнал необхідно розділити на окремі частотні смуги, щоб на кожен динамік надходив лише той спектр частот, для відтворення якого він конструктивно призначений. Це завдання виконують фільтри або кросовери, які формують низькочастотні, середньочастотні та високочастотні складові для відповідних випромінювачів. Якість такого розділення визначає, наскільки узгоджено працюватимуть випромінювачі між собою, особливо в області розділення.

Найбільш поширеним способом розділення аудіосигналу в акустичних системах є використання пасивних кросоверів. Вони встановлюються після підсилювача потужності та розподіляють уже підсилений сигнал між окремими динаміками відповідно до їхнього робочого частотного діапазону. Для побудови таких фільтрів використовують пасивні елементи — котушки індуктивності, конденсатори та резистори.

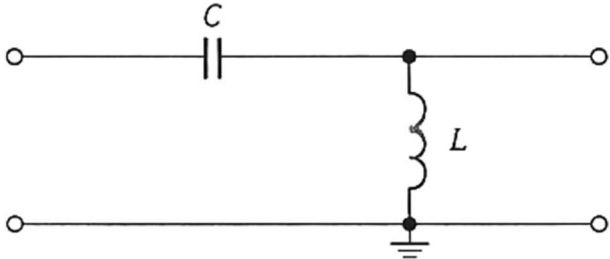
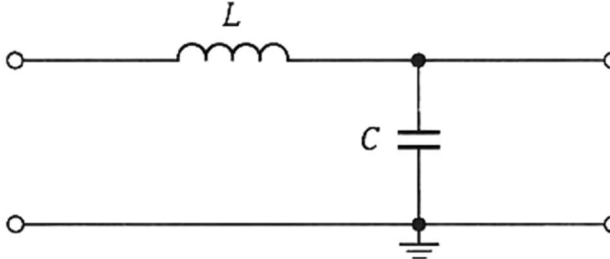
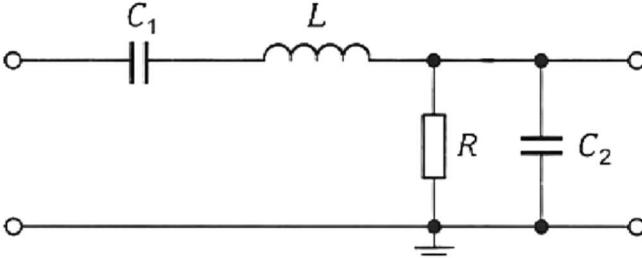
Принцип роботи пасивного кросовера ґрунтується на частотній залежності реактивного опору конденсаторів та котушок індуктивності. Конденсатор має менший опір для високочастотних складових сигналу, тому використовується у фільтрах верхніх частот. Котушка індуктивності, навпаки, краще пропускає низькі частоти та створює більший опір для високочастотних складових, тому застосовується у фільтрах нижніх частот. Смуговий фільтр формується поєднанням цих елементів і пропускає лише обмежену ділянку

					РЕ21.468731.001 ПЗ	Лис
						9
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

частотного діапазону, послаблюючи складові нижче та вище заданої смуги. У трисмугових акустичних системах такий фільтр використовується для середньочастотної динаміки, щоб на нього надходила лише середня частина звукового спектра.

Основною перевагою пасивних кросоверів є відносна простота конструкції. Вся схема розділення розміщується безпосередньо всередині акустичної системи, а для її роботи достатньо одного підсилювача потужності. Завдяки цьому пасивні кросовери широко застосовуються у традиційних побутових акустичних системах. Приклади зображені в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 — Пасивні фільтри та їх схематичні реалізації

Фільтр	Схема
Верхніх частот	
Нижніх частот	
Смуговий	

Пасивна фільтрація може виконуватися не лише після підсилювача потужності, але й у слабосигнальному тракті у перед підсилювальними каскадами. Однак у такому випадку параметри фільтра значною мірою

залежать від вихідного опору джерела сигналу та вхідного опору наступного каскаду. Крім того, пасивні фільтри не забезпечують підсилення, вносять втрати рівня сигналу та ускладнюють реалізацію фільтрів високого порядку з точно заданими характеристиками.

Для усунення цих недоліків у тракті малого сигналу використовують активні аналогові кросовери. У таких схемах частотне розділення виконується до підсилювачів потужності, але фільтри будуються вже не лише на пасивних RC-ланцюгах, а з використанням операційних підсилювачів. Це дозволяє буферизувати сигнал, зменшити вплив навантаження на параметри фільтрації, компенсувати втрати рівня та отримати стабільнішу частотну характеристику. Приклад схеми активного НЧ-фільтра зображений на рисунку 1.4.

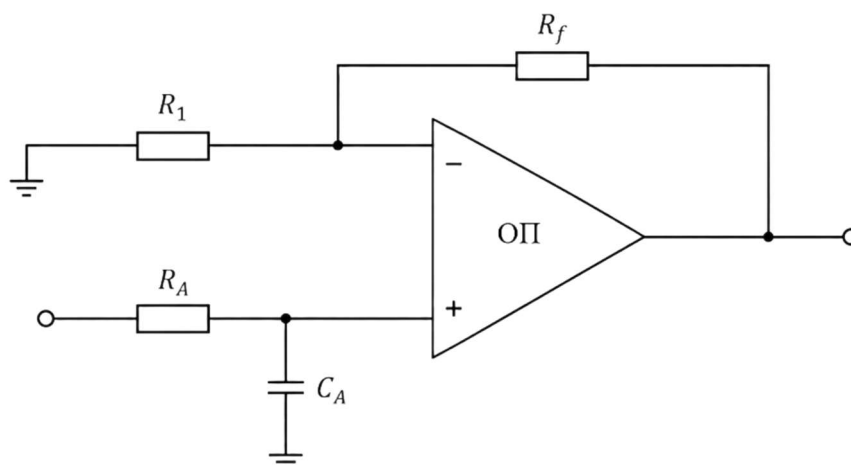


Рисунок 1.4 — Приклад активного НЧ-фільтра

Зміна параметрів фільтрації в активних аналогових системах виконується простіше, ніж у пасивних кросоверах, оскільки обробка відбувається у тракті малого сигналу до підсилювачів потужності. Частоти зрізу, рівні сигналів і добротність фільтрів задаються параметрами RC-ланцюгів та режимами роботи операційних підсилювачів, без використання силових котушок індуктивності й конденсаторів великої ємності. Тому вони широко застосовуються в активних сабвуферах, автомобільних підсилювачах, студійній техніці, професійних кросоверах та активних акустичних системах, де використання окремих каналів підсилення закладається в конструкцію пристрою.

Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата

РЕ21.468731.001 ПЗ

Лис

11

У звичайних пасивних акустичних системах такі кросовери не набули такого поширення, оскільки для кожної смуги потрібен окремий підсилювач.

Крім того, активна аналогова фільтрація залишається залежною від точності номіналів резисторів і конденсаторів, температурної стабільності, старіння компонентів та характеристик операційних підсилювачів.

1.4 Особливості цифрової фільтрації аудіосигналу

Цифрова обробка сигналу є розвитком активного принципу розділення аудіосигналу. Як і в активних аналогових кросоверах, фільтрація виконується до підсилювачів потужності, однак формування частотних смуг відбувається не за допомогою RC-ланцюгів, а шляхом математичної обробки сигналу в цифровому сигнальному процесорі.

У такій системі вхідний аналоговий сигнал спочатку перетворюється в цифрову форму за допомогою АЦП. Після цього DSP-процесор виконує фільтрацію, маршрутизацію каналів, регулювання рівнів, введення часових затримок та корекцію характеристик. Оброблені цифрові сигнали подаються на ЦАП, перетворюються назад в аналогову форму та надходять на відповідні підсилювачі потужності.

Головна відмінність DSP-системи від аналогового активного кросовера полягає у способі задання параметрів. В аналоговому фільтрі частота зрізу, крутизна спаду та форма характеристики визначаються номіналами резисторів, конденсаторів і схемою включення операційних підсилювачів. У DSP ці параметри задаються коефіцієнтами цифрових фільтрів. Це дозволяє змінювати частоти розділення, рівні окремих каналів або тип фільтра без переробки апаратної частини пристрою. Практична перевага такого підходу полягає у точному узгодженні окремих смуг акустичної системи. Це дає можливість враховувати різну чутливість динаміків, їх просторове розташування та особливості роботи в області частот розділення. У пасивному або аналоговому активному кросовері такі зміни потребують підбору компонентів або зміни схеми, тоді як у DSP вони виконуються зміною параметрів обробки.

					РЕ21.468731.001 ПЗ	Лис
						12
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

Ще однією важливою можливістю DSP є реалізація фільтрів із заданими фазовими властивостями. У традиційних аналогових фільтрах зміна амплітудної характеристики супроводжується зміною фази, що може порушувати узгодженість смуг у зоні розділення. У цифровій системі можна застосовувати FIR-фільтри з лінійною фазочастотною характеристикою. У цьому випадку частотні складові сигналу проходять фільтр з однаковою груповою затримкою, що дозволяє зберегти часову структуру сигналу після фільтрації.

DSP-тракт може виконувати не лише функцію кросовера, а й додаткову обробку сигналу в межах тієї ж апаратної платформи. До таких функцій належать параметрична еквалізація, корекція нерівномірностей АЧХ, обмеження рівня сигналу, програмна зміна маршрутизації каналів та інше. Приклад обробки сигналу за допомогою DSP зображений на рисунку 1.5.

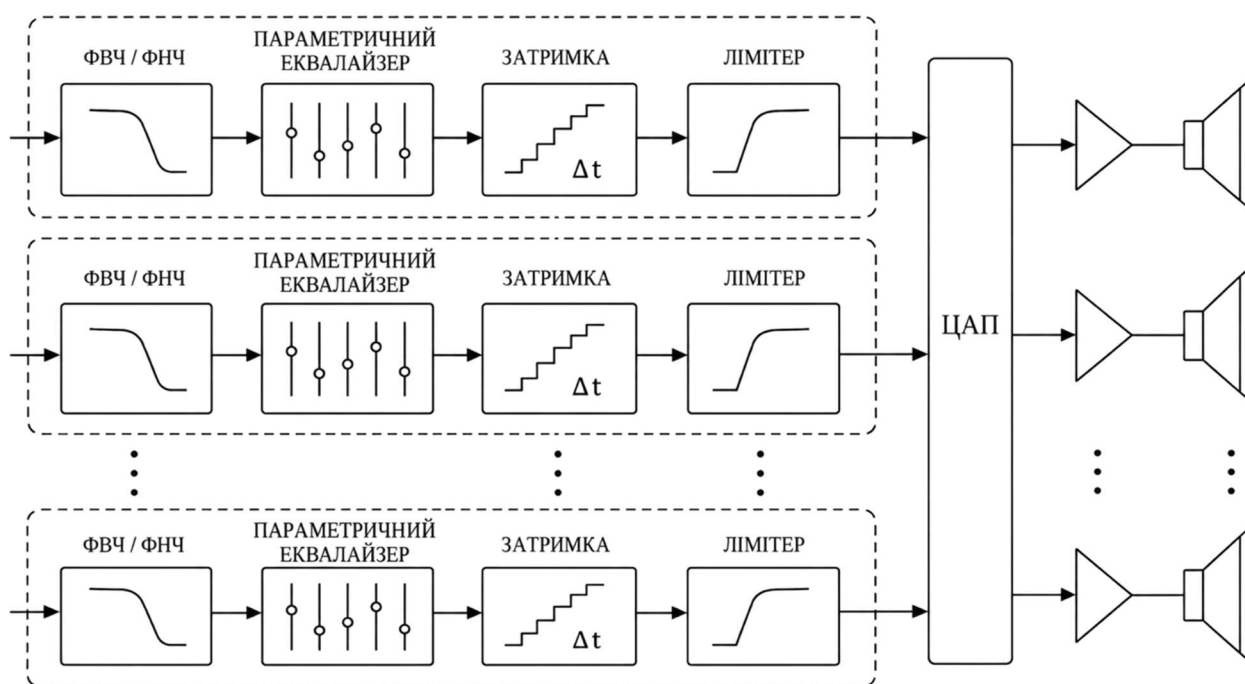


Рисунок 1.5 — Приклад структури DSP-обробки аудіосигналу

Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата

РЕ21.468731.001 ПЗ

Лис
13

1.5 Цифрові фільтри та досягнення лінійнофазної характеристики

У цифровій обробці сигналів найбільш поширеними є два основні типи фільтрів: ІІР-фільтри та FIR-фільтри. Вони відрізняються принципом формування вихідного сигналу, обчислювальною складністю, затримкою та характером фазочастотної характеристики.

1.5.1 ІІР-фільтри

ІІР-фільтри — цифрові фільтри з нескінченною імпульсною характеристикою. Їхня особливість полягає в тому, що вихідний сигнал формується не лише на основі поточних і попередніх значень вхідного сигналу, а й з урахуванням попередніх значень вихідного сигналу. Тобто в структурі такого фільтра використовується зворотний зв'язок. Завдяки цьому для отримання заданої амплітудно-частотної характеристики йому потрібна значно менша кількість коефіцієнтів. Наприклад, характеристику, для якої FIR-фільтру можуть знадобитися сотні коефіцієнтів, ІІР-фільтр часто може реалізувати фільтром другого, четвертого або шостого порядку.

Основною перевагою ІІР-фільтрів є низька обчислювальна складність. Вони потребують менше операцій множення і додавання, займають менше пам'яті та створюють меншу затримку сигналу, саме тому й широко використовуються в системах реального часу, де важливими є швидкодія, мала затримка та економне використання ресурсів процесора. Приклад ІІР-фільтру зображений на рисунку 1.6.

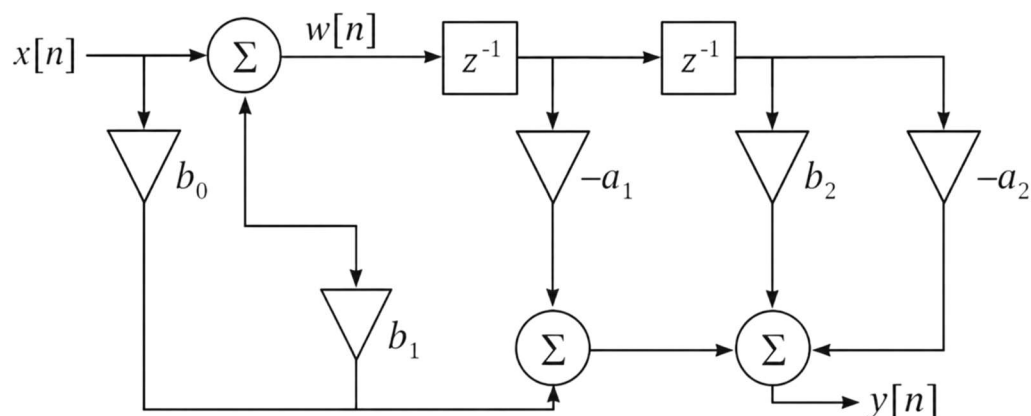


Рисунок 1.6 — Структура ІІР-фільтру

Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата

РЕ21.468731.001 ПЗ

Лис
14

1.5.2 FIR-фільтри

FIR-фільтри належать до цифрових фільтрів зі скінченною імпульсною характеристикою. На відміну від рекурсивних структур, вони не використовують зворотний зв'язок: вихідний сигнал формується як сума поточного та попередніх відліків вхідного сигналу, помножених на відповідні коефіцієнти. Такий принцип роботи забезпечує стійкість фільтра та дозволяє точно задавати його частотні властивості через набір коефіцієнтів.

Основною причиною використання FIR-фільтрів у даній системі є можливість отримання лінійної фазочастотної характеристики. Для цього коефіцієнти фільтра задаються симетрично, завдяки чому всі частотні складові сигналу проходять через фільтр з однаковою груповою затримкою. У результаті після фільтрації зберігається взаємне розташування складових сигналу в часі, що є принциповою вимогою для побудови лінійнофазної акустичної системи.

Недоліком FIR-фільтрації є більша обчислювальна складність порівняно з IIR-фільтрами. Для точного формування частотної характеристики та достатньо крутої перехідної області потрібна значна кількість коефіцієнтів, що збільшує навантаження на DSP-процесор і створює додаткову затримку сигналу. Проте в межах цього проєкту такі витрати ресурсів є виправданими, оскільки саме можливість реалізації лінійної ФЧХ визначає вибір FIR-фільтрів як основного інструменту цифрового розділення аудіосигналу. Приклад структури FIR-фільтру зображений на рисунку 1.7.

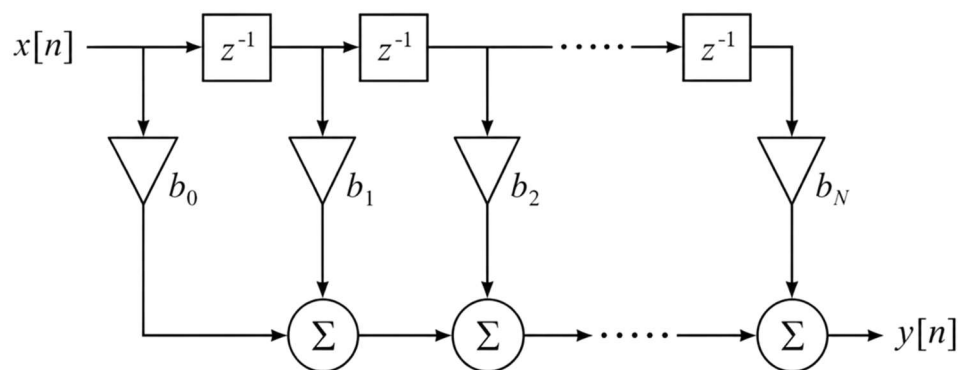


Рисунок 1.7 — Структура FIR-фільтру

Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата

PE21.468731.001 ПЗ

Лис
15

2 ФОРМУВАННЯ КОНЦЕПЦІЇ ПРИСТРОЮ

2.1 Аналіз існуючих рішень

Під час аналізу ринку можна виділити дві основні групи пристроїв, близьких за призначенням до розроблюваного підсилювача. До першої групи належать зовнішні DSP-процесори, такі як Dayton Audio DSP-408 та Behringer DCX2496, що зображені на рисунку 2.1. Вони виконують цифрове розділення сигналу, еквалізацію, затримки та маршрутизацію каналів, однак не містять підсилювачів потужності. Для побудови повної активної акустичної системи до них необхідно додатково підключати багатоканальний підсилювач.



а)



б)

Рисунок 2.1 — Існуючі DSP-процесори: а — Dayton Audio DSP-408;
б — Behringer DCX2496

До другої групи належать DSP-керовані підсилювальні модулі для активних акустичних систем, наприклад Нурех FusionAmp, що зображений на рисунку 2.2. Такі модулі вже поєднують DSP та підсилювач, однак їх основне призначення — встановлення безпосередньо всередину акустичної системи. Тобто вони є не універсальним зовнішнім пристроєм, а складовою конкретної активної колонки.

					РЕ21.468731.001 ПЗ	Лис
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		16



Рисунок 2.2 — Підсилювальний модуль Hypex FusionAmp

У першому випадку користувач отримує гнучку цифрову обробку, але повинен окремо підбирати підсилювачі потужності. У другому випадку система є компактною, але менш універсальною, оскільки модуль прив'язаний до конструкції акустичної системи. Між цими підходами залишається незайнята ніша зовнішнього підсилювача з вбудованим DSP-кросовером, який можна підключати до різних акустичних систем.

Розроблюваний пристрій вирішує саме цю проблему. Його основна перевага полягає в об'єднанні DSP-кросовера, шести каналів підсилення, системи живлення та керування в одному корпусі. Це робить його універсальнішим за вузькоспеціалізовані рішення, розраховані тільки на одну конфігурацію акустики. Користувач може змінювати частоти розділення, рівні каналів та режими роботи без втручання в апаратну частину системи, заміни компонентів або використання зовнішнього аналогового кросовера.

Новизна розробки полягає не в окремому використанні DSP або інтегральних підсилювачів, а в їх поєднанні в єдиному пристрої з автономним керуванням. Це зменшує кількість окремих блоків у системі, спрощує

підключення та дозволяє зосередити налаштування акустичної системи в цифровому тракті.

Цільовою аудиторією такого пристрою є користувачі, які хочуть перейти від пасивної акустичної системи до активної без складного налаштування декількох окремих пристроїв. До цієї групи належать поціновувачі високоякісного відтворення звуку, ентузіасти і розробники акустичних систем — користувачі, яким потрібне гнучке керування параметрами обробки аудіосигналу.

Отже, розроблений підсилювач має чітку перевагу перед зовнішніми DSP-процесорами завдяки наявності вбудованих підсилювальних каналів, а перед модулями — завдяки універсальному зовнішньому виконанню. Це робить запропоновану архітектуру доцільною для побудови акустичних систем з програмним налаштуванням параметрів.

2.2 Технічні вимоги до пристрою

Розроблюваний пристрій повинен являти собою високоякісний багатоканальний підсилювач звукової частоти, особливістю якого є вбудована цифрова обробка сигналу, яка дозволить виконувати розділення сигналу на частотні смуги без використання зовнішнього процесора або аналогових кросоверів. Завдяки цьому підсилювач може працювати як у звичайному стереорежимі з широкосмуговими акустичними системами без фільтрації сигналу, так і в режимах дво- або трисмугової акустичної системи з лінійнофазним розділенням смуг.

Основною вимогою до підсилювальної частини є забезпечення стабільної роботи, низького рівня шумів, спотворень та вихідної потужності для кожного каналу близько 50 Вт, що є достатнім для роботи з більшістю побутових акустичних систем середньої потужності.

Цифровий тракт пристрою повинен забезпечувати стабільну обробку аудіосигналу в реальному часі. Для цього необхідна підтримка багатоканальної маршрутизації сигналу, цифрової фільтрації, регулювання рівнів окремих каналів та введення часових затримок. Оскільки однією з цілей

					PE21.468731.001 ПЗ	Лис
						18
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

роботи є отримання лінійнофазної характеристики акустичної системи, DSP-тракт повинен мати достатню продуктивність для реалізації FIR-фільтрів. При цьому важливо забезпечити не лише розділення сигналу за частотами, а й збереження часової узгодженості між сформованими смугами.

Система живлення повинна забезпечувати стабільну роботу всіх підсилювальних каналів при змінному навантаженні та короткочасних пікових струмах. Основними вимогами є достатній запас по потужності, мінімальні просадки напруги, низький рівень пульсацій та ефективна фільтрація живлення. Окремо необхідно передбачити стабілізоване живлення для цифрової частини пристрою, оскільки її робота повинна бути ізольована від силових навантажень підсилювальних каскадів.

Пристрій повинен мати автономну систему керування, яка дозволить користувачу змінювати режими роботи та основні параметри обробки без постійного підключення до персонального комп'ютера. З передньої панелі має бути доступне перемикання режимів, налаштування частот розділення, регулювання рівнів каналів та контроль поточного стану системи. Для цього доцільно використати мікроконтролер, енкодер, кнопки керування та дисплей.

Конструкція пристрою повинна забезпечувати надійне тепловідведення від підсилювальних мікросхем, раціональне розміщення силових і сигнальних вузлів, а також мінімізацію взаємного впливу аналогової, цифрової та силової частин. Особливу увагу необхідно приділити прокладанню сигнальних ланцюгів, заземленню, фільтрації живлення та розміщенню джерел електромагнітних завад.

Сукупність цих вимог визначає подальший вибір DSP-платформи, підсилювальних каскадів, системи живлення, керування та конструкції корпусу.

2.3 Структура пристрою

Структурна схема пристрою складається з аудіотракту, системи керування та блоків живлення. Вхідний стереосигнал надходить на АЦП, де перетворюється у цифрову форму та передається далі до DSP, який виконує

					РЕ21.468731.001 ПЗ	Лис
						19
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

маршрутизацію, фільтрацію, регулювання рівнів і, за потреби, введення часових затримок. У стереорежимі сигнал передається без частотного розділення, а в дво- або трисмуговому режимі DSP формує окремі смуги для подальшого підсилення.

Після цифрової обробки сигнали проходячи через ЦАП перетворюються в аналогову форму. Далі кожен сформований канал подається на окремий підсилювальний каскад. У максимальній конфігурації використовується шість каналів підсилення, що відповідає трисмуговій стереосистемі: НЧ, СЧ та ВЧ для лівої і правої акустичних систем.

Система керування складається з органів керування, мікроконтролера та дисплея. Органи керування передають команди на мікроконтролер, який змінює параметри DSP-обробки та режими роботи пристрою. Дисплей використовується для відображення поточного режиму та основних параметрів системи.

Силовий блок живлення забезпечує роботу каналів підсилення, а блок живлення цифрової частини призначений для АЦП, DSP, ЦАП, мікроконтролера та дисплея. Такий поділ зменшує вплив силових навантажень на цифрові та сигнальні вузли.

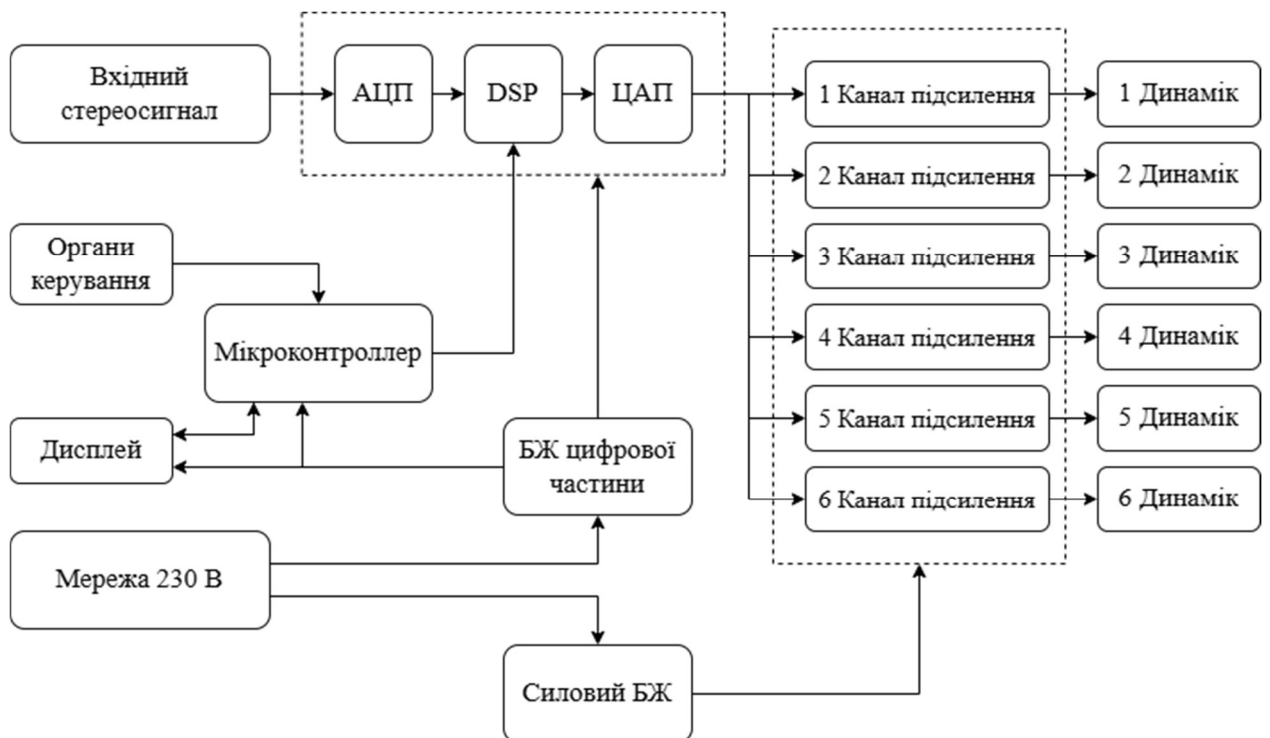


Рисунок 2.3 — Структурна схема пристрою

3 РОЗРОБКА ПІДСИЛЮВАЛЬНОЇ ЧАСТИНИ

3.1 Обґрунтування вибраної архітектури підсилення

Для побудови підсилювальної частини розглядалися три схемотехнічні варіанти: дискретний транзисторний каскад класу АВ, інтегральний підсилювач класу АВ та підсилювач класу D.

Дискретна транзисторна схема дає найбільшу свободу проектування та може забезпечувати значну вихідну потужність, однак для шести каналів така реалізація суттєво ускладнює конструкцію. Для кожного каналу необхідно окремо реалізовувати вхідний каскад, підсилювач напруги, драйверний каскад, вихідні транзистори, термостабілізацію струму спокою, захист і налаштування режимів роботи. При багатоканальній структурі це збільшує кількість елементів, площу плат, вимоги до охолодження та ризик відмінності параметрів між каналами. Такий підхід доцільний для підсилювачів великої потужності, але для заданого рівня 50 Вт на канал він є надмірно складним.

Підсилювачі класу D мають вищий ККД і менше тепловиділення, проте їх робота базується на високочастотній комутації вихідних транзисторів. Це потребує захисту від електромагнітних завад, вихідних LC-фільтрів та врахування їх взаємодії з імпедансом акустичної системи. Для пристрою, у якому поруч розміщуються чутливі цифрові та аналогові сигнальні вузли, додаткове джерело високочастотних завад є небажаним.

З урахуванням вимог до якості відтворення, повторюваності параметрів між каналами та помірної вихідної потужності як основне схемотехнічне рішення обрано інтегральний підсилювач TDA7293. За своєю структурою ця мікросхема є потужним інтегральним підсилювачем напруги, близьким за принципом використання до операційного підсилювача, однак розрахований на безпосередню роботу з низькоомним акустичним навантаженням. Таку можливість забезпечує вихідний каскад, виконаний за технологією DMOS, що є різновидом потужної MOSFET-структури, призначеної для роботи зі значними струмами та напругами. На відміну від біполярних транзисторів,

					РЕ21.468731.001 ПЗ	Лис
						21
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

вони мають вищу термічну стійкість, тому підсилювач менш схильний до теплового розгону під час тривалої роботи на великій потужності. Явище вторинного пробою для таких транзисторів не характерне – це підвищує надійність вихідного каскаду в складних режимах роботи та при короточасних перевантаженнях. Крім того, перевагами польових транзисторів також є лінійність і висока швидкодія, завдяки чому зменшується рівень спотворень, покращується точність передавання звукового сигналу та забезпечується стабільна робота підсилювача. Мікросхема виготовлена в корпусі Multiwatt15, зображена на рисунку 3.1.

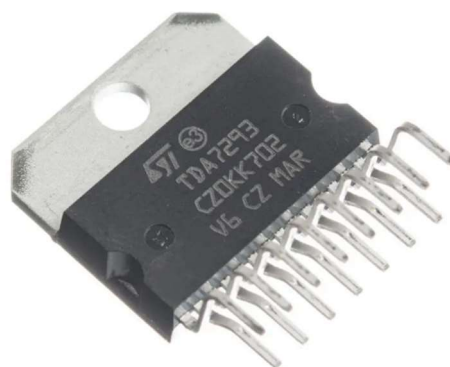
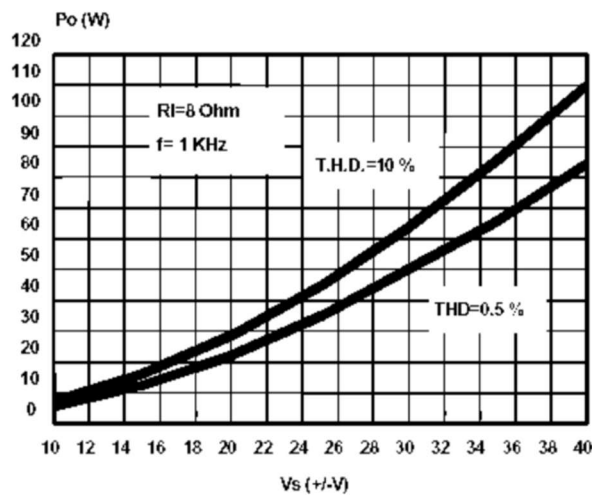


Рисунок 3.1 — Інтегральний підсилювач TDA7293

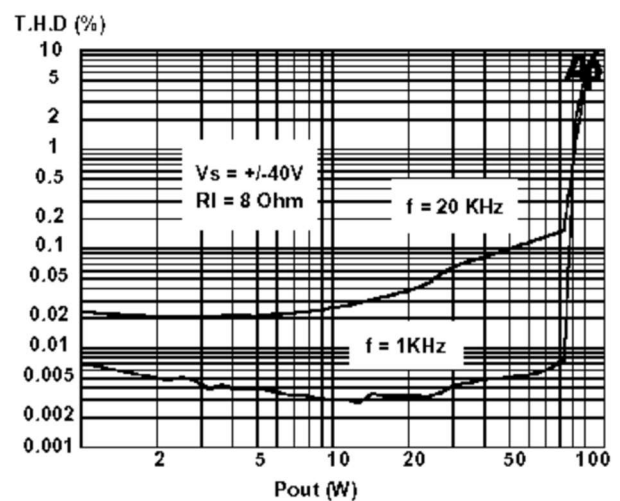
Мікросхема має вбудовані режими Mute і Standby, захист від короткого замикання, термозахист, вихід Clip Detector для контролю перевищення рівню сигналу. Наявність таких функцій є очевидною перевагою, оскільки базові засоби керування та захисту реалізовані безпосередньо в підсилювальній мікросхемі й не потребують складних зовнішніх схем. Це спрощує побудову кожного каналу, зменшує кількість додаткових компонентів і підвищує загальну надійність пристрою.

Відповідність TDA7293 вимозі щодо вихідної потужності можна оцінити за графіком від виробника наведеним на рисунку 3.2 (а). Для навантаження 8 Ом при частоті 1 кГц мікросхема забезпечує близько 57 Вт вихідної потужності при двополярній напрузі живлення $\pm 34\text{В}$ за рівня гармонічних спотворень $\text{THD} = 0,5\%$. При подальшому збільшенні напруги живлення вихідна потужність зростає, однак разом із цим необхідно враховувати тепловий режим мікросхеми.

					РЕ21.468731.001 ПЗ	Лис
						22
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		



а)



б)

Рисунок 3.2 — Характеристики TDA7293: а — залежність вихідної потужності від напруги живлення; б — залежність коефіцієнта гармонічних спотворень від вихідної потужності

Додатково якість роботи підсилювача підтверджується графіком, наведеним на рисунку 3.2(б). Видно, що при навантаженні 8 Ом і частоті 1 кГц рівень THD залишається низьким у широкому діапазоні потужностей і починає різко зростати лише поблизу області перевантаження. Це означає, що при вихідній потужності близько 50 Вт підсилювач ще не працює в режимі кліпінгу та зберігає прийнятний рівень нелінійних спотворень близько 0,1 %. На частоті 20 кГц рівень спотворень є вищим, що є типовим для підсилювачів потужності через зростання вимог до швидкодії вихідного каскаду. Проте навіть у цьому випадку графік показує працездатність мікросхеми в області десятків ват без різкого переходу до перевантаження.

Для аудіосигналу це є важливим, оскільки реальний музичний матеріал не є безперервним синусоїдальним сигналом максимальної амплітуди, а має значно меншу середню потужність.

Окремо необхідно оцінити тепловиділення. Підсилювач класу АВ має нижчий ККД, ніж підсилювач класу D, тому частина споживаної енергії розсіюється у вигляді тепла. Для попередньої оцінки можна прийняти ККД на рівні приблизно 60 %.

Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата

РЕ21.468731.001 ПЗ

Лис
23

Тоді при вихідній потужності 50 Вт споживана потужність одного каналу становитиме:

$$P_{\text{спож}} \approx \frac{P_{\text{вих}}}{\eta} = \frac{50}{0,6} \approx 83 \text{ Вт}$$

Потужність, яка переходить у тепло:

$$P_{\text{тепл}} \approx P_{\text{спож}} - P_{\text{вих}} = 83 - 50 \approx 33 \text{ Вт}$$

Отже, при роботі одного каналу на максимальній синусоїдальній потужності підсилювальна мікросхема може розсіювати близько 30–35 Вт тепла. Для шести каналів це висуває підвищені вимоги до радіаторів, теплового контакту та розміщення мікросхем у корпусі. У реальних умовах музичний сигнал має меншу середню потужність порівняно з безперервним синусоїдальним сигналом, однак система охолодження повинна мати достатній запас для тривалої стабільної роботи.

3.2 Електрична принципова схема підсилювача

Електрична принципова схема одного каналу підсилення виконана на основі типової схеми включення мікросхеми TDA7293, наведеної в документації виробника на рисунку 3.3. У схемі передбачено окремі роз'єми для подавання вхідного сигналу, підключення двополярного живлення, виходу на динамічну головку, керування режимами Mute/Standby та виведення сигналу Clip Detector. Таке рішення спрощує побудову багатоканального підсилювача, оскільки кожен канал може бути реалізований як окремий однотипний модуль з однаковою схемотехнікою та уніфікованими вимогами до підключення.

					РЕ21.468731.001 ПЗ	Лис
						24
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

На виході підсилювача передбачено стабілізуючий RC-ланцюг R7–C10. Він покращує стійкість підсилювача при роботі з реальним акустичним навантаженням, оскільки динамічна головка має не лише активну, а й реактивну складову імпедансу.

Живлення каналу підводиться через роз'єм X4 і має двополярну структуру: +VS, –VS та GND. Конденсатори C6 і C8 номіналом 1000 мкФ виконують локальну фільтрацію шин живлення, а конденсатори C7 і C9 номіналом 100 нФ – високочастотне шунтування. Ці елементи необхідно розміщувати максимально близько до виводів живлення мікросхеми, оскільки якість локальної розв'язки безпосередньо впливає на стійкість роботи підсилювача та його схильність до самозбудження.

У схемі розділено силову землю GND та сигнальну SGND для того, щоб великі струми вихідного каскаду та живлення не створювали падіння напруги у спільних провідниках із вхідним сигналом. Це зменшує ризик появи фону, наведень і паразитного зворотного зв'язку через загальну шину.

Побудована схема зображена на рисунку 3.4.

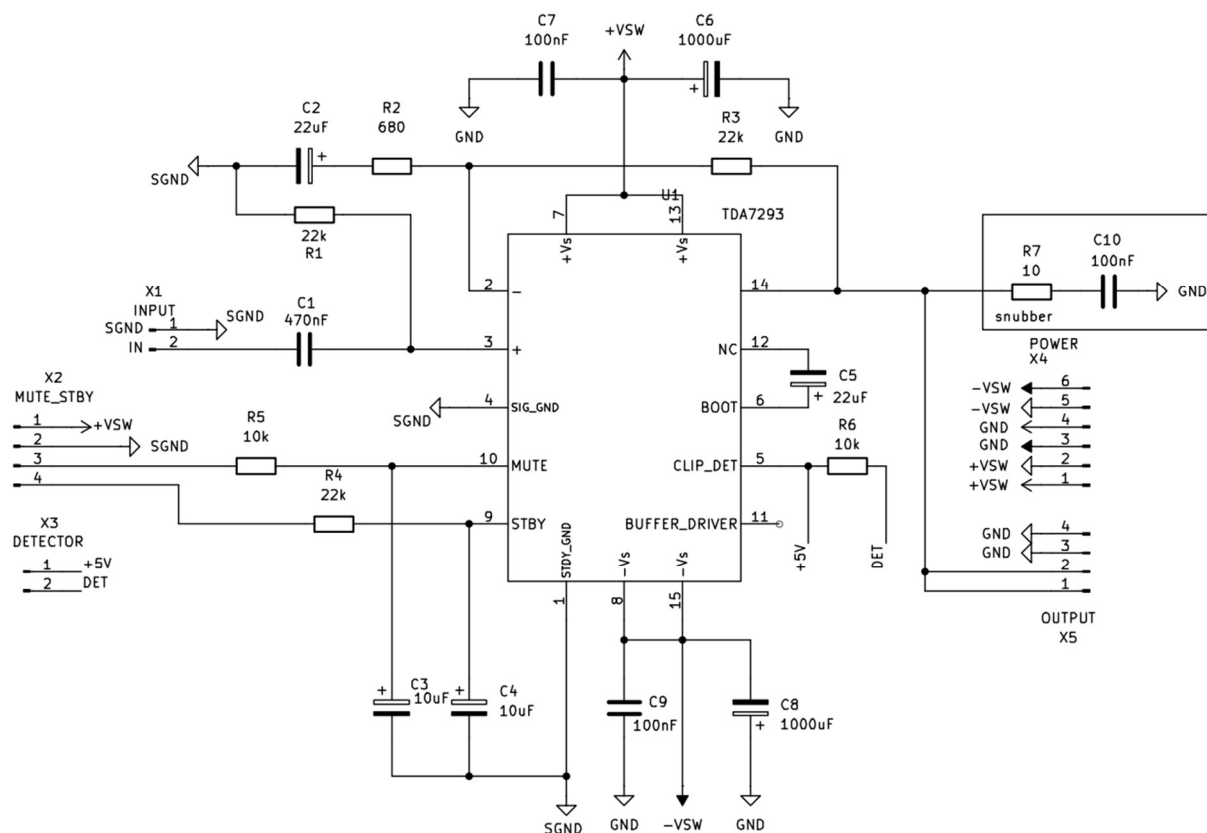


Рисунок 3.4 — Електрична принципова схема включення TDA7293

					Лис
					26
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата	

PE21.468731.001 ПЗ

3.3 Вибір елементної бази підсилювача

Вибір компонентів для друкованої плати виконано з урахуванням призначення окремих вузлів схеми та умов роботи підсилювача потужності.

Резистори в сигнальному тракті та колі зворотного зв'язку обрані металоплівкового типу виробництва VISHAY точністю 1% та потужністю 1/4 Вт. Великі струми через них не проходять, однак від їхніх номіналів залежать вхідний опір, коефіцієнт підсилення та повторюваність параметрів між окремими каналами.



Рисунок 3.5 — Резистор VISHAY DALE CMF50

Вхідний розділовий конденсатор С1 обрано плівкового типу виробництва WIMA серії МКР10 з поліпропіленовим діелектриком. Незважаючи на більші габарити порівняно з іншими варіаціями плівкового чи керамічного типу, такий варіант є доцільним для сигнального тракту, оскільки такі конденсатори мають низькі діелектричні втрати, високу стабільність ємності, малу нелінійність і найменший вплив на форму сигналу. У цьому вузлі пріоритет надано якості передачі аудіосигналу, а не компактності компонента.

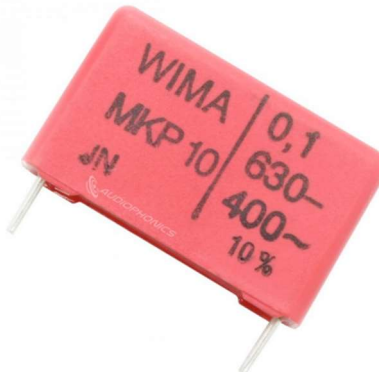


Рисунок 3.6 — Конденсатор WIMA МКР10

					РЕ21.468731.001 ПЗ	Лис
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		27

Шунтувальні конденсатори живлення C7 і C9 виконані у SMD-корпусах. Такий вибір ускладнює ручний монтаж, однак дозволяє зменшити паразитну індуктивність виводів і розмістити конденсатори ближче до контактів живлення TDA7293. Це покращує високочастотну розв'язку живлення та знижує ризик самозбудження підсилювача. Електролітичні конденсатори C6 і C8 обрані типу Low ESR, оскільки вони працюють як локальний енергетичний резерв для плечей живлення і повинні ефективно згладжувати короткочасні просадки напруги при імпульсному навантаженні.

Для сигнальних і керуючих ліній використані роз'єми типу JST. У цих колах не протікають значні струми, тому основними вимогами є компактність, зручність підключення та надійний контакт. Для силових ланцюгів живлення і виходу на динамік застосовані роз'єми Mini-Fit з кроком 4,2 мм, оскільки вони краще підходять для передавання більших струмів і забезпечують надійніше механічне з'єднання. Контактні групи силових роз'ємів продубльовані, що зменшує перехідний опір, підвищує допустиме струмове навантаження та покращує надійність з'єднання під час роботи підсилювача.

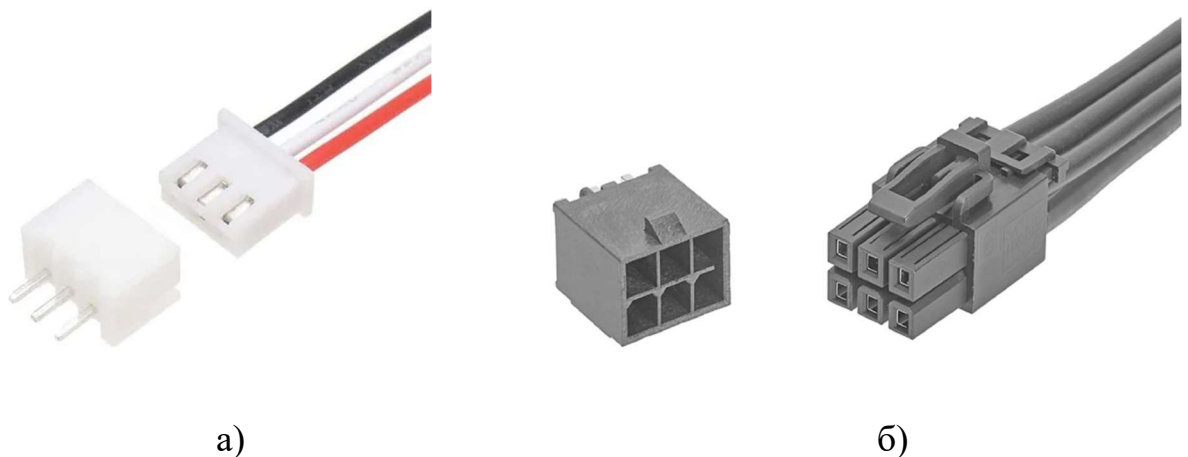


Рисунок 3.7 — Роз'єми: а — JST PH; б — Molex Mini-Fit

3.4 Друкована плата підсилювача

Оскільки підсилювач є багатоканальним, плата виконана як окремий однотипний модуль, який може повторюватися для кожного каналу. Це спрощує компонування і забезпечує однакову схемотехніку підсилення для всіх виходів системи. Плату зображено на рисунках 3.8, 3.9.

					PE21.468731.001 ПЗ	Лис
						28
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

Для механічного кріплення плати передбачені монтажні отвори М3 по кутах. Це дозволяє надійно закріпити модуль у корпусі підсилювача та зменшити механічне навантаження на виводи роз'ємів і мікросхеми.

Як і на схемі включення від виробника, у конструкції плати враховано розділення сигнальної та силової землі. Під час трасування вони з'єднуються контрольовано, без утворення зайвих петель, що зменшує ризик появи наведень і паразитного зворотного зв'язку.

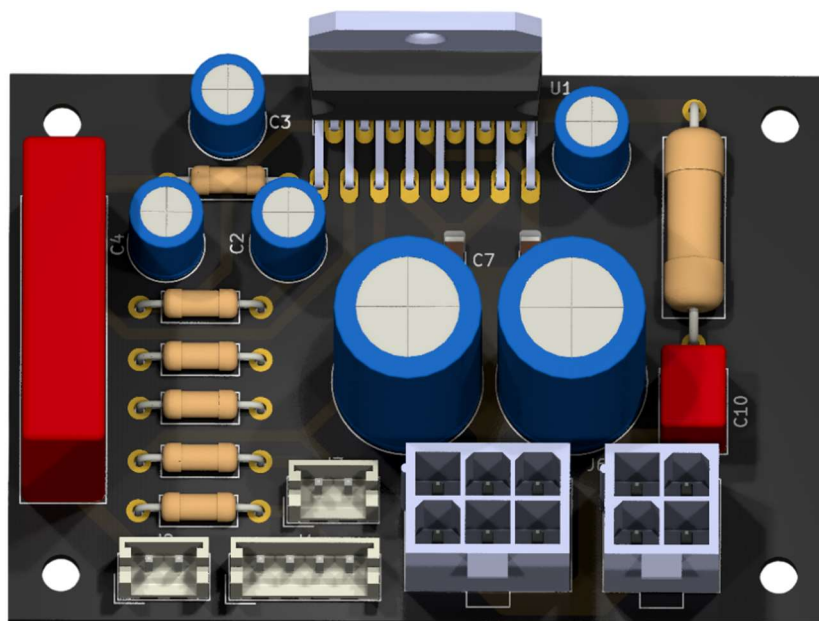


Рисунок 3.8 — 3D-візуалізація друкованої плати підсилювача (1)

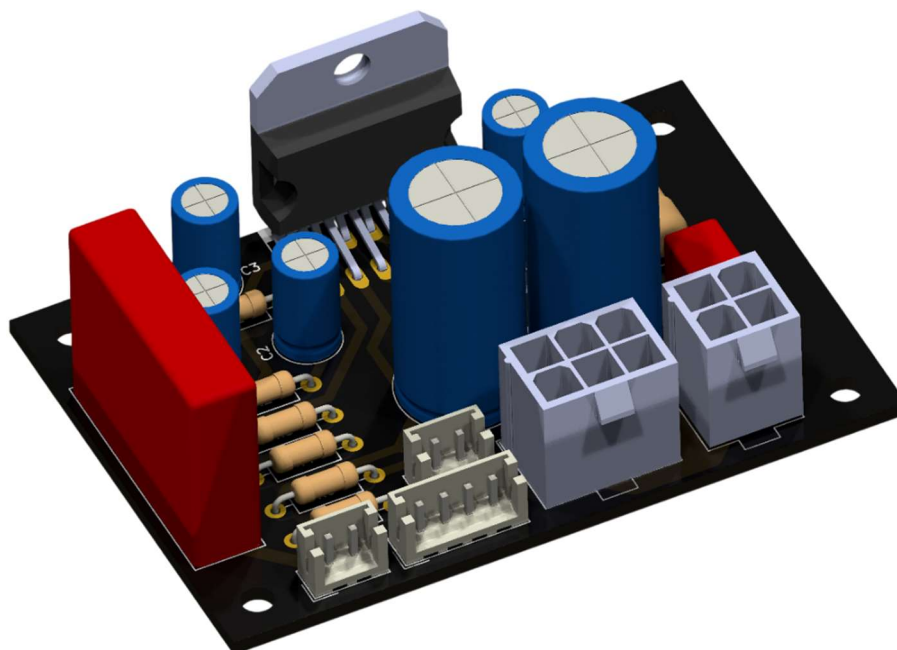


Рисунок 3.9 — 3D-візуалізація друкованої плати підсилювача (2)

Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата

PE21.468731.001 ПЗ

Лис
29

Плата виконана двошаровою. Особливу увагу під час трасування приділено силовим доріжкам живлення та виходу на динамік, оскільки через них протікають найбільші струми. Ці лінії виконані збільшеною шириною, що зменшує падіння напруги, нагрівання провідників і паразитний опір у колі. Ділянки живлення +VS, -VS і GND розведені короткими та широкими провідниками, а місця підключення живлення винесені на окремий роз'єм. Трасування плати зображено на рисунках 3.10, 3.11.

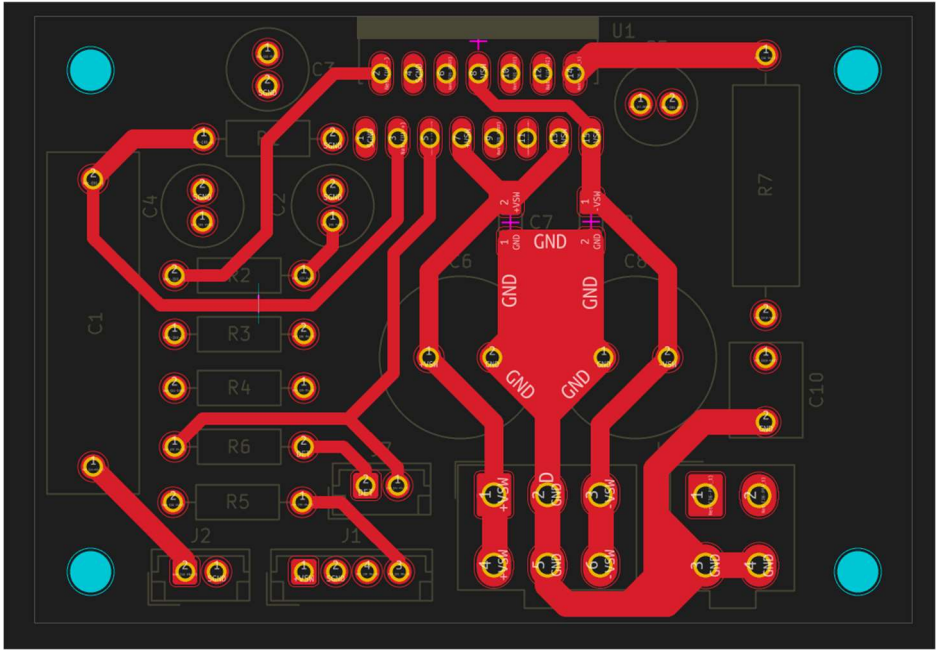


Рисунок 3.10 — Трасування верхнього шару плати підсилювача

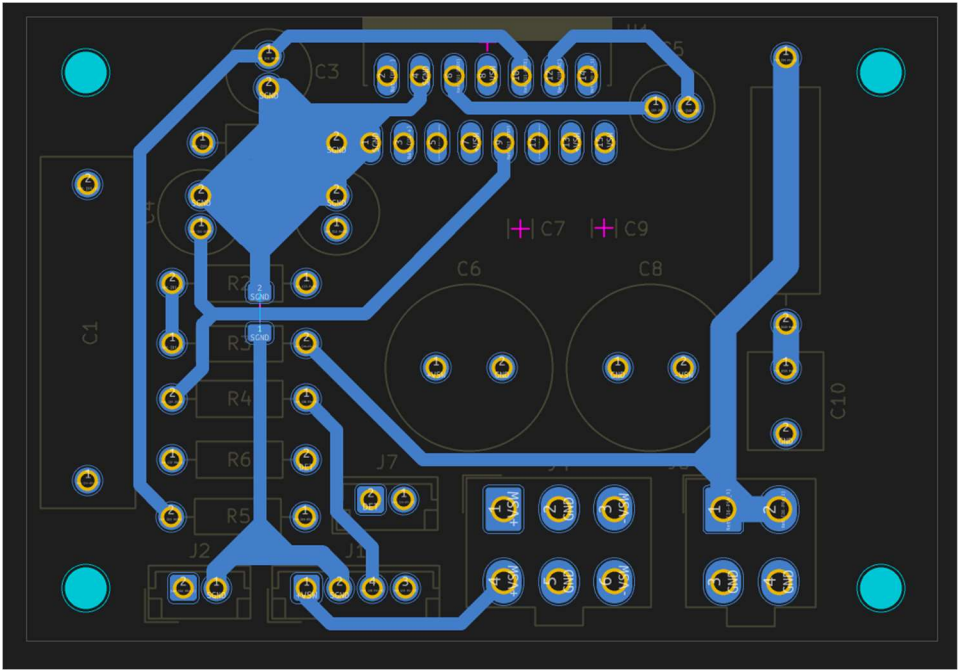


Рисунок 3.10 — Трасування нижнього шару плати підсилювача

Конденсатори С6 і С8 великої ємності розташовані в безпосередній близькості до силових виводів мікросхеми. Вони виконують функцію локального енергетичного резерву для позитивного та негативного плеча живлення. Поряд із ними розміщені високочастотні шунтувальні конденсатори С7 і С9, які зменшують високочастотні завади та підвищують стійкість підсилювача.

Вхідна частина плати розміщена окремо від вихідних і силових ланцюгів. Роз'єм J2, розділовий конденсатор С1, резистор R1 та елементи зворотного зв'язку розташовані в малосигнальній зоні плати. Це зменшує вплив струмів вихідного каскаду на вхідний сигнал і знижує ймовірність появи фону або наведень. Доріжки вхідного сигналу виконані короткими та не проходять паралельно до вихідних силових ліній.

Вихідний роз'єм J6 розташований поблизу вихідного ланцюга підсилювача. Поруч із ним розміщено стабілізуючий RC-ланцюг R7–С10, який підключений до виходу та призначений для підвищення стійкості при роботі з акустичним навантаженням. Таке розташування дозволяє мінімізувати довжину високострумової вихідної ділянки та зменшити паразитні параметри з'єднань.

					РЕ21.468731.001 ПЗ	Лис
						31
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

4 РОЗРОБКА ЦИФРОВОЇ ЧАСТИНИ

4.1 Вибір архітектури DSP

У якості цифрового сигнального процесора в проєкті обрано ADAU1452, оскільки його обчислювальні можливості достатні для реалізації багатоканальної аудіообробки з використанням FIR-фільтрів високого порядку. Процесор побудований на 32-бітному ядрі SigmaDSP, працює з тактовою частотою до 294,912 МГц та забезпечує виконання до 6144 інструкцій на один семпл при частоті дискретизації 48 кГц. Крім основного DSP-ядра, ADAU1452 має високу ефективність при виконанні операцій фільтрації та здатний обробляти приблизно 24000 FIR-коефіцієнтів на один семпл при 48 кГц. Також процесор підтримує багатоканальні аудіоінтерфейси I²S/TDM, асинхронні перетворювачі частоти дискретизації та гнучку маршрутизацію цифрових аудіопотоків, що робить його придатним для реалізації в даному проєкті.

Для оцінки продуктивності ADAU1452 можна виконати приблизний розрахунок навантаження. У разі використання шести вихідних каналів та FIR-фільтрів довжиною 1024 коефіцієнтів загальна кількість операцій фільтрації становить:

$$6 \cdot 1024 = 6144 \text{ taps/sample},$$

що приблизно дорівнює 26 % від максимальної FIR-продуктивності. Затримка лінійнофазного FIR-фільтра визначається половиною його довжини без одного семплу:

$$\tau = \frac{1024 - 1}{2} = 511,5 \text{ samples}$$

При частоті дискретизації 48 кГц це відповідає часовій затримці:

$$t = \frac{511,5}{48000} \approx 0,0107 \text{ с} = 10,7 \text{ мс}$$

Для домашньої акустичної системи така затримка є прийнятною, оскільки всі шість каналів обробляються синхронно, отриманий вигравш полягає у можливості реалізації лінійнофазної фільтрації.

					РЕ21.468731.001 ПЗ	Лис
						32
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

У якості аудіокодека використовується AD1938, який містить 4 канали АЦП та 8 каналів ЦАП із підтримкою частоти дискретизації до 192 кГц. Наявність восьми каналів цифро-аналогового перетворення дозволяє реалізувати незалежне підключення всіх каналів трисмугової стереосистеми без використання додаткових зовнішніх ЦАПів. Високі параметри динамічного діапазону та низький рівень THD+N дозволяють мінімізувати внесені спотворення й забезпечити прозору обробку аудіосигналу без помітного впливу на якість звучання. Кодек підтримує 24-бітне аудіо, режими передачі даних I²S і TDM, а також може працювати як у режимі master, так і slave, що спрощує інтеграцію з DSP-процесором ADAU1452. Динамічний діапазон ЦАП становить до 108 дБ, а АЦП — до 107 дБ при THD+N близько -94 дБ, що забезпечує достатній запас якості для відтворення аудіосигналу. Також AD1938 має вбудований PLL-множник тактової частоти, підтримує програмне керування через SPI та оптимізований для роботи з низьким рівнем електромагнітних завад.

Для реалізації системи обрано налагоджувальну плату на базі ADAU1452 та AD1938. Плата містить DSP-процесор, аудіокодек, вузли синхронізації, цифрові аудіоінтерфейси та необхідні ланцюги живлення, що дозволяє реалізувати завершену структуру DSP-модуля в межах єдиної апаратної платформи. Плату зображено на рисунку 4.1.

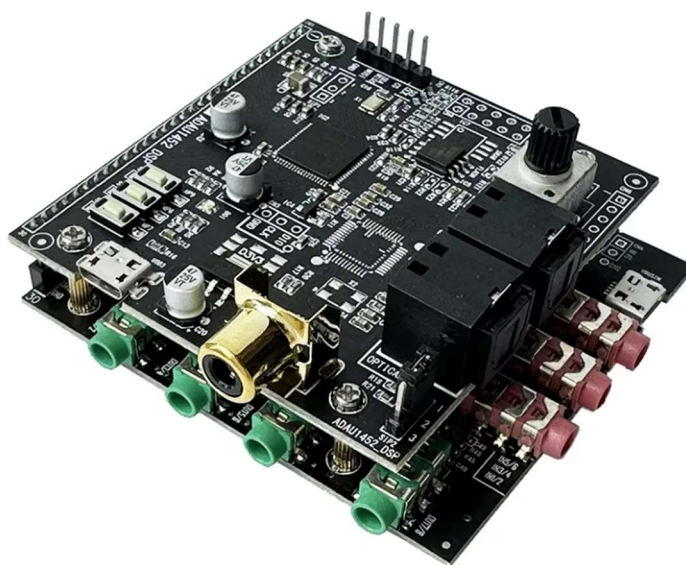


Рисунок 4.1 — Налагоджувальна плата ADAU1452 та AD1938

					<i>PE21.468731.001 ПЗ</i>	Лис
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		33

Передача цифрового аудіосигналу між DSP-процесором та аудіокодеком виконується через інтерфейси I²S/TDM. Це дозволяє мінімізувати кількість зовнішніх аналогових з'єднань у DSP-тракті та забезпечує синхронну обробку всіх каналів системи в межах єдиної цифрової платформи.

Поєднання ADAU1452 та AD1938 забезпечує повноцінну апаратну основу для реалізації DSP-тракту підсилювача. Обрана платформа має необхідну кількість каналів цифро-аналогового перетворення, підтримує багатоканальну маршрутизацію аудіоданих і має достатню продуктивність для використання FIR-фільтрів високого порядку. Підтримка високих частот дискретизації, низький рівень власних шумів і сумісність цифрових аудіоінтерфейсів дозволяють застосовувати її в системі, орієнтованій на якісну обробку звукового сигналу.

Додатковою перевагою є використання готової плати на базі ADAU1452 та AD1938. Найбільш критичні вузли цифрового аудіотракту — DSP-процесор, аудіокодек, тактування, цифрові інтерфейси та базові ланцюги живлення — уже реалізовані в межах одного модуля. Це зменшує ризик помилок під час роботи з високошвидкісними цифровими лініями, синхронізацією аудіоданих і перетворенням сигналу. Для даного проєкту такий підхід є доцільним, оскільки основна увага зосереджується не на розробці окремої DSP-плати, а на інтеграції цифрової обробки до складу багатоканального підсилювача.

4.2 Розробка алгоритмів обробки сигналу

Алгоритм обробки сигналу розроблено у середовищі SigmaStudio. Його структура відповідає функції цифрового кросовера, який приймає вхідний стереосигнал, виконує його попереднє регулювання та формує окремі вихідні канали для підсилювачів потужності. Обробка виконується окремо для лівого і правого каналів, що дозволяє зберегти незалежність стереосигналу та сформувати повний набір виходів для трисмугової акустичної системи. Алгоритм наведений на рисунку 4.2.

					РЕ21.468731.001 ПЗ	Лис
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		34

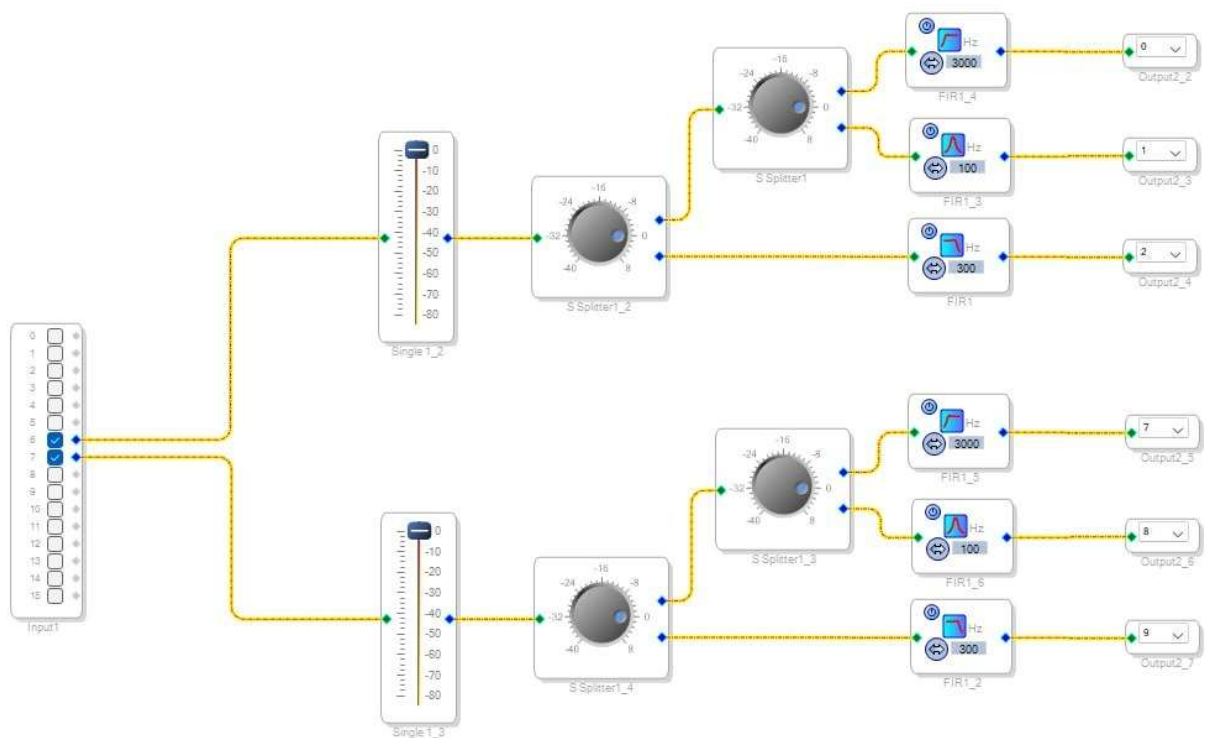


Рисунок 4.2 — Алгоритм цифрової обробки сигналу

На першому етапі сигнал з вхідного блоку подається на регулятори рівня. Вони використовуються для встановлення загального рівня лівого та правого каналів перед подальшим розділенням. Розміщення регулятора саме на початку тракту дозволяє змінювати гучність усього каналу одразу, не змінюючи співвідношення між НЧ-, СЧ- та ВЧ-смугами після фільтрації.

Після регулювання рівня кожен канал подається на блоки розгалуження. Їхнє завдання — направити один і той самий сигнал на декілька паралельних гілок обробки. У трисмуговому режимі для кожного стереоканалу формуються три гілки: низькочастотна, середньочастотна та високочастотна. Таким чином, із двох вхідних каналів утворюється шість незалежних сигналів, які відповідають шести каналам підсилення.

Частотне розділення виконується FIR-фільтрами. Для низькочастотної смуги використовується фільтр нижніх частот із частотою зрізу 300 Гц. Середньочастотний канал формується смуговим фільтром у межах приблизно від 300 Гц до 3 кГц. Високочастотний канал проходить через фільтр верхніх частот із нижньою межею 3 кГц.

Сформовані після фільтрації сигнали призначаються на окремі виходи DSP-проекту. Для трисмугової стереосистеми використовуються шість вихідних каналів: три для лівої акустичної системи та три для правої. Кожен вихід відповідає окремому каналу ЦАП і надалі подається на власний підсилювач потужності.

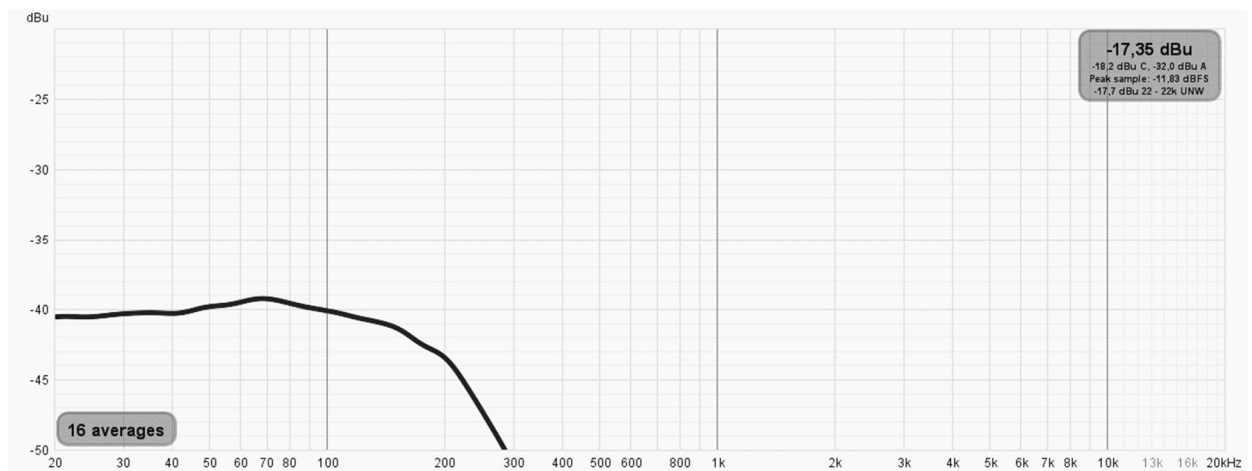


Рисунок 4.3 — графік АЧХ вихідного НЧ-каналу

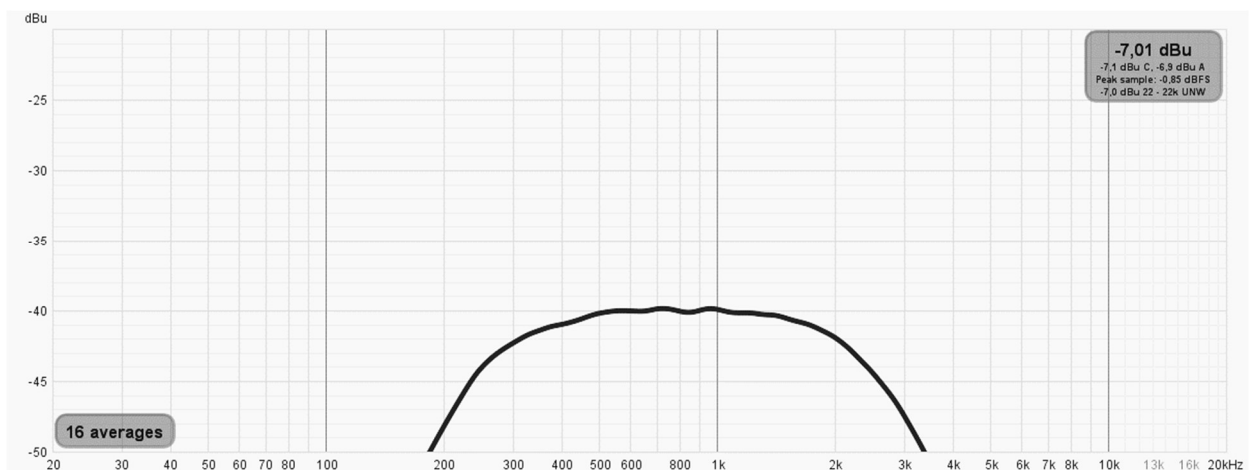


Рисунок 4.4 — графік АЧХ вихідного СЧ-каналу

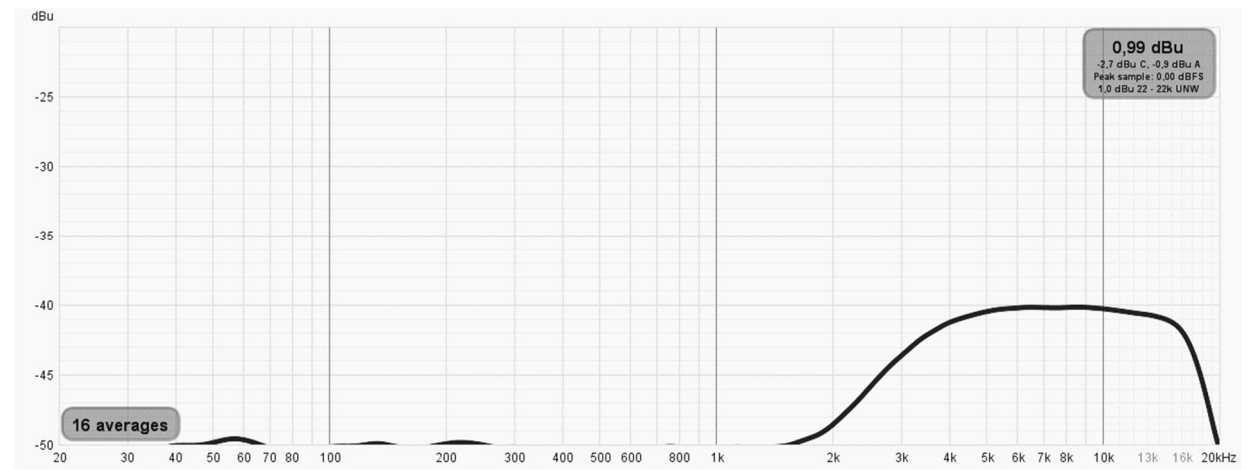


Рисунок 4.5 — графік АЧХ вихідного ВЧ-каналу

Алгоритм підтримує три режими роботи. У трисмуговому режимі активні всі гілки обробки: НЧ, СЧ і ВЧ, тому з вхідного стереосигналу формується шість вихідних каналів. У двосмуговому режимі СЧ-фільтр вимикається, його вихід стає неактивним, а НЧ- та ВЧ-фільтри працюють з іншими частотами зрізу відповідно до двосмугової акустичної системи. У широкосмуговому режимі СЧ- та ВЧ-гілки вимикаються, їхні виходи не використовуються, а НЧ-гілка переходить у режим bypass, тобто пропускає повний спектр сигналу без частотного розділення.

Правильність роботи алгоритму перевірено за амплітудно-частотними характеристиками вихідних каналів. Для низькочастотного виходу характеристика має спад після 300 Гц. Середньочастотний канал має смугу пропускання між 300 Гц і 3 кГц. Високочастотний вихід пропускає сигнал вище 3 кГц і пригнічує нижню частину спектра. Отримані графіки, зображені на рисунках 4.3 – 4.6, підтверджують правильну роботу фільтрів і коректне призначення виходів.

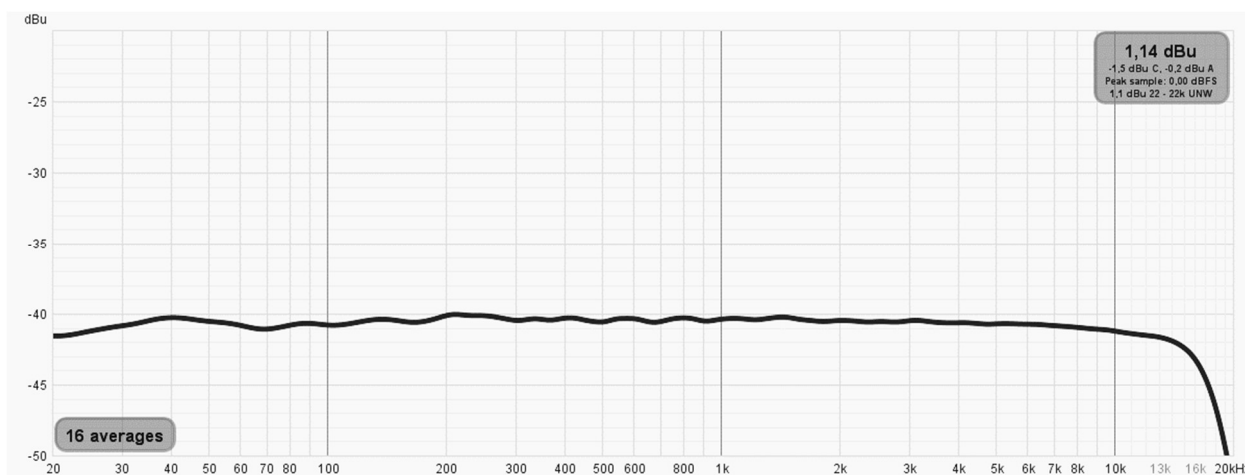


Рисунок 4.6 — Частотна характеристика просумованих вихідних каналів

Вимірювання амплітудно-частотних характеристик виконувалося із використанням зовнішньої звукової карти, параметри якої не є ідеальними. Через це на отриманих графіках можуть спостерігатися незначні відхилення рівня, нерівномірність характеристики та спад у крайніх ділянках частотного діапазону. Такі похибки пов'язані з обмеженнями вимірювального тракту і не змінюють загального висновку щодо правильності роботи алгоритму цифрового розділення сигналу.

Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата

РЕ21.468731.001 ПЗ

Лис
37

4.3 Система керування підсилювачем

Основою системи є мікроконтролер ESP32, який взаємодіє з DSP-процесором ADAU1452 через інтерфейс SPI. Такий вибір є доцільним, оскільки мікроконтролер працює з логічними рівнями 3,3 В, які сумісні з керуючими входами ADAU1452, має достатню кількість GPIO для підключення кнопок, енкодера та дисплея, а також забезпечує достатню швидкодію для передавання параметрів у DSP.

Підключення ESP32 до ADAU1452 виконується через SPI-лінії MOSI, MISO, SCLK та CS. Через цей інтерфейс мікроконтролер записує дані у відповідні комірки пам'яті DSP. У середовищі SigmaStudio кожному елементу алгоритму відповідають власні адреси та значення параметрів. Після компіляції проєкту ці дані можуть бути використані в прошивці ESP32 як таблиця адрес і значень для керування фільтрами, рівнями сигналу та режимами маршрутизації.

Користувацьке керування реалізується за допомогою енкодера та кнопок. Енкодер використовується для вибору параметра або зміни його значення, а кнопки — для переходу між пунктами меню, підтвердження вибору та перемикання режимів роботи. Наприклад, при зміні частоти зрізу НЧ-фільтра ESP32 визначає вибране значення, знаходить у таблиці відповідні параметри для цього фільтра і передає їх у потрібні адреси ADAU1452. Після цього DSP починає працювати з оновленими коефіцієнтами без зміни апаратної частини пристрою.

На дисплей виводяться поточний режим роботи, вибрані частоти розділення, рівні каналів та інші основні параметри. Це дозволяє користувачу контролювати стан пристрою без використання SigmaStudio після початкового налаштування. Таким чином, ESP32 виконує роль автономного контролера, який приймає команди від органів керування, перетворює їх у набір параметрів та передає до DSP.

					<i>PE21.468731.001 ПЗ</i>	Лис
						38
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

Апаратна частина системи керування побудована на налагоджувальній платі ESP32-WROOM-32, що зображена на рисунку 4.7. Її використання спрощує реалізацію пристрою, оскільки на ній уже передбачені стабілізатор живлення, USB-інтерфейс для прошивки, кнопки запуску та скидання, а також необхідна обв'язка мікроконтролера. Це зменшує кількість додаткових елементів на платі керування та спрощує налагодження програмної частини.

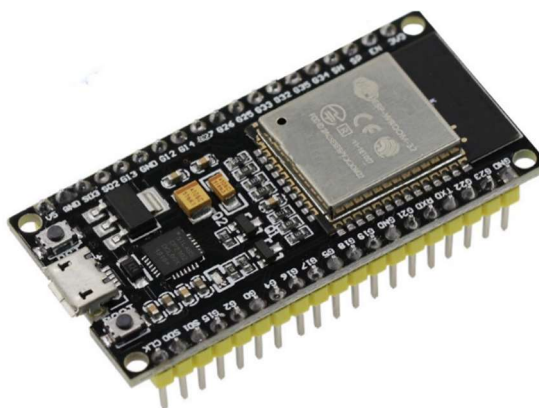


Рисунок 4.7 — Налагоджувальна плата ESP32-WROOM-32.

OLED-дисплей використовується як основний елемент індикації. На ньому відображаються поточний режим роботи підсилювача, вибрані частоти розділення, рівні каналів, стан Mute та активний пункт меню. Діагональ 2,42 дюйма та з роздільною здатністю 128x64 пікселів є достатньою для чіткого виведення інформації без перевантаження передньої панелі пристрою. Дисплей підключається до ESP32 через інтерфейс I2C, що дозволяє передавати дані лише двома сигнальними лініями SDA і SCL.. Дисплей зображений на рисунку 4.8.



Рисунок 4.8 — OLED-дисплей.

					<i>PE21.468731.001 ПЗ</i>	Лис
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		39

Основним органом керування є енкодер. Його обертання використовується для переміщення по меню або зміни числових параметрів, а натискання — для входу в пункт меню або підтвердження вибору. Додаткові кнопки використовуватися для перемикання режимів роботи, увімкнення Mute та виклику головного меню. Така схема керування дозволяє обійтися невеликою кількістю органів на передній панелі, але зберегти доступ до всіх основних налаштувань.



Рисунок 4.9 — Енкодер та кнопки.

Логіка роботи інтерфейсу побудована навколо головного екрана та меню налаштувань. У звичайному режимі дисплей показує поточну конфігурацію підсилювача. Після натискання енкодера користувач переходить у меню, де може вибрати режим роботи: широкосмуговий, двосмуговий або трисмуговий. Після вибору режиму відкриваються відповідні параметри: частоти зрізу, рівні НЧ-, СЧ- і ВЧ-каналів, затримки та службові функції.

Зміна параметра виконується покроково. Користувач обирає потрібний пункт меню, обертанням енкодера встановлює значення, після чого підтверджує його натисканням. Після підтвердження ESP32 передає нове значення до DSP та оновлює інформацію на дисплеї.

Для збереження налаштувань після вимкнення живлення ESP32 використовує внутрішню енергонезалежну пам'ять. У ній зберігається останній вибраний режим, частоти розділення та інші параметри. Після наступного увімкнення мікроконтролер зчитує ці значення, відновлює стан меню на дисплеї та передає необхідні параметри до ADAU1452.

					<i>PE21.468731.001 ПЗ</i>	Лис
						40
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

5 РОЗРОБКА СИСТЕМИ ЖИВЛЕННЯ ПРИСТРОЮ

5.1 Аргументація схемотехнічних рішень

Для живлення підсилювальних каналів використовується лінійне двополярне джерело на базі двох тороїдальних трансформаторів 2×24 В потужністю 120 ВА кожен. Такий варіант обрано для силової аналогової частини через відсутність високочастотної комутації, характерної для імпульсних блоків живлення. Це зменшує ризик проникнення завад у сигнальний тракт через лінії живлення, землю та паразитні зв'язки між вузлами. Після випрямлення напруга вторинних обмоток становить приблизно $\pm 32 \dots 34$ В без навантаження, що відповідає робочому діапазону TDA7293 для отримання вихідної потужності близько 50 Вт на канал при навантаженні 8 Ом. Використаний трансформатор зображений на рисунку 5.1.



Рисунок 5.1 — Використаний тороїдальний трансформатор

Використання двох окремих трансформаторів дозволяє розділити живлення лівої та правої сторони підсилювача. Це зменшує взаємний вплив каналів через спільні силові ланцюги, особливо при нерівномірному навантаженні. Тороїдальна конструкція трансформаторів обрана через компактність, високий ККД і менший рівень розсіювання магнітного поля порівняно з Ш-подібними трансформаторами, що важливо для зниження наведень у малосигнальних колах.

					РЕ21.468731.001 ПЗ	Лис
						41
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

Для фільтрації напруги живлення використовуються електролітичні конденсатори великої ємності. У системі передбачається використання восьми конденсаторів по 22000 мкФ, що забезпечує сумарну ємність 44000 мкФ на кожне плече живлення. Велика ємність фільтруючих конденсаторів дозволяє зменшити пульсації після випрямлення та забезпечити запас енергії при значних імпульсних навантаженнях низькочастотних каналів.

Сумарна потужність силових трансформаторів становить:

$$S_{\text{заг}} = 2 \cdot 120 = 240 \text{ ВА}$$

При орієнтовному ККД $\eta \approx 0,6$ довготривала вихідна потужність, яку може забезпечити силовий блок живлення, становить:

$$P_{\text{вих}} \approx S_{\text{заг}} \cdot \eta \approx 240 \cdot 0,6 \approx 144 \text{ Вт}$$

На перший погляд це менше за сумарну встановлену потужність шести каналів:

$$P_{\text{каналів}} = 6 \cdot 50 = 300 \text{ Вт}$$

Однак режим 6×50 Вт відповідає одночасній тривалій роботі всіх каналів на максимальній синусоїдальній потужності. Для реального музичного сигналу такий режим не є типовим, оскільки він має змінну амплітуду, паузи та короткочасні піки. Його середня потужність значно нижча за пікову. Крім того, у трисмуговій системі потужність між каналами розподіляється нерівномірно. Найбільше навантаження припадає на низькочастотні канали, тоді як середньо- та високочастотні канали споживають меншу середню потужність.

Фільтрувальні конденсатори великої ємності накопичують енергію в шинах живлення та віддають її під час різких імпульсів струму, зменшуючи просадки напруги при динамічному навантаженні.

Таким чином, силовий блок живлення потужністю 240 ВА є достатнім для роботи підсилювача з музичним сигналом. Таке рішення обґрунтоване нерівномірним розподілом навантаження між смугами та великим запасом фільтрувальної ємності. Його потужності не вистачило б лише для лабораторного режиму безперервного синусоїдального сигналу 6×50 Вт.

					РЕ21.468731.001 ПЗ	Лис
						42
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

У схемі блока живлення також передбачені розрядні резистори номіналом 2,2 кОм. Вони підключені між відповідними шинами живлення та загальною точкою GND і призначені для розряду фільтрувальних конденсаторів після вимкнення пристрою. При напрузі одного плеча близько 34 В потужність розсіювання — близько 0,53 Вт. Для цього вузла обрано резистори потужністю 5 Вт, що забезпечує значний запас за потужністю та дозволяє зберегти нормальний температурний режим під час тривалої роботи блока живлення.

$$P = \frac{U^2}{R} = \frac{34^2}{2200} \approx 0,53 \text{ Вт} \quad (1)$$

Час зниження напруги з 34 В до 5 В становить:

$$t = R \cdot C \cdot \ln \frac{U_0}{U} = 96,8 \cdot \ln \frac{34}{5} \approx 185 \text{ с} \approx 3,1 \text{ хв}$$

Практично повний розряд конденсаторів приймають приблизно за 5τ :

$$t \approx 5\tau = 5 \cdot 96,8 \approx 484 \text{ с} \approx 8 \text{ хв}$$

Окремо від силового живлення підсилювачів використовується малопотужний імпульсний блок живлення з вихідною напругою 5 В та струмом 2 А для DSP-модуля, мікроконтролера та дисплея. У цьому випадку імпульсне джерело є доцільним, оскільки цифрова частина споживає невелику потужність і потребує стабілізованої низької напруги, а її живлення відокремлене від силових ланцюгів підсилювальних каскадів. БЖ зображений на рисунку 5.2



Рисунок 5.2 — Імпульсний БЖ потужністю 10W

					РЕ21.468731.001 ПЗ	Лис
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		43

5.2 Електрична принципова схема силового блока живлення

Електрична принципова схема силового блока живлення містить вхідний роз'єм J1, діодний міст D1, фільтруючі конденсатори, розрядні резистори та вихідний роз'єм J2. Схема зображена на рисунку 5.3.

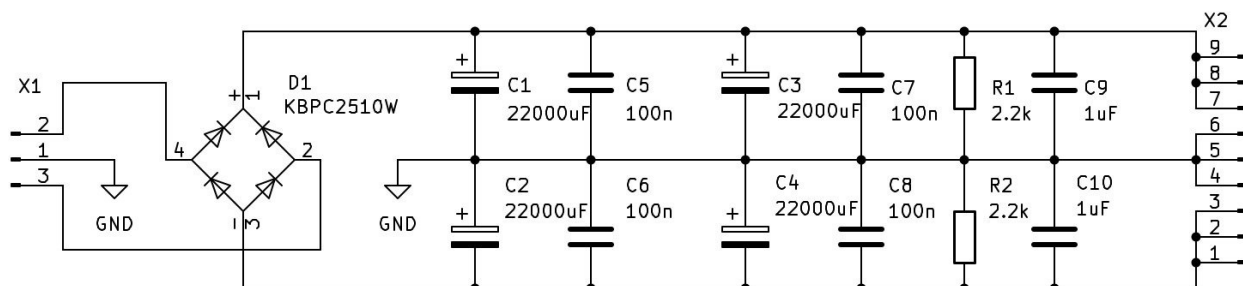


Рисунок 5.3 — Електрична принципова схема силового БЖ

Роз'єми використовуються Molex Mini-Fit. На X1 підключається вторинна обмотка трансформатора із середньою точкою: крайні виводи подаються на діодний міст, а середня точка формує загальну шину GND. Діодний міст KBPC2510W, що зображений на рисунку 5.4, виконує випрямлення змінної напруги та формує позитивне і негативне плечі живлення відносно загальної точки.

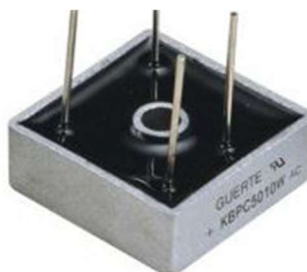


Рисунок 5.4 — Діодний міст KBPC2510W

Після випрямляча встановлено основні фільтрувальні конденсатори C1–C4 ємністю 22000 мкФ, що зображені на рисунку 5.5. C1 і C3, працюють у позитивному плечі живлення, C2 і C4 — у негативному. Паралельно до них підключені плівкові конденсатори C5–C8 номіналом 100 нФ для високочастотного шунтування. Плівкові конденсатори C9 і C10 номіналом 1 мкФ покращують фільтрацію в області частот, де електролітичні конденсатори через власні паразитні параметри працюють менш ефективно. Плівкові конденсатори малої ємності зображені на рисунку 5.6.

Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата

PE21.468731.001 ПЗ

Лис
44

Резистори R1 і R2 номіналом 2,2 кОм підключені між відповідними плечами живлення та загальною шиною.

Вихід живлення виведено на роз'єм X2. Контакти шин +VS, GND та -VS продубльовані, що зменшує перехідний опір з'єднання і підвищує допустимий струм через роз'єм. Це важливо, оскільки від цього вузла живляться декілька підсилювальних модулів, а струмове навантаження може змінюватися залежно від рівня вихідного сигналу.



Рисунок 5.5 — Фільтруючі конденсатори великої ємності

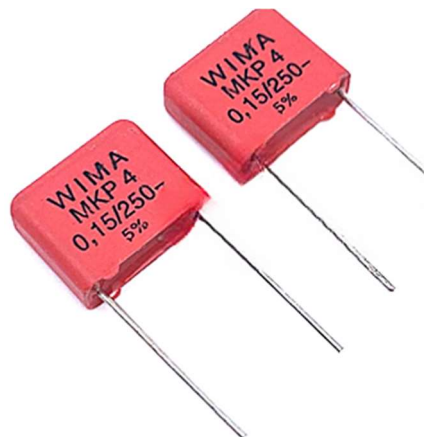


Рисунок 5.6 — Плівкові конденсатори малої ємності

					РЕ21.468731.001 ПЗ	Лис
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		45

5.3 Друкована плата силового блока живлення

Плата виконана односторонньою. Усі основні провідники розміщені на одному шарі, що спрощує виготовлення плати. Для механічного кріплення плати передбачені монтажні отвори М3. Широкі провідники зменшують падіння напруги, нагрівання доріжок і паразитний опір у колах живлення.

Вхідний роз'єм і діодний міст розміщені на одному краю плати, що зменшує довжину ділянки змінної напруги до випрямляча. Після діодного моста живлення подається на фільтрувальні конденсатори великої ємності.

Шунтувальні конденсатори С5–С8 розміщені безпосередньо біля основних електролітичних конденсаторів. Це забезпечує високочастотне шунтування шин живлення без довгих з'єднань. Конденсатори С9 і С10 номіналом 1 мкФ встановлені ближче до вихідного роз'єму J2, тобто безпосередньо перед подачею живлення на підсилювальні модулі.

Розрядні резистори R1 і R2 розміщені біля вихідної частини плати та підключені між відповідними шинами живлення і загальною точкою.

На рисунку 5.7 зображене трасування друкованої плати, на рисунку 5.8 — її 3D-візуалізація.

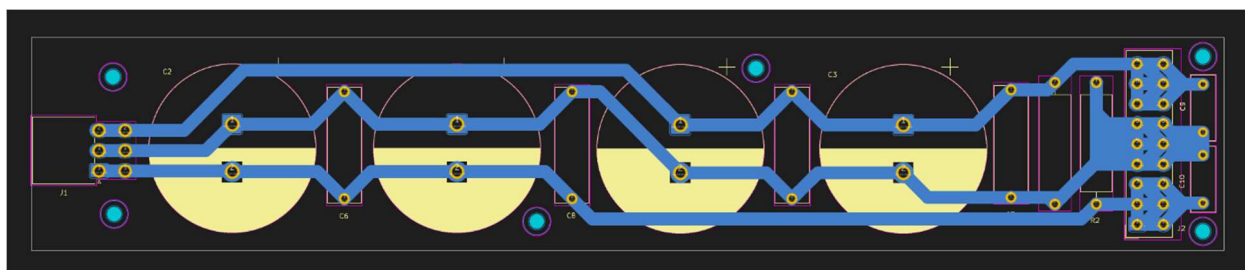


Рисунок 5.7 — Трасування нижнього шару друкованої плати БЖ

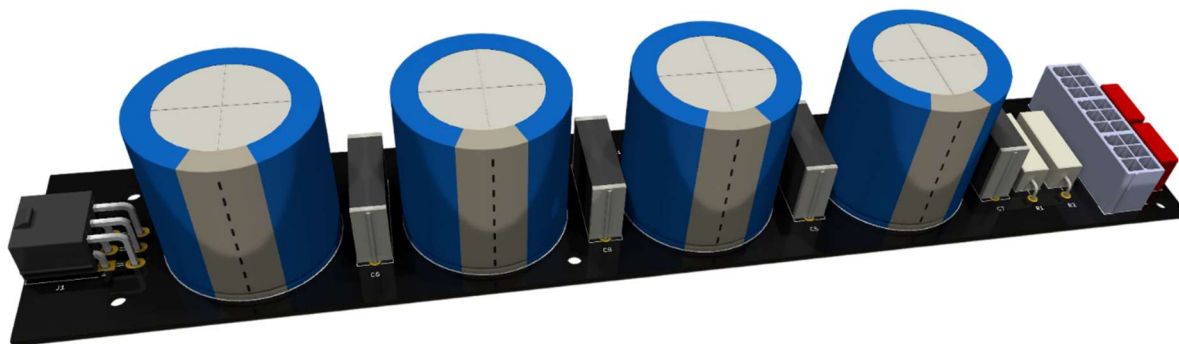


Рисунок 5.8 — 3D-візуалізація друкованої плати БЖ

					РЕ21.468731.001 ПЗ	Лис
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		46

6 РОЗРОБКА КОРПУСУ ПРИСТРОЮ

Корпус розроблюваного підсилювача призначений для розміщення силової, цифрової та керуючої частин пристрою в межах єдиної конструкції, а також для забезпечення належного теплового режиму, механічної жорсткості та зручності експлуатації. Конструктивно корпус виконано у форматі настільного аудіопристрою з горизонтальним компонуванням. Його форма орієнтована на розміщення всіх основних вузлів у межах компактного об'єму при збереженні достатньої площі для охолодження.

Основою конструкції є металевий корпус з передньою, задньою, верхньою та нижньою панелями. Бічні частини виконані у вигляді розвинених ребристих радіаторів, які одночасно є елементами корпусу і тепловідвідними поверхнями для підсилювальних мікросхем. Таке рішення дозволяє без окремих внутрішніх радіаторних вузлів відводити тепло безпосередньо на зовнішні поверхні корпусу, що спрощує конструкцію та підвищує ефективність охолодження. З урахуванням того, що всі канали підсилення реалізовані на TDA7293 і працюють у класі АВ, відведення тепла через бічні радіатори є одним із ключових конструктивних рішень.

Для додаткового поліпшення вентиляції у верхній кришці передбачені ряди вентиляційних прорізів. Їх розміщення забезпечує природний відвід нагрітого повітря з внутрішнього об'єму корпусу. У поєднанні з бічними радіаторами це формує пасивну систему охолодження без застосування вентиляторів, що є доцільним для аудіопристрою, оскільки дозволяє уникнути акустичного шуму та додаткових джерел вібрацій.

Передня панель орієнтована на взаємодію з користувачем. На ній розміщено дисплей, кнопки швидкого керування та енкодер. Елементи керування згруповані в одній функціональній зоні, що покращує ергономіку користування.

Задня панель використовується для підключення зовнішніх ліній. На ній розміщено силовий мережевий роз'єм, акустичні виходи та сигнальні роз'єми. Таке розташування є типовим для стаціонарної аудіоапаратури й дозволяє

					РЕ21.468731.001 ПЗ	Лис
						47
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

відокремити користувацьку зону керування від комутаційної зони. Акустичні клеми згруповані компактно, що відповідає багатоканальній структурі підсилювача та спрощує підключення каналів НЧ, СЧ і ВЧ.

Нижня частина корпусу встановлюється на опорні ніжки, які забезпечують стійкість пристрою, формують зазор між корпусом і поверхнею встановлення та частково зменшують передавання вібрацій. Наявність нижнього зазору також покращує умови природної вентиляції та охолодження.

Отже, конструкція корпусу виконує не лише механічну, а й функціональну роль, забезпечуючи охолодження, зручність керування, правильне розміщення роз'ємів і можливість інтеграції всіх вузлів багатоканального DSP-підсилювача в межах одного завершеного пристрою. Корпус зображено на рисунках 6.1 – 6.3.



Рисунок 6.1 — 3D-рендер корпусу (1)



Рисунок 6.2 — 3D-рендер корпусу (2)



Рисунок 6.3 — 3D-рендер корпусу (3)

ВИСНОВКИ

У результаті виконання дипломного проєкту було підтверджено доцільність побудови багатоканального підсилювача з вбудованою DSP-обробкою сигналу. Аналіз способів розділення аудіосигналу показав, що цифровий кросовер має більшу гнучкість порівняно з аналоговими фільтрами, оскільки дозволяє змінювати частоти зрізу, рівні каналів і режими роботи програмно, без зміни апаратної частини.

Встановлено, що для багатосмугової акустичної системи важливим є не лише розділення сигналу за частотами, а й часове узгодження окремих смуг. Тому в проєкті обрано FIR-фільтрацію, яка дозволяє отримати лінійну фазочастотну характеристику та забезпечити однакову групову затримку для НЧ-, СЧ- і ВЧ-каналів.

Перевірка амплітудно-частотних характеристик підтвердила правильне формування повносмугового, низькочастотного, середньочастотного та високочастотного каналів. Це показує, що розроблений DSP-алгоритм може використовуватися для роботи пристрою у стерео-, двосмуговому та трисмуговому режимах.

Обрані технічні рішення відповідають вимогам проєкту. DSP-тракт на ADAU1452 та AD1938 забезпечує необхідну кількість каналів і продуктивність для цифрової обробки сигналу. Підсилювальна частина на TDA7293 забезпечує потужність близько 50 Вт на канал, а система живлення з двома тороїдальними трансформаторами та великою ємністю фільтрувальних конденсаторів є достатньою для роботи з реальним музичним сигналом.

Система керування на ESP32-WROOM-32 дозволяє змінювати режими роботи, частоти розділення та рівні каналів без підключення до комп'ютера. Отже, запропонований пристрій є завершеним технічним рішенням активного DSP-керованого підсилювача для широкосмугових, двосмугових і трисмугових акустичних систем.

					<i>PE21.468731.001 ПЗ</i>	Лис
						50
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Angus J. Acoustics and Psychoacoustics / J. Angus, D. M. Howard. — 5th ed. — London : Routledge, 2017. — 468 p.
2. Rohde & Schwarz. Tests of Audio Amplifiers in Accordance with Standard IEC 60268-3 : Application Note. URL: https://www.rohde-schwarz.com/applications/tests-of-audio-amplifiers-in-accordance-with-standard-iec-60268-3-application-note_56280-15446.html (дата звернення: 12.06.2026).
3. Room EQ Wizard. REW V5 Help : user manual. URL: https://www.roomeqwizard.com/rewv5_help.pdf (дата звернення: 12.06.2026).
4. AudioJudgement. Passive crossover schematic types. URL: <https://audiojudgement.com/passive-crossover-schematic-types/> (дата звернення: 12.06.2026).
5. Analog Devices. Basic Linear Design. Chapter 8: Analog Filters. URL: <https://www.analog.com/media/en/training-seminars/design-handbooks/basic-linear-design/chapter8.pdf> (дата звернення: 12.06.2026).
6. Smith S. W. The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing / S. W. Smith. — San Diego : California Technical Publishing, 1997. — 626 p. URL: <https://www.dspguide.com/pdfbook.htm> (дата звернення: 12.06.2026).
7. Oppenheim A. V. Discrete-Time Signal Processing / A. V. Oppenheim, R. W. Schaffer. — 3rd ed. — Upper Saddle River : Pearson, 2010. — 1120 p.
8. Lyons R. G. Understanding Digital Signal Processing / R. G. Lyons. — 3rd ed. — Boston : Prentice Hall, 2011. — 992 p.
9. Smith J. O. Direct Form II // Introduction to Digital Filters with Audio Applications. URL: https://www.dsprelated.com/freebooks/filters/Direct_Form_II.html (дата звернення: 12.06.2026).
10. VHDLwhiz. Part 2: Finite Impulse Response FIR Filters. URL: <https://vhdlwhiz.com/part-2-finite-impulse-response-fir-filters/> (дата звернення: 12.06.2026).

					РЕ21.468731.001 ПЗ	Лис
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		51

11. BlanchardJ. FIR Filter.svg : схема структури FIR-фільтра. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A4%D0%B0%D0%B9%D0%BB:FIR_Filter.svg (дата звернення: 12.06.2026).

12. Dayton Audio. DSP-408 4x8 DSP Digital Signal Processor for Home and Car Audio. URL: <https://www.soundimports.eu/en/dayton-audio-dsp-408.html> (дата звернення: 12.06.2026).

13. Behringer. ULTRADRIVE PRO DCX2496 Loudspeaker Management System. URL: <https://www.behringer.com/en/products/0825-AAA> (дата звернення: 12.06.2026).

14. Hypex Electronics. FusionAmp FA123 with on-board SMPS. URL: <https://www.hypex.nl/products/amplifier-families/fusion-amplifier-family/fusionamp-fa123> (дата звернення: 12.06.2026).

15. Hypex FA501 1 x 500 Watt FusionAmp. URL: <https://www.nonsolospeakers.com/amplifier-modules/7670-hypex-fa501-1-x-500-watt-fusionamp.html> (дата звернення: 12.06.2026).

16. Facebook. Допис у групі щодо аудіоапаратури. URL: <https://www.facebook.com/groups/2262752904/posts/10164811238302905/> (дата звернення: 12.06.2026).

17. Analog Devices. ADAU1452 SigmaDSP Digital Audio Processor : datasheet. URL: <https://www.analog.com/en/products/adau1452.html> (дата звернення: 12.06.2026).

18. Analog Devices. AD1938 4 ADC/8 DAC with PLL, 192 kHz, 24-Bit Codec : datasheet. URL: <https://www.analog.com/en/products/ad1938.html> (дата звернення: 12.06.2026).

19. Analog Devices. EVAL-ADAU1452REVBZ Evaluation Board. URL: <https://www.analog.com/en/resources/evaluation-hardware-and-software/evaluation-boards-kits/eval-adau1452revbz.html> (дата звернення: 12.06.2026).

20. Analog Devices. SigmaStudio Graphical Development Tool : user documentation. URL: <https://wiki.analog.com/resources/tools-software/sigmastudio> (дата звернення: 12.06.2026).

					РЕ21.468731.001 ПЗ	Лис
						52
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

21. STMicroelectronics. TDA7293: 120 V, 100 W DMOS Audio Amplifier with Mute/Stand-By : datasheet. — STMicroelectronics, 2010. URL: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/tda7293.pdf> (дата звернення: 12.06.2026).

22. STMicroelectronics. TDA7293 Product Page. URL: <https://www.st.com/en/audio-ics/tda7293.html> (дата звернення: 12.06.2026).

23. Bigl.ua. Мікросхема TDA7293 DBS15. URL: <https://bigl.ua/ua/p2472716101-mikroshema-tda7293-dbs15> (дата звернення: 12.06.2026).

24. Vishay Dale. CMF Industrial Metal Film Resistors, Axial, Industrial, Precision : datasheet. — Vishay, 2025. URL: <https://www.vishay.com/docs/31018/cmfind.pdf> (дата звернення: 12.06.2026).

25. Audiophonics. Vishay Dale CMF50 Resistor 1 % 50 ppm 100 Ohm. URL: <https://www.audiophonics.fr/en/vishay-cmf50-resistors/vishay-dale-cmf50-resistor-1-50ppm-100ohm-p-10815.html> (дата звернення: 12.06.2026).

26. WIMA. MKP 10 Polypropylene Capacitors for Pulse Applications : datasheet. URL: https://www.wima.de/wp-content/uploads/media/e_WIMA_MKP_10.pdf (дата звернення: 12.06.2026).

27. Prom.ua. 100 nF 1000 V MKP10-100N/1K/S WIMA 22.5 mm. URL: <https://prom.ua/p1699406241-100nf-1000v-mkp10.html> (дата звернення: 12.06.2026).

28. JST. PH Connector 2.0 mm pitch wire-to-board connectors : datasheet. URL: <https://www.jst-mfg.com/product/pdf/eng/ePH.pdf> (дата звернення: 12.06.2026).

29. BeeGreen. Роз'єм 3 pin + гніздо з проводами ХН2.54-3Р. URL: <https://beegreen.com.ua/rozyem-3pin-gnizdo-z-provodami-xh254-3p-10362> (дата звернення: 12.06.2026).

30. Molex. Mini-Fit Jr. 4.20 mm Pitch Connector System : product specification. URL: <https://www.molex.com/content/dam/molex/molex-dot-com/products/automated/en-us/productspecificationpdf/555/5556/PS-5556-001-001.pdf> (дата звернення: 12.06.2026).

					<i>РЕ21.468731.001 ПЗ</i>	Лис
						53
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

31. IndiaMART. 3.00 mm Pitch Wire to Board Connectors, Micro Mini-Fit Wafer Power Connectors Molex/JAE/JST/JAE. URL: <https://www.indiamart.com/proddetail/3-00-mm-pitch-wire-to-board-connectors-micro-mini-fit-wafer-power-connectors-molex-jae-jst-jae-24032465912.html> (дата звернення: 12.06.2026).

32. Espressif Systems. ESP32-WROOM-32 Datasheet. — Espressif Systems, 2024. URL: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-wroom-32_datasheet_en.pdf (дата звернення: 12.06.2026).

33. Espressif Systems. ESP32-DevKitC V4 Getting Started Guide. URL: <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/v5.1/esp32/hw-reference/esp32/get-started-devkitc.html> (дата звернення: 12.06.2026).

34. Епіцентр. Модуль Wi-Fi ESP32 Bluetooth LuaNode32 WROOM Micro-USB 38 pin. URL: <https://epicentrk.ua/ua/shop/mplc-modul-wi-fi-esp32-bluetooth-luanode32-wroom-micro-usb-38pin-25793183-1f019598-3389-6b30-8a4b-1b3c69b2a722.html> (дата звернення: 12.06.2026).

35. LCDWiki. 2.42inch IIC OLED Module SKU: MC242GX. URL: https://www.lcdwiki.com/2.42inch_IIC_OLED_Module_SKU%3AMC242GX (дата звернення: 12.06.2026).

36. Reddit. Is this 2.42" OLED Display 5v Tolerant? : r/beneater. URL: https://www.reddit.com/r/beneater/comments/1rrtoj/is_this_242_oled_display_5v_tolerant/ (дата звернення: 12.06.2026).

37. Kraus O. U8g2 Reference Manual: Monochrome LCD, OLED and eInk Library. URL: <https://github.com/olikraus/u8g2/wiki/u8g2reference> (дата звернення: 12.06.2026).

38. Components101. KY-040 Rotary Encoder Module. URL: <https://components101.com/modules/KY-04-rotary-encoder-pinout-features-datasheet-working-application-alternative> (дата звернення: 12.06.2026).

39. РКС Компоненти. Енкодер EC11 з кнопкою, 20 імпульсів, 20 положень. URL: https://www.rcscomponents.kiev.ua/product/enkoder-ec11-z-knopkoiu-20-impulsiv-20-polozhen_171051.html (дата звернення: 12.06.2026).

					РЕ21.468731.001 ПЗ	Лис
						54
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

40. Arduino.ua. Тактова кнопка SMD 4 pin 6×6×11 мм, шток 7,5 мм. URL: <https://arduino.ua/prod6832-taktova-knopka-smd-4pin-6h6x11mm-shtok-7-5mm> (дата звернення: 12.06.2026).

41. Ворон. Трансформатор тороїдальний HDL-11-120 2×24 V. URL: https://voron.ua/ru/catalog/030310--transformator_toroidalnyy_hdl-11-120_224v (дата звернення: 12.06.2026).

42. Mean Well. IRM-10 Series 10 W AC-DC PCB-Mount Power Module : datasheet. URL: <https://www.meanwell.com/Upload/PDF/IRM-10/IRM-10-SPEC.PDF> (дата звернення: 12.06.2026).

43. Prom.ua. Безкорпусний блок живлення AC-DC, вхід 220 В, вихід 5 В 2 А, потужність 10 Вт. URL: <https://prom.ua/ua/p2325616390-beskorpusnyj-blok-pitaniya.html> (дата звернення: 12.06.2026).

44. Good-Ark Semiconductor. KBPC25xx/KBPC25xxW Bridge Rectifiers : datasheet. URL: https://goodarksemi.com/docs/datasheets/general_purpose_bridge_rectifiers/KBPC25xx-KBPC25xxW.pdf (дата звернення: 12.06.2026).

45. Ворон. Діодний міст KBPC5010W. URL: <https://voron.ua/catalog/006446--bridge-rectifier-kbpc5010w> (дата звернення: 12.06.2026).

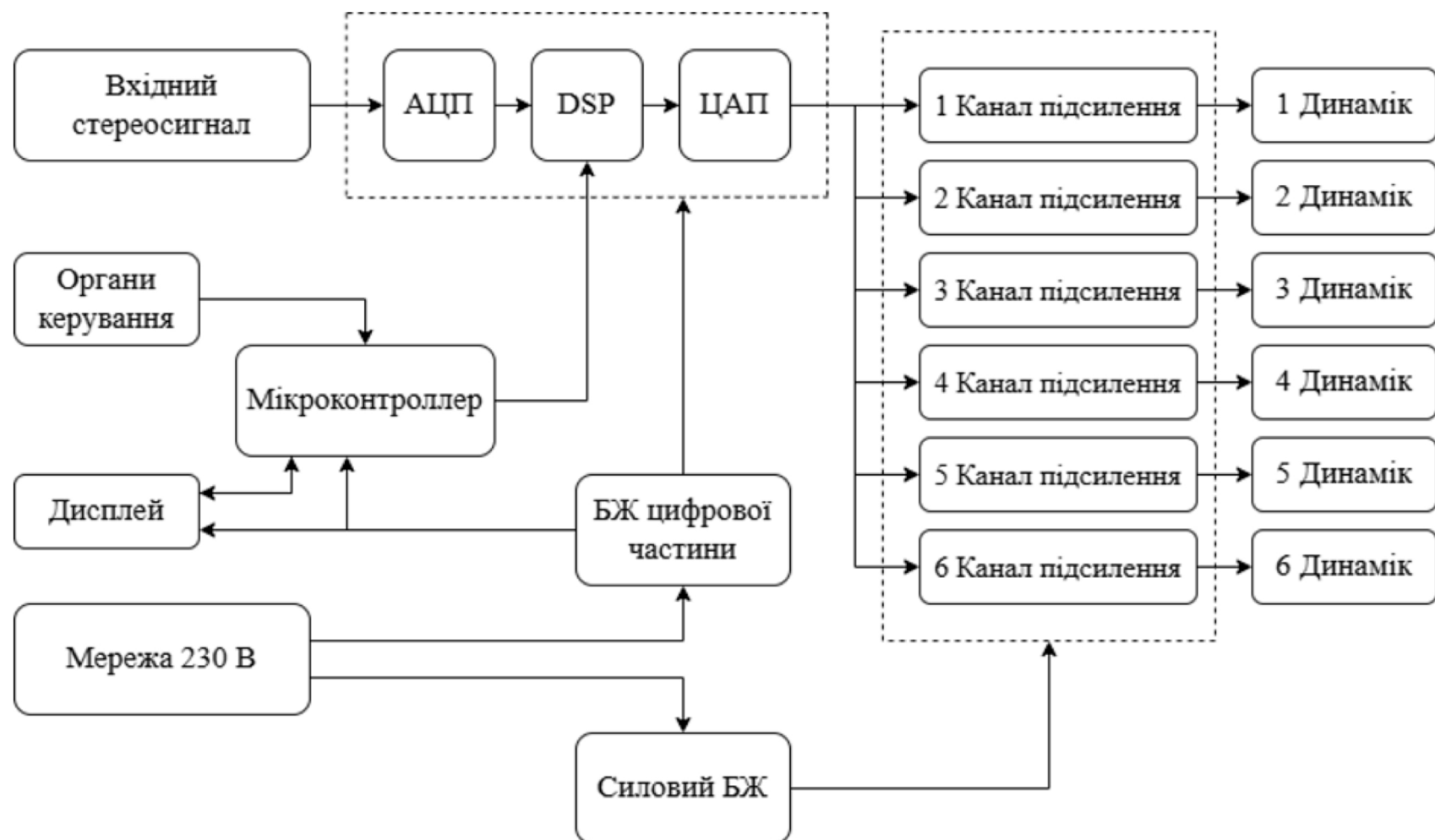
46. Nichicon. GU Series Aluminum Electrolytic Capacitors : datasheet. URL: <https://www.nichicon.co.jp/english/products/pdf/e-gu.pdf> (дата звернення: 12.06.2026).

47. MICRO-TECHNIK. Конденсатор CD294 680 uF 200 V 25×35 105 °C. URL: <https://m-teh.com.ua/ru/kondensator-cd294-680uf-200v-2535-105c/> (дата звернення: 12.06.2026).

48. eBay. Germany WIMA 630 V 682 0.0068 uF 6800 pF 6n8 5 % МКР10 Pitch 7.5 mm Film Capacitor. URL: <https://www.ebay.com/itm/394990099979> (дата звернення: 12.06.2026).

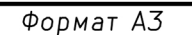
					РЕ21.468731.001 ПЗ	Лис
						55
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

Додаток А



					РЕ21.468731.001 Е1								
					Структурна схема пристрою					Літ.	Маса	Масштаб	
Зм.	Арк.	№докум.	Підп.	Дата									
Розроб.	Сугоняко І.В.												
Перев.													
Т.контр.													
										Аркуш 1	Аркушів	1	
Н.контр.										РЕ21, РТФ			
Затв.													

					РЕ21.468731.002 ЕЗ				
					Модуль підсилювача потужності Схема електрична принципова	Літ.	Маса	Масштаб	
Зм.	Арк.	№докум.	Підп.	Дата					
Розроб.	Сугоняко І.В.								
Перев.									
Т.контр.									
					Аркуш 1		Аркушів 1		
Н.контр.					РЕ21, РТФ				
Затв.									



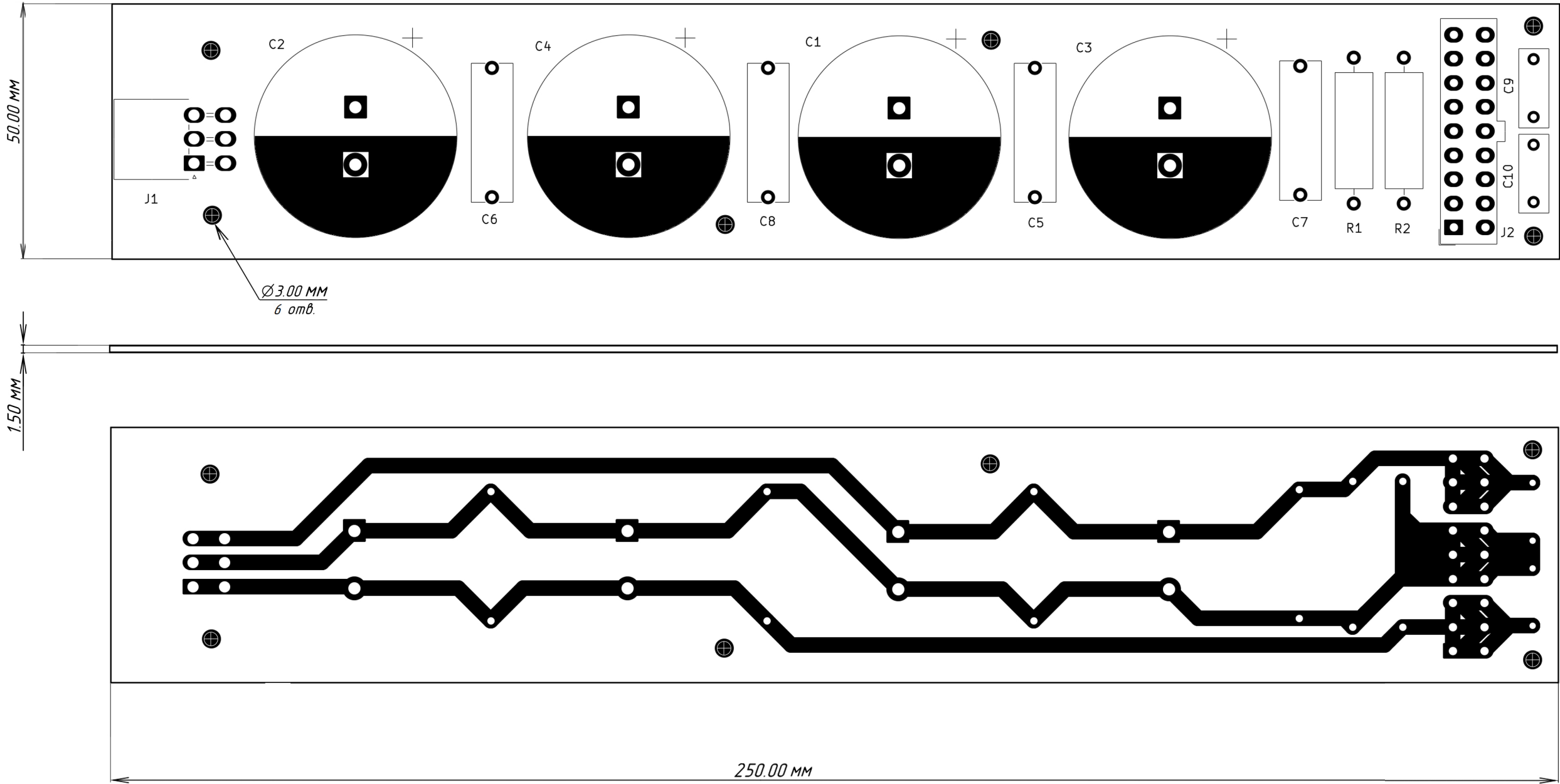
Додаток В

Первинне застосування	Поз. ПОЗН.	Найменування				Кільк.	Примітка
		<u>Резистори</u>					
	R1, R3	CMF5022K000FKEB (CMF-50 22кОм 1% 1/4 Вт), Vishay Dale				2	
	R2	CMF50680R00FHEA (CMF-50 680 Ом 1% 1/4 Вт), Vishay Dale				1	
	R4 - R6	CMF5010K000FKEB (CMF-50 10кОм 1% 1/4 Вт), Vishay Dale				3	
Довідковий №	R7	KLS6-SQP-5W-22R-J (KLS 22 Ом 5% 5 Вт), KLS				1	
		<u>Конденсатори</u>					
	C1	МКР1U034707G00MSSD (МКР10 470нФ, 2000В, ±20%), Wima				1	
	C2, C5	ECR220M50B (ECR 22 мкФ, 50 В ±10%), Hitano				1	
	C3 - C4	E5R100M50B (E5R 10 мкФ, 50 В, ±10%), Hitano				2	
	C6, C8	ECR102M50BA (ECR 1000 1000 мкФ, 50 В, ±10%), Hitano				2	
	C7, C9	GRM31C5C1H104JA01L (COG 100 Ф, 50 В, ±5%), MURATA				2	
Підпис і дата		<u>Мікросхеми</u>					
	DA1	TDA7293, STMicroelectronics				1	
Інв. № дубл.		<u>Роз'єми</u>					
Зам. інв. №	X2	B4B-PH-K-S (PH), JST				1	
	X1, X3	B2B-PH-K-S (PH), JST				2	
	X4	2125201006 (MAX), MOLEX				1	
	X5	2125201104 (MAX), MOLEX				1	
Підпис і дата							
Інв. № ориг.	Зм. Арк.	№ докум.	Підпис	Дат	РЕ21.468731.001ПЕЗ		
	Розроб.	Свгоняко І.			Модуль підсилювача потужності Перелік елементів		
	Перевір	Стещенко В. Д.					
	Т. контр						
	Н. конт						
Затв.					Літера	Аркуш	Аркушів
						1	4

Додаток Д

Первинне застосування		Поз. позн.	Найменування			Кільк.	Примітка		
			<u>Конденсатори</u>						
		C1 - C4	МКР4О131005D00KSSD (МКР4 100нФ, 1000В, ±10%), Wima			4			
		C5 – C8	ELP223M50BA (ELP 22000 мкФ, 50 В ±10%), Hitano			4			
		C9, C10	МКР4G041005I00JJ00 (МКР4 1 мкФ, 400 В, ±10%), Wima			2			
			<u>Діодні збірки</u>						
		VD1	KBPC2510W, YJ			1			
			<u>Резистори</u>						
		R1, R2	SQP50JB-2K2R (SQP 2.2 кОм 5% 5 Вm), Hitano			2			
			<u>Роз'єми</u>						
		X1	2125201006 (MAX), MOLEX			1			
		X2	460151802 (PLUS), MOLEX			1			
</									

Додаток Е



					РЕ21.468731.005										
					Силовий блок живлення Друкована плата					Літ.		Маса	Масштаб		
Зм.	Арк.	№докум.	Підп.	Дата											
Розроб.		Сугоняко І.В.													
Перев.		Стещенко В. Д.													
Т.контр.										Аркуш 1		Аркушів 1			
Н.контр.										РЕ21, РТФ					
Затв.															