

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

Радіотехнічний факультет

Кафедра радіоконструювання та виробництва радіоапаратури

До захисту допущено:

в.о. зав.кафедри

 Євгеній НЕДІН

«__» _____ 20__ р.

Дипломний проєкт

на здобуття ступеня бакалавра

за освітньо-професійною програмою «Інтелектуальні технології
мікросистемної радіоелектронної техніки»

за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

на тему: Інструментальна цифрова радіостанція

Виконав:

студент IV курсу, групи РІ-71

Білуха Василь Сергійович

Прізвище, ім'я, по батькові

Керівник: асистент Зінгер Яна Леонідівна

Посада, науковий ступінь, вчене звання,

Прізвище, ім'я, по батькові

Рецензент Бондаренко Геннадій Іванович

Посада, науковий ступінь, вчене звання,




Прізвище, ім'я, по батькові

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

Київ – 2021 року

ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЄКТУ

№ з/п	Формат	Позначення	Найменування	Кількість листів	Примітка
1	A4	PI71.464415.001.T3	Завдання на дипломний проєкт	2	
2	A4	PI71.464415. 001 ПЗ	Пояснювальна записка	54	
3	A3	PI71.464415.001 E1	Схема електрична структурна передавача	1	
4	A3	PI71.464415.002 E1	Схема електрична структурна приймача	1	
5	A1	PI71.464415.001 E3	Схема електрична принципова передавача	1	
	A1	PI71.464415.002 E3	Схема електрична принципова приймача	1	
	A3	PI71.758724.001	Плата передавача	1	
	A3	PI71.758724.002	Плата приймача	1	
	A3	PI71.464415.001 СК	Друкований вузол передавача	1	
	A3	PI71.464415.002 СК	Друкований вузол приймача	1	

				PI71.464415.001		
	ПІБ	Підп.	Дата	Інструментальна цифрова радіостанція		
Розробн.	Білуха В.С.					
Керівн.	Зінгер Я. Л.					
Н/контр.						
Зав.каф.	Нелін Є. А.					
				Лист		Листів
				1		1
				КПІ ім. Ігоря Сікорського Каф. КіВРА, гр. ПІ-71		

**Пояснювальна записка
до дипломного проєкту
на тему: Інструментальна цифрова радіостанція**

Київ – 2021 року

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

Радіотехнічний факультет

Кафедра радіоприймання та оброблення сигналів

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Освітньо-професійна програма «Інтелектуальні технології мікросистемної радіoeлектронної техніки»

ЗАТВЕРДЖУЮ

в.о.зав. кафедри



Євгеній НЕЛІН

«__» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проєкт студенту

Білує Василю Сергійовичу

1. Тема проєкту «Інструментальна цифрова радіостанція», керівник проєкту Зінгер Яна Леонідівна, асистент, затверджені наказом по університету від «18» травня 2021 р. № 1205-с

2. Термін подання студентом проєкту 09 червня 2021 року

3. Вихідні дані до проєкту: Напруга живлення передавача +3,7 В, напруга живлення приймача +9 В. Частота передвчі сигналу 2,4 ГГц. 24-бітний АЦП, частота дискретизації 48 кГц.

4. Зміст пояснювальної записки: Вступ, огляд аналогів, складання структурних схем, вибір схемотехнічного рішення, проектування друкованого вузла проектування корпусів для частин приладу, висновки.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо. Схема структурна передавача, схема структурна приймача, схема електрична принципова передавача, схема електрична принципова приймача, кресленик друкованої плати передавача, кресленик друкованої плати приймача, кресленик друкованого вузла передавача, кресленик друкованого вузла приймача.

6. Дата видачі завдання 12 квітня 2021 року _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту	Термін виконання етапів проєкту	Примітка
	Огляд та аналіз аналогів, та готових рішень	12.04.2021р.-19.04.2021р.	
	Складання структурних схем частин приладу	20.04.2021р.-26.04.2021р	
	Складання схеми електричної принципової передавача. Розрахунок ОП та ФНЧ	27.04.2021р.-02.05.2021р	
	Складання схеми приймача	03.05.2021р.-08.05.2021р	
	Вибір елементної бази	09.05.2021р.-16.05.2021р	
	Розробка друкованих вузлів передавача та приймача	17.05.2021р.-24.05.2021р	
	Розробка конструкції та дизайну частини приладу	25.05.2021р.-31.05.2021р	
	Виготовлення графічних матеріалів	01.06.2021р.- 03.06.2021р	

Студент

Білуха В.С.

Керівник

Зінгер Я.

АНОТАЦІЯ

Дипломний проект складається з пояснювальної записки обсягом 55 сторінок, включає 30 рисунків, 9 таблиць, 8 креслень, 14 посилань, 6 додатків.

Ключові слова: Цифрова, сигнал, музична апаратура, радіосистема, звук, ESP WROOM-32, nRF2401L, передача даних, підсилювач, АЦП, ЦАП, ФНЧ.

У дипломному проекті розроблено інструментальну цифрову радіостанцію. Особливістю даного приладу є те що, живиться передавач від акумулятора, та розроблений власний дизайн, як передавача, так і приймача.

Проведено огляд та аналіз аналогів. Враховуючи їх переваги та недоліки, спроектовано схему та конструкцію радіостанції. Розроблено структурні та електричні принципові схеми передавача та приймача, проведено вибір елементної бази, розроблено друковані плати. Розроблено дизайн та конструкції частин пристрою.

ANNOTATION

The thesis project consists of a 55-page explanatory note including 30 drawings, 9 tables, 8 drawings, 14 references, 6 additions. Keywords: digital, signal, music equipment, radio system, sound, ESP WROOM-32, nRF2401L, data transmission, amplifier, ADC, DAC, LPF.

The thesis project has developed an instrumental digital radio station. The special feature of this device is that the transmitter from the accumulator is powered, and the design of the transmitter and receiver is developed.

The analogues were reviewed and analysed. Given their advantages and disadvantages, the design and design of the radio station has been carried out. Structural and electrical main circuits of the transmitter and receiver were developed, the selection of the element base has been made, and printed circuit boards have been developed. The design and construction of parts of the device has been developed.

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
до дипломного проекту

на тему: «Інструментальна цифрова радіостанція»

Київ — 2021 року

ЗМІСТ

Перелік скорочень.....	8
Вступ.....	9
1 Огляд аналогів	10
1.1 Огляд аналогів	10
1.1.1 LINE6 Relay G30	10
1.1.2 AKG DMS100 Inst Set	12
2 Складання структурних схем частин приладу	14
2.1 Передавач.....	14
2.2 Приймач	14
3 Вибір схемотехнічного рішення.....	16
3.1 Складання схеми передавача	16
3.1.1 Попередній підсилювач.....	16
3.1.2 Схема включення АЦП	21
3.1.3 Схема підключення мікроконтролера та радіомодуля.....	21
3.1.4 Схема стабілізації живлення та заряду акумулятора.	22
3.2 Складання схеми приймача.....	23
3.2.1 Схема підключення мікроконтролера та радіомодуля.....	23
3.2.2 Схема включення ЦАП	24
3.2.3 Схема вихідного буферу на ОП та індикатора рівня сигналу.	24
3.2.4 Схема стабілізації живлення.....	25

					PI71.4644 15.001 ПЗ						
Змін	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Інструментальна цифрова радіостанція			Літ.	Лист	Листів	
Розробив	Білуха В. С.									1	54
Перевірів	Адаменко В. О.										
								PI-71 РТФ			
Н. Контр.											
Затвердив	Зінгер Я. Л.										

4	Проектування друкованого вузла.....	27
4.1	Вибір та обґрунтування елементної бази	27
4.1.1	Вибір пасивних елементів.....	27
4.1.2	Вибір стабілізаторів напруги	28
4.1.3	Вибір DC-DC перетворювача.	28
4.1.4	Вибір діода Шоткі.....	29
4.1.5	Вибір котушок індуктивності	29
4.1.6	Вибір мікросхеми заряду акумулятора.....	29
4.1.7	Вибір світлодіодів.....	29
4.1.8	Вибір операційного підсилювача.....	29
4.1.9	Вибір генератора тактових імпульсів	30
4.1.10	Вибір кварцового резонатора	30
4.1.11	Вибір АЦП.....	30
4.1.12	Вибір ЦАП.....	30
4.1.13	Вибір роз'ємів живлення.....	31
4.1.14	Вибір входних та вихідних роз'ємів	31
4.1.15	Вибір роз'ємів підключення акумулятора, індикатора та його підсвітки, вмикача.....	31
4.1.16	Вибір діода.....	32
4.1.17	Вибір стрілочного індикатора	32
4.1.18	Вибір підстроювальних та змінних резисторів.....	32
4.1.19	Вибір мікроконтролера та радіомодуля.....	32
4.1.20	Вибір вмикача приймача	33
4.1.21	Вибір акумулятора	33
4.2	Проектування друкованого вузла передавача.....	33

4.2.1 Вибір матеріалу друкованої плати	33
4.2.2 Вибір технології виготовлення.....	33
4.2.3 Вибір класу точності друкованої плати.....	35
4.2.4 Розрахунок ширини друкованих провідників.....	35
4.2.5 Розрахунок контактних майданчиків.....	36
4.2.6 Розрахунок площі друкованої плати.....	37
4.2.7 Трасування друкованої плати передавача	39
4.3 Проектування друкованого вузла приймача	41
4.3.1 Вибір матеріалу друкованої плати	41
4.3.2 Вибір технології виготовлення.....	41
4.3.3 Вибір класу точності друкованої плати.....	41
4.3.4 Розрахунок ширини друкованих провідників.....	42
4.3.5 Розрахунок контактних майданчиків.....	42
4.3.6 Розрахунок площі друкованої плати.....	43
4.3.7 Трасування друкованої плати приймача	45
4.4 Вибір припою та проводу.....	47
5 Проектування корпусів для частин приладу	48
5.1 Проектування корпусу передавача.....	48
5.1 Проектування корпусу приймача	49
Висновки	52
Перелік джерел посилань	53
Додаток А Розрахунок ширини друкованого провідника	55
Додаток Б Розрахунок ширини друкованого провідника	57
Додаток В Перелік елементів передавача	60

Додаток Г Перелік елементів приймача	64
Додаток Д Специфікація друкованого вузла передавача	68
Додаток Е Специфікація друкованого вузла приймача	71

Білуха В.С. РІ-71, 2021

					PI71.4644 15.001 ПЗ	Лист
						7
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

АЦП — аналого-цифровий перетворювач.

ЦАП — цифро-аналоговий перетворювач.

ФНЧ — фільтр низьких частот.

ОП — операційний підсилювач.

БЖ — блок живлення.

ДП — друкована плата.

МК — мікроконтролер.

SMD — «Surface-mounted device» — поверхневий монтаж.

SPI — "Serial Peripheral Interface" — послідовний периферійний інтерфейс

I²S — послідовний інтерфейс для з'єднання цифрових аудіоприладів.

DC — "Direct current" — постійний струм.

					PI71.4644.15.001 ПЗ	Лист
						8
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

ВСТУП

Сучасний ринок музичної апаратури пропонує широкий асортимент різних приладів які спрощують життя музиканта як на репетиціях, так і на сцені. Одним із таких приладів є інструментальна радіостанція. Завдяки цьому приладу музиканту не потрібно кількометрових кабелів для підключення, через які може спотворюватись сигнал, також музикант отримує змогу вільно пересуватися по сцені або репетиційному майданчику. Для професійного музиканта радіосистема є невід'ємним атрибутом, який супроводжує його інструмент майже у будь-яких ситуаціях. Однак для музикантів початківців часто такий девайс не є доступним, адже ціна якісних радіосистем перевищує ціну інструменту який зазвичай обирають початківці (наприклад електрогітари). Тому розробка більш дешевих якісних аналогів є актуальною задачею.

Існує два типи інструментальних радіостанцій аналогові та цифрові. Аналогові мають більш просту конструкцію та працюють на частотах FM-діапазону. Основним недоліком цього типу радіосистем є низька завадостійкість, та можливі спотворення сигналу. Цифрові радіосистеми ж позбавлені цього недоліку. Цифровий сигнал значно більш стійкий до завад та спотворень.

Для розробки було обрано цифрову радіосистему, адже її сигнал не боїться завад, та не спотворюється вхідний сигнал, що дозволяє передати максимально повно звучання інструменту.

					PI71.4644.15.001 ПЗ	Лист
						9
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

1 ОГЛЯД АНАЛОГІВ

1.1 Огляд аналогів

У даному розділі буде розглянуто найпопулярніші цифрові радіосистеми та їх основні характеристики.

1.1.1 LINE6 Relay G30

Цифрова радіосистема «LINE6 Relay G30», показана на рис. 1.1 [1].



Рисунок 1.1 — Цифрова радіосистема «LINE6 Relay G30»

Характеристики радіосистеми [2]:

- Формат радіопередачі сигналу: Цифрове передача звукових сигналів (запатентоване LINE6)
- Частотний діапазон: 10 Гц - 20 кГц
- Динамічний діапазон: 118 дБ
- Частота передачі: 2.4 ГГц

Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата

PI71.4644 15.001 ПЗ

Лист

10

- Кількість переналаштовуваних каналів: 6
- Радіус дії: 30 м на відкритому просторі (залежить також від локальних умов)

Характеристики передавача TBP06:

- АЦП: 24-біти Delta Sigma, 128-кратний оверсемплінг
- Вхідний імпеданс: 1.3 МОм
- Роз'єм: 1/4" несиметричний
- Керування: Живлення Увімк./Вимк., вибір радіоканалу (1-6)
- Індикатори LED: Живлення, індикація заряду батареї
- Час роботи: ~ 8 годин, 2x AA alkaline батареї
- Розміри (ШхВхГ): 73 x 57 x 32 мм
- Вага: 85 г.

Характеристики приймача RXS06:

- ЦАП: 24-біти Delta Sigma, 128-кратний оверсемплінг
- Роз'єм: 1/4" несиметричний
- Індикатори LED: Живлення, канал передавання даних, канал, заряд батареї, рівень аудіосигналу
- Керування: Живлення Увімк./Вимк., вибір радіоканалу (1-6), симулятор дровового кабельного тону
- Живлення: Адаптер живлення Line6 DC-1
- Розміри (ШхВхГ): 111 x 54 x 32 мм
- Вага: 113 г.

Дана радіосистема дозволяє підключити до неї будь-який інструмент, завдяки великому діапазону вхідних частот. 6 переналаштовуваних каналів дозволять обрати найменш зашумлений канал, а також підключити декілька передавачів до одного приймача. Перемикачем каналів на приймачі тоді можна вибирати який передавач буде прицілювати у даний момент. Запатентована технологія компанією LINE6 дозволяє оцифровувати звук без його компресії, що дозволяє передати повноцінний звук та динаміку інструмента. Передавач

					PI71.4644 15.001 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		11

Дана радіосистема є одною із найпростіших у лінійці LINE6, але пори це ціна її доволі висока (7403 грн [1]).

1.1.2 AKG DMS100 Inst Set

На рис. 1.2 показано цифрову радіостанцію AKG DMS100 Inst Set [3].



Рисунок 1.2 — Цифрова радіостанція AKG DMS100 Inst Set

Комплектація радіосистеми [3]:

- Мініатюрний передавач PT100
- SR100 приймач

Характеристики:

- Радіус дії: до 30м,
- Частотний діапазон: 2,4 ГГц,
- Входи: 1 збалансований міні XLR,
- Виходи: 1 симетричний XLR, 1 асиметричний 1/4"
- Порт синхронізації: RJ45,
- Шифрування: 256-бітний AES,
- Одночасно працюють до чотирьох систем співіснування,
- Діапазон частот, які можна відтворювати: 70 Гц - 20 кГц,
- Затримка ≤ 2.9 мс.
- Динамічний діапазон: 116 дБ на 1 кГц,

					PI71.4644 15.001 ПЗ	Лист
						12
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

- Співвідношення сигнал/шум > 90 дБ,
- Розміри приймача: 200 x 44 x 165 мм,
- Розміри передавача: 64 x 29 x 82 мм,
- Живлення: 2 батарейки ААА,
- Аксесуари включені: адаптер живлення, кріплення для установки на стійку, інструментальний кабель.

Дана радіосистема має низьку затримку, широкий динамічний діапазон, шифрування яке захищає сигнал. На приймачі виведено індикацію розряду передавача, та індикацію підключення, що доволі зручно у використанні. Ціна такої радіостанції для музиканта початківця є дуже високою (9774 грн).

У обох радіосистем є передавачі які можна закріпити на наприклад ремінь гітари, що зручно і не створює дискомфорту музиканту. Основним їх недоліком є те, що для живлення передавача у обох випадках використовуються батарейки типу ААА. Вони потребують постійної заміни і додаткових витрат при регулярному використанні.

					PI71.4644 15.001 ПЗ	Лист
						13
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

2 СКЛАДАННЯ СТРУКТУРНИХ СХЕМ ЧАСТИН ПРИЛАДУ

2.1 Передавач

Структурна схема передавача показана на рис. 2.1.

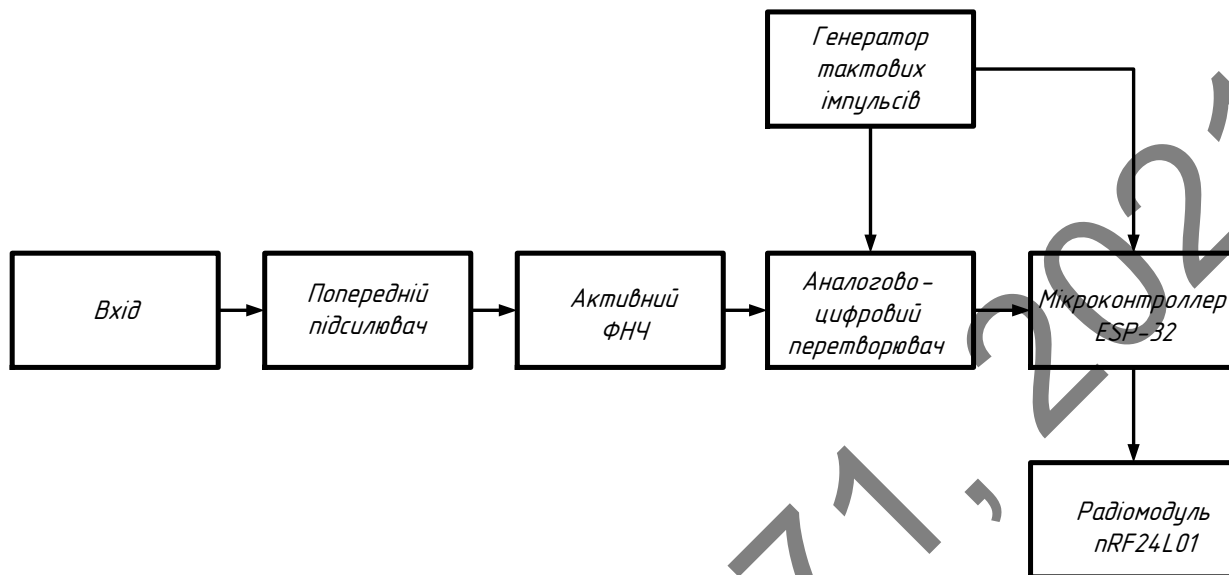


Рисунок 2.1 — Структурна схема передавача

Сигнал із інструменту приходить на попередній підсилювач який формує сигнал відповідного рівня для подальшої обробки АЦП. Після підсилювача сигнал потрапляє на активний ФНЧ який задає верхню межу діапазону вхідних частот. Генератор тактових імпульсів забезпечує стабільність та правильність оцифровування вхідного сигналу. Сигнал із тактового генератора також подається і на мікроконтролер для синхронізації сигналу. АЦП оцифровує сигнал сформований попереднім підсилювачем та фільтром. Оцифрований сигнал приймає мікроконтролер і готує його для передачі на радіомодуль. Далі сигнал передається на радіомодуль і відправляється на приймаючий модуль.

2.2 Приймач

Структурна схема приймача показана на рис. 2.2.

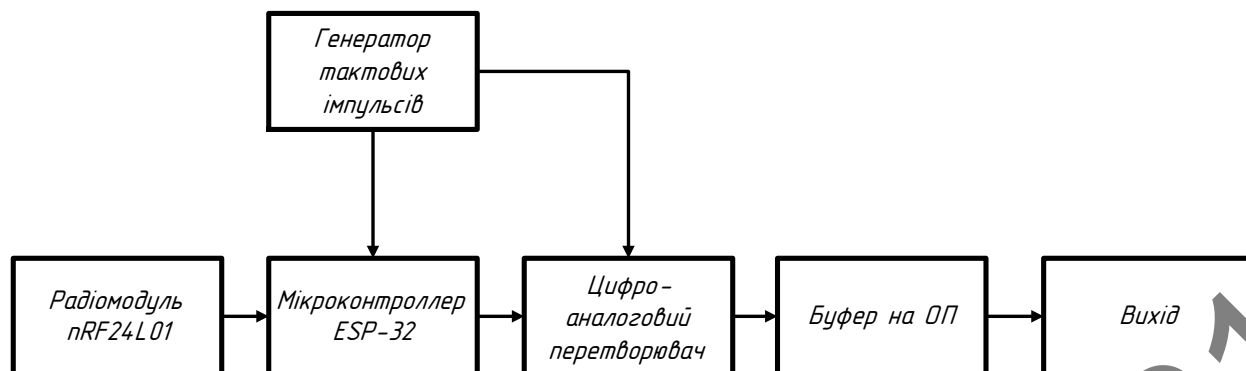


Рисунок 2.2 — Структурна схема приймача

Сигнал від передавача приходить на приймаючий радіомодуль, після передається на МК для декодування. Генератор тактових імпульсів служить для синхронізації МК та ЦАП, а також для правильної роботи ЦАП та для правильного цифро-аналогового перетворення сигналу. Після перетворення сигналу у аналоговий, він подається на буфер на ОП, який узгоджує вихідний опір приймача з наступними девайсами у колі сигналу (підсилювачами, педалями ефектів, мікшерними пультами).

3 ВИБІР СХЕМОТЕХНІЧНОГО РІШЕННЯ

3.1 Складання схеми передавача

Схема передавача на кресленiku PI71.464415.001 ЕЗ.

Схема складається з декількох частин, тому її можна розділити на окремі вузли, які розглянуті у підрозділах нижче.

3.1.1 Попередній підсилювач

Попередній підсилювач складається із декількох частин, а саме підсилювача що формує відповідний рівень вхідного сигналу для АЦП, та активного ФНЧ для забезпечення відповідного діапазону вхідних частот.

Схема неінвертуючого підсилювача показана на рис. 3.1 [4].

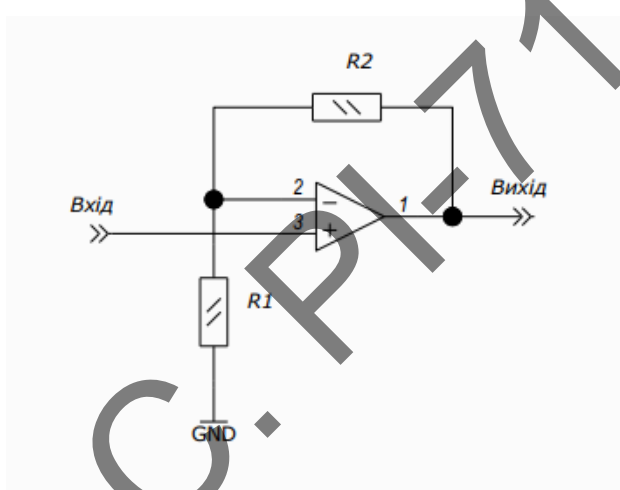


Рисунок 3.1 — Схема неінвертуючого підсилювача

Коефіцієнт підсилення такого підсилювача розраховується за формулою,

$$K_U = \frac{U_{\text{вих}}}{U_{\text{вх}}} = \frac{R_2}{R_1} + 1,$$

де $U_{\text{вих}} = \frac{U_{\text{ж}}}{2}$ — вихідна напруга сигналу, що дорівнює половині напруги живлення, $U_{\text{вх}}$ — напруга вхідного сигналу. Амплітудне значення вихідної напруги звукознімачів електрогітари приблизно 200 мВ, напруга живлення 3,7 В (номінальна напруга акумулятора), тоді:

$$K_U = \frac{U_{\text{вих}}}{U_{\text{вх}}} = 7,4,$$

					PI71.464415.001 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		16

Звідси можна вирахувати номінали резисторів. Задамо значенням резистора $R_2 = 100 \text{ кОм}$. Тоді

$$R_1 = \frac{R_2}{K_U - 1} = \frac{100 \cdot 10^3 \text{ Ом}}{7,4 - 1} = 15,6 \cdot 10^3 \text{ Ом}.$$

Приводячи до стандартних номіналів $R_1 = 15 \text{ кОм}$.

Для нормальної роботи підсилювача на однополярному живленні потрібно задати робочу точку. Найпростіший варіант це симетричний дільник, центральна точка якого і задає напругу робочої точки. Для зменшення впливу дрейфу напруги живлення передбачається використання конденсатора C_1 , а для уникнення підсилення постійної складової підсилювачем у коло зворотного зв'язку введено конденсатор C_2 . Для забезпечення режимів роботи підсилювача за постійним струмом у схему додано розділові конденсатори. На рис. 3.2 показано схему підсилювача із заданою робочою точкою.

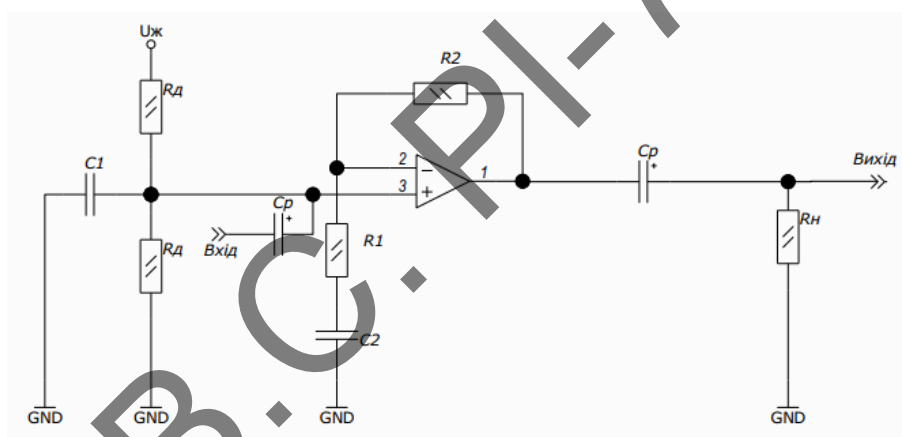


Рисунок 3.2 — Схема підсилювача з заданою робочою точкою

Конденсатори C_1 та C_2 , окрім функції стабілізації, утворюють фільтр високих частот, їх ємність розраховується відповідно до частот зрізу які вимагаються від підсилювача. Для даного передавача ця частота складає 10 Гц, це частота зрізу для C_2 , для C_1 частота зрізу повинна складати десятю частину від частоти для C_2 . Для визначення ємності C_1 потрібно задатися значеннями резисторів дільника $R_d = 100 \text{ кОм}$, та використати значення резистора $R_1 = 15 \text{ кОм}$, вирахованого із попередньої формули. Формула для визначення ємності конденсатора C_2 ,

$$C_2 = \frac{1}{2\pi \cdot R_2 \cdot f_n} = \frac{1}{2\pi \cdot 15 \cdot 10^3 \cdot 10} = 1 \cdot 10^{-6} \Phi = 1 \text{ мкФ},$$

та для C_1 ,

$$C_1 = \frac{1}{2\pi \frac{R_d}{2} \frac{f_n}{10}} = \frac{1}{2\pi \cdot 50 \cdot 10^3} = 3,2 \cdot 10^{-6} \Phi,$$

Приводячи до стандартних номіналів $C_1 = 3,3 \text{ мкФ}$.

На рис. 3.3 показано отриману АЧХ підсилювача. Моделювання виконано у програмному забезпеченні LTspise.

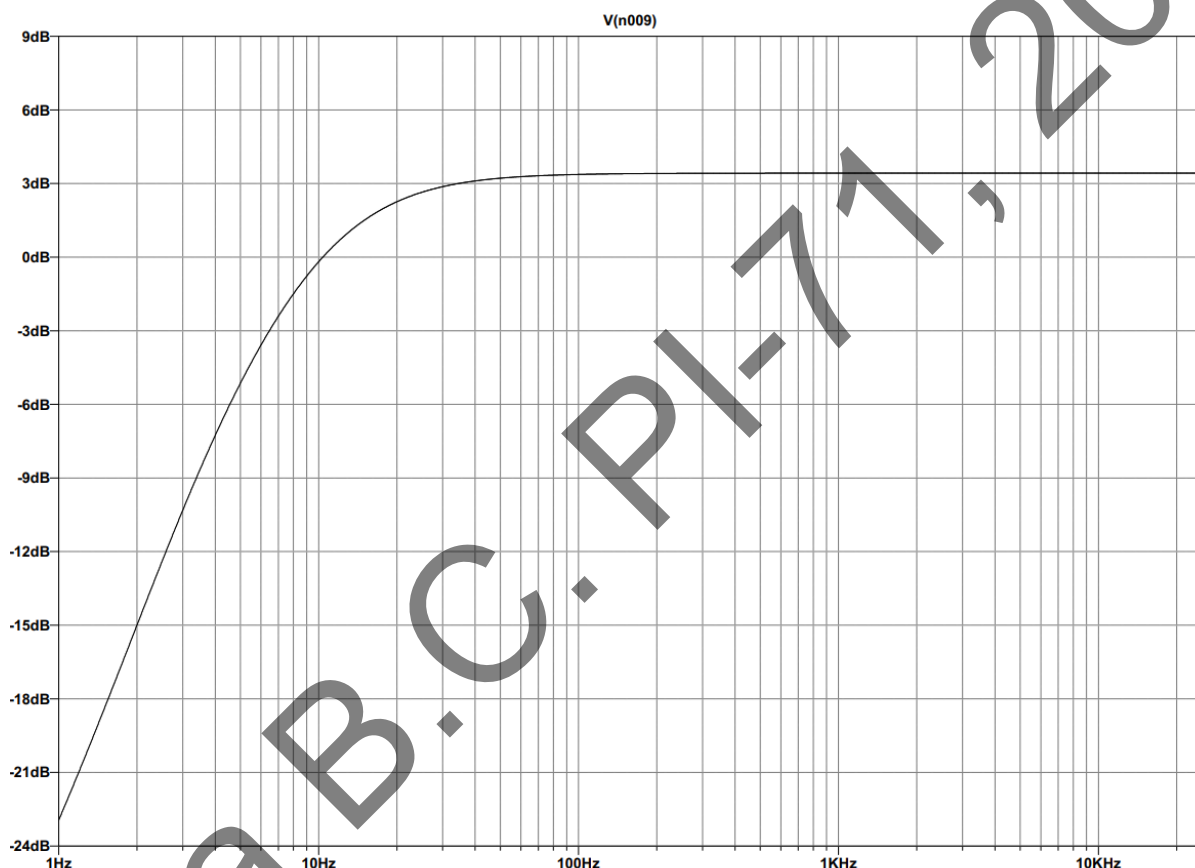


Рисунок 3.3 — АЧХ підсилювача

Для обмеження частотного діапазону на високих частотах використовуються активний ФНЧ Батерворта 2-го порядку, у найпростішій схемі його реалізації — схемі Саллена-Кі [4]. Схема такого фільтра показана на рис. 3.4.

Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата

PI71.4644 15.001 ПЗ

Лист

18

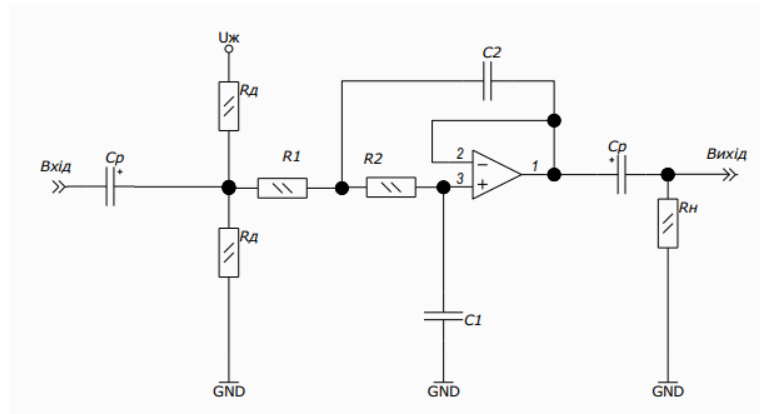


Рисунок 3.4 — Схема активного ФНЧ Саллена –Кі

Для отримання потрібного частотного діапазону обрано значення частоти зрізу $f_n = 20$ кГц, та ємності $C_1 = 10$ нФ. Коефіцієнт підсилення фільтра $K_U = 1$. Опір резистора R_1 знаходиться за формулою,

$$R_1 = \frac{\sqrt{2}}{4\pi f_n C_1} = \frac{\sqrt{2}}{4\pi \cdot 20 \cdot 10^3 \cdot 10 \cdot 10^{-9}} = 565 \text{ Ом.}$$

Приводячи до стандартних значень $R_1 = 560$ Ом.

Згідно з методикою розрахунку

$$R_1 = R_2 = 560 \text{ Ом,}$$

$$C_2 = 2C_1 = 20 \text{ нФ.}$$

На рис 3.5 показано АЧХ фільтра.

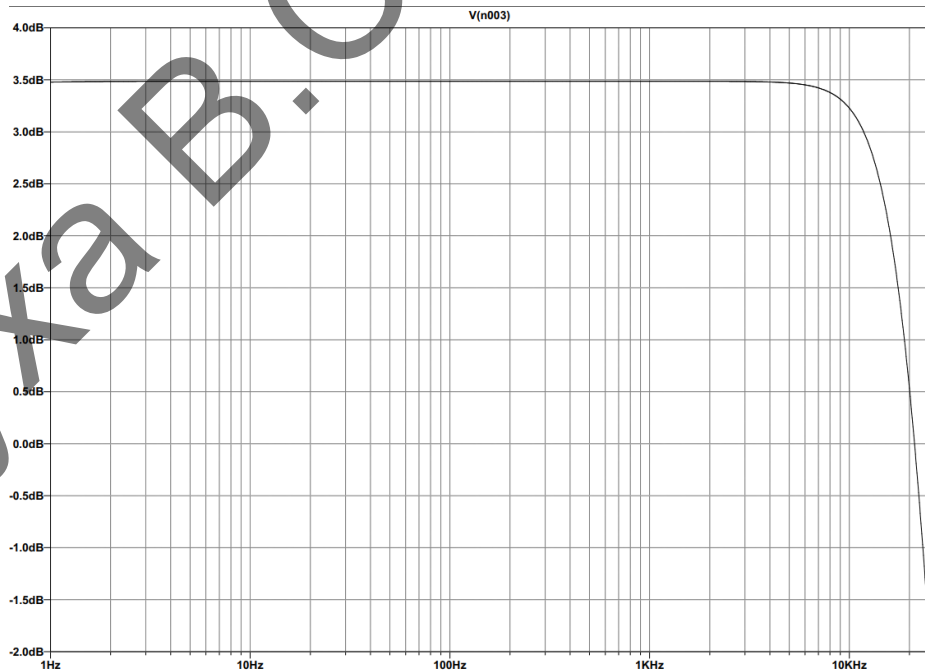


Рисунок 3.5 — АЧХ ФНЧ Батерворта 2-го порядку

Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата

PI71.4644 15.001 ПЗ

Лист

19

Об'єднавши схеми підсилювача отримаємо попередній підсилювач з відповідним вхідним частотним діапазоном. На рис. 3.6 показано об'єднану схему підсилювача та фільтра.

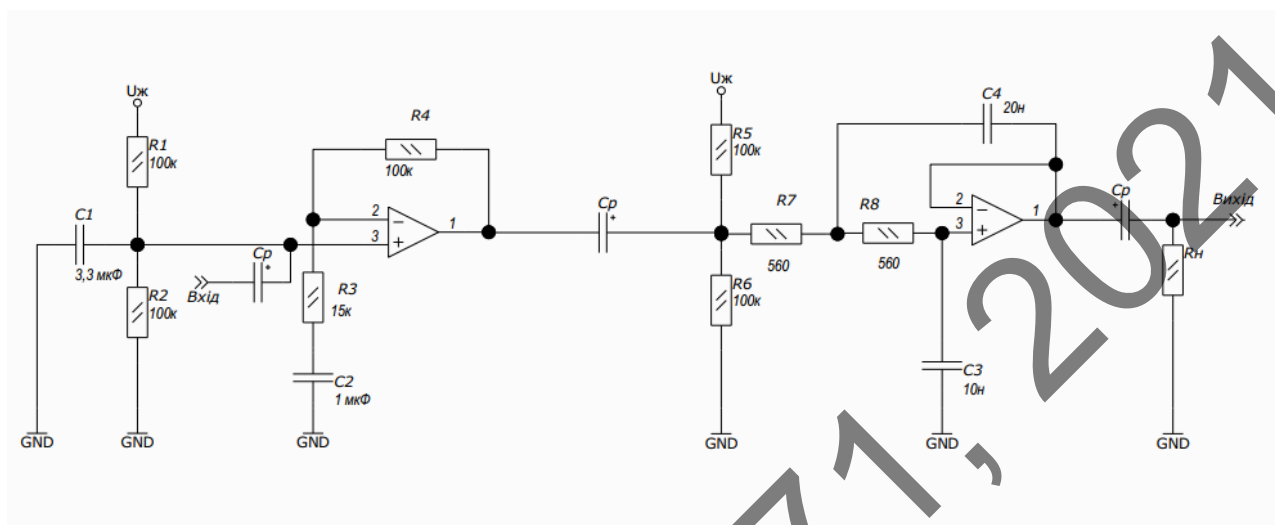


Рисунок 3.6 — Загальна схема підсилювача та фільтра

На рис. 3.7 показано АЧХ отриманої схеми.

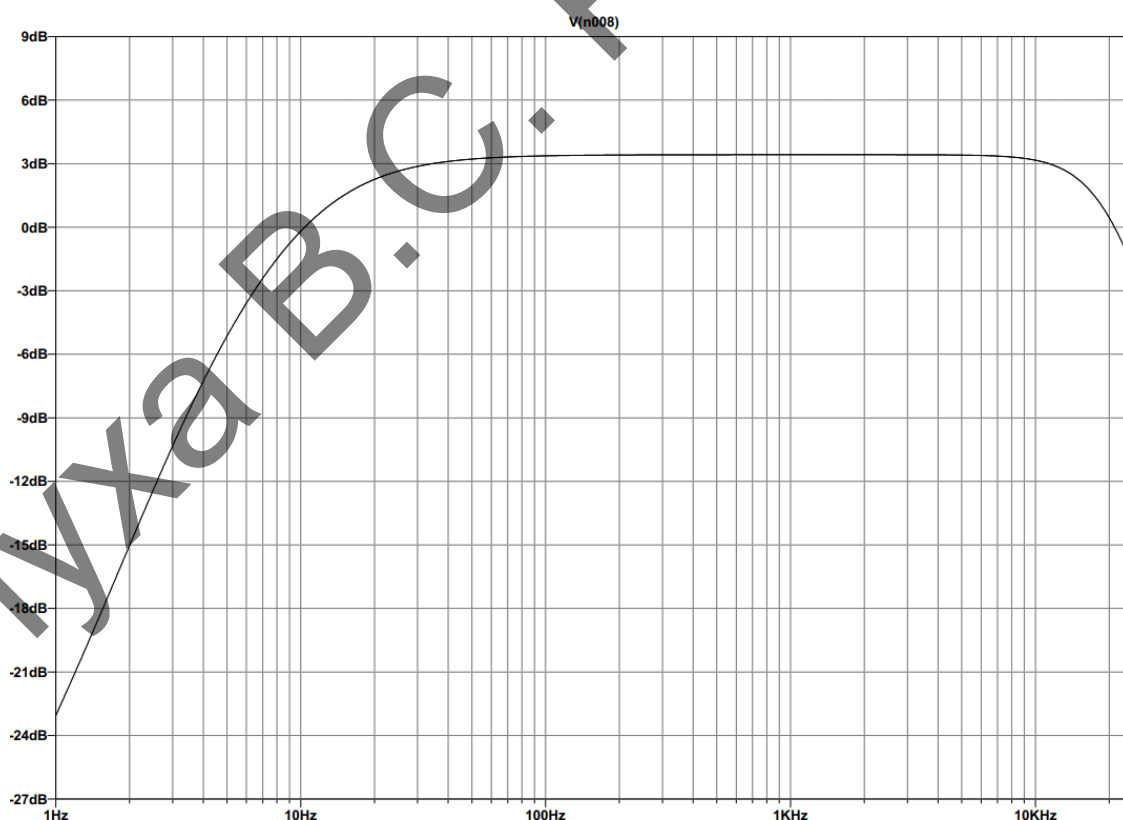


Рисунок 3.7 — АЧХ Підсилювача та фільтра

Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата

PI71.4644 15.001 ПЗ

Лист

20

Таким чином отримано схему попереднього підсилювача який формуватиме потрібний рівень сигналу на АЦП, та задає потрібний діапазон вхідних частот.

3.1.2 Схема включення АЦП

На рис. 3.8 показано схему включення АЦП.

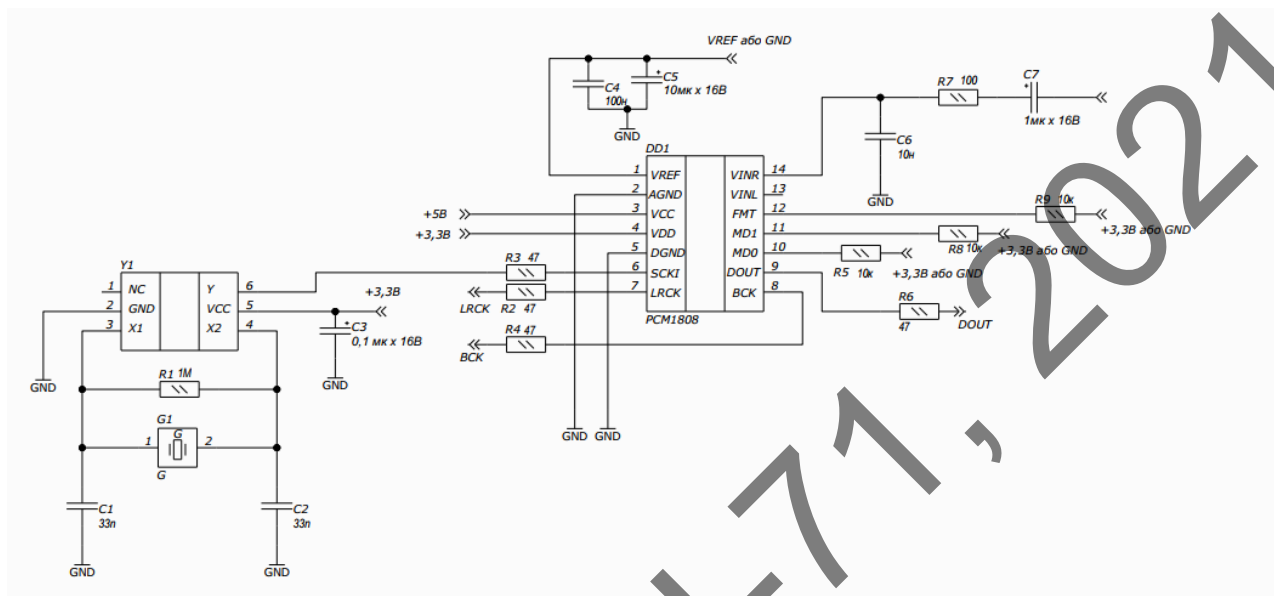


Рисунок 3.8 — Схема включення АЦП

До виводу АЦП «SCKI» підключено генератор тактових імпульсів на кварцовому резонаторі. Так як сигнал з музичного інструменту зазвичай монофонічний використовується лише один вхідний канал, а саме правий. Виводи «DOUT», «LRCK», «BCK» підключаються до мікроконтролера, а значеннями напруги на виводах «MD0», «MD1», «FMT» задаються режими роботи АЦП.

3.1.3 Схема підключення мікроконтролера та радіомодуля

Схема включення МК та радіомодуля показана на рис. 3.19.

Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата

PI71.4644 15.001 ПЗ

Лист

21

Схема зарядки акумулятора побудована на мікросхемі контролю зарядки MCP73831. Індикація заряду відбувається за допомогою двох світлодіодів VD2 (заряджається) та VD3 (заряджено). Для забезпечення нормальної роботи аналогової частини АЦП на мікросхемі MC34063A побудовано підвищувальний DC-DC перетворювач. А для нормальної роботи цифрової частини схеми у схему введено лінійний стабілізатор напруги AMS1117 на 3,3В. Підсилювач живиться від напруги акумулятора, адже DC-DC перетворювач може вносити високочастотні шуми у звуковий сигнал.

3.2 Складання схеми приймача

Схема приймача на кресленику PI71.464415.002 ЕЗ. Її як і схему передавача можна розбити на частини для більш детального розгляду.

3.2.1 Схема підключення мікроконтролера та радіомодуля

На рис. 3.11 показано схему включення радіомодуля та мікроконтролера.

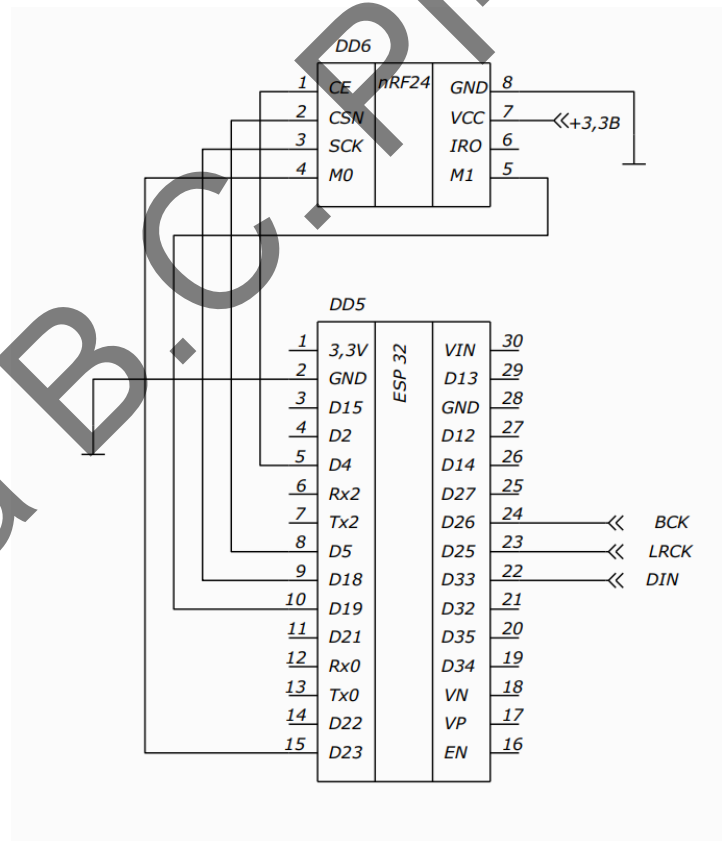


Рисунок 3.11 — Схема включення радіомодуля та мікроконтролера

Приймаючий радіомодуль так само як і передавальний підключені по шині SPI. ЦАП підключений по шині I²S. Схема включення повністю ідентична схемі у передавачі, основна відмінність лише у тому що тепер МК працює для декодування сигналу та передачі його на ЦАП.

3.2.2 Схема включення ЦАП

Схема включення ЦАП показана на рис. 3.12.

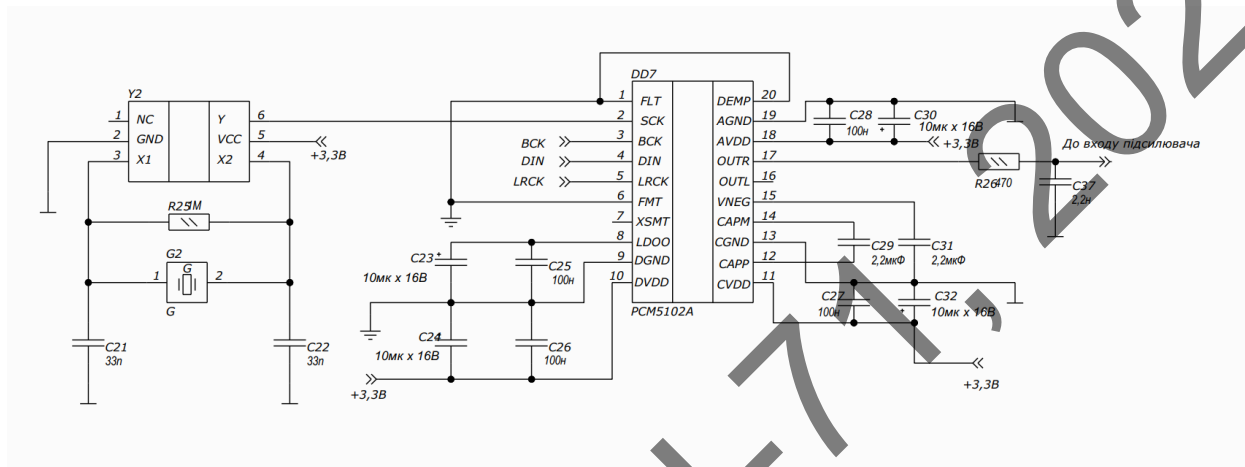


Рисунок 3.12 — Схема включення ЦАП

До виводу ЦАП «SCKI» підключено генератор тактових імпульсів на кварцовому резонаторі. Виводи «DIN», «LRCK», «BCK» підключаються до мікроконтроллера. Сигнал на виводі «BCK» для якісного перетворення оцифрованого звукового сигналу знову у аналоговий має бути ідентичний сигналу на виводі «BCK» у АЦП.

3.2.3 Схема вихідного буфера на ОП та індикатора рівня сигналу

На рис. 3.13 показано схему вихідного буфера на ОП, та стрілочного індикатора рівня вихідного сигналу.

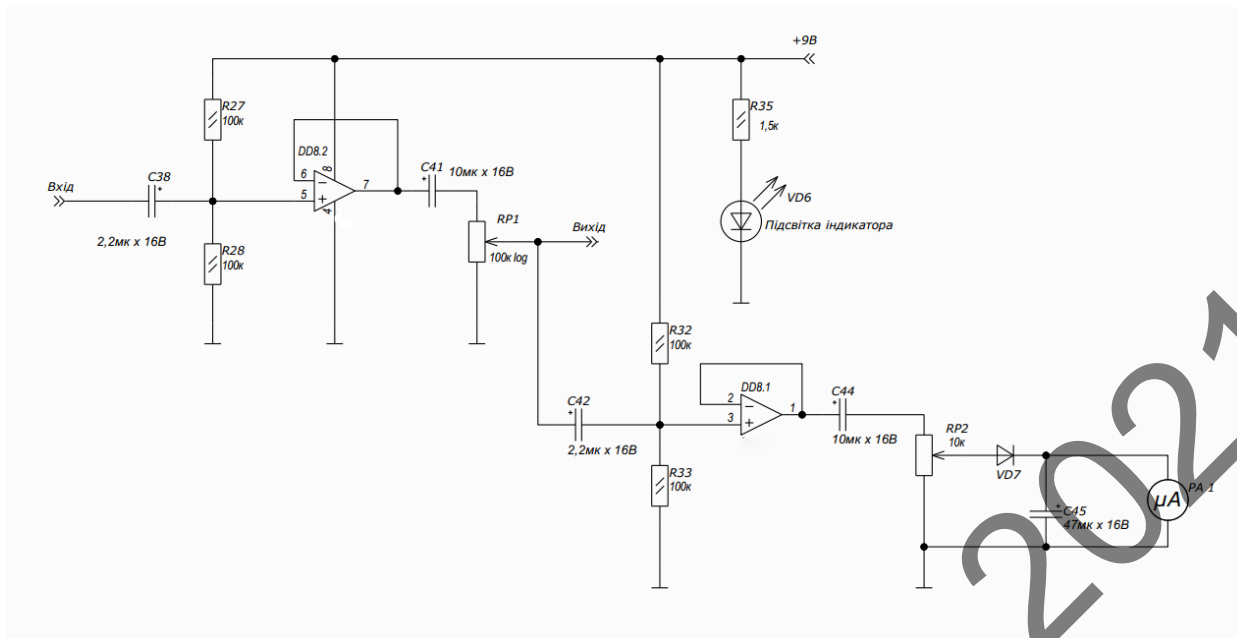


Рисунок 3.13 — Схема вихідного буферу на ОП та індикатора рівня сигналу

Буфер на ОУ використовується для узгодження вихідного опору, та для регулювання рівня вихідного сигналу.

Для того щоб індикатор не просаджував вихідний сигнал у схему його включення було додано буфер на операційному підсилювачі, підстроювальним резистором регулюється чутливість індикатора, а ємністю, що паралельна індикатору плавність ходу стрілки. Вихідний буфер та буфер індикатора побудовані на мікросхемі LM258N, це здвоєний ОП, з низьким рівнем шуму.

3.2.4 Схема стабілізації живлення

На рис. 3.14 показано схему стабілізації живлення для приймача.

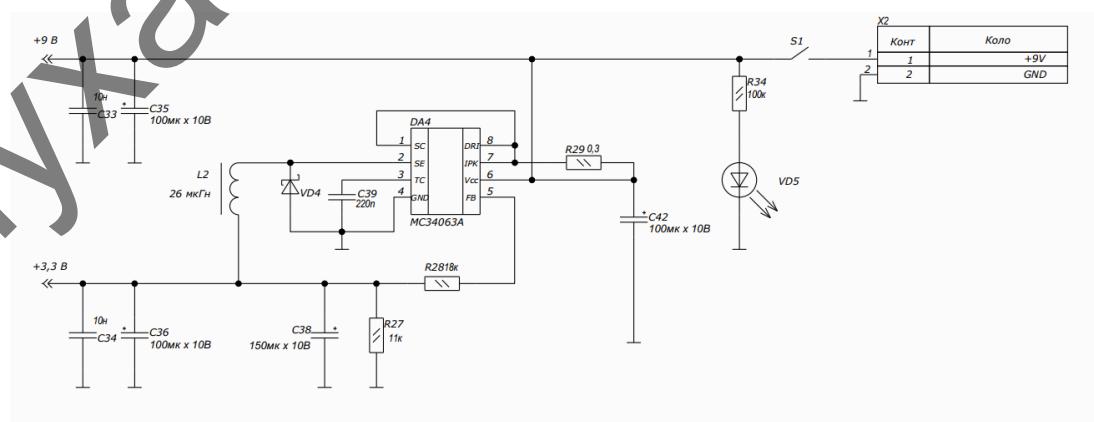


Рисунок 3.14 — Схема стабілізації живлення

Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата

PI71.4644 15.001 ПЗ

Лист
25

Для перетворення 9 В у 3,3 В для живлення ЦАП та МК використано понижуючий DC-DC перетворювач на мікросхемі MC34063A. Індикація роботи приладу здійснюється за допомогою світлодіоду.

Білуха В.С. РІ-71, 2021

					PI71.4644 15.001 ПЗ	Лист
						26
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

4 ПРОЕКТУВАННЯ ДРУКОВАНОГО ВУЗЛА

4.1 Вибір та обґрунтування елементної бази

Під час вибору елементної бази слід враховувати певні фактори, а саме:

- елементна база впливає на габарити пристрою;
- елементна база впливає на технологію виготовлення пристрою;
- для того щоб забезпечити відповідні електричні параметри схеми елементи повинні бути обрані з відповідним допуском;
- елементна база повинна бути доступною;
- елементна база повинна якісною, для забезпечення роботи приладу мінімум на увесь гарантійний строк.

Використання елементів поверхневого монтажу (SMD) дозволить зменшити габарити пристрою, та значно спростить процес його виготовлення.

Характер виконання пристрою на даному етапі є експериментальним, тому слід обирати елементну базу яка може бути встановлена на друковану плату без спеціалізованого обладнання.

Для вибору компонентів було використано каталоги таких магазинів:

- «РКСКОМПОНЕНТИ»[5];
- «ІМРАД»[6];
- «RadioLED»[7].

4.1.1 Вибір пасивних елементів

Так як даний прилад можна віднести до побутової техніки, та зважаючи на його схемотехніку, пасивні елементи можна обрати із допуском у межах 5-10%. Номінали пасивних компонентів обрано за стандартним рядом E24. Для зручності монтажу використано резистори та керамічні конденсатори у SMD корпусі типорозміру 1206. Для зменшення габаритів плати передавача було замість електролітів було використано танталові конденсатори у SMD корпусі D-типу. Електролітичні конденсатори у приймачі використані у SMD корпусі В-типу.

Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата

PI71.4644.15.001 ПЗ

Лист

27

Обрано резистори виготовлені компанією Hitano, конденсатори керамічні та танталові — компанією AVX, електролітичні — Yageo Corporation. Вибір саме цих виробників обумовлений доступністю продукції цих компаній на ринку та відповідністю вимогам до допусків.

4.1.2 Вибір стабілізаторів напруги

Для стабілізації живлення цифрової частини передавача обрано стабілізатор AMS1117CD-3.3 з вихідною напругою 3,3В, та вихідним струмом до 1А, що виготовляється компанією Advanced Monolithic Systems. Даний стабілізатор виготовлений у корпусі SOT-232, що дозволяє в якості радіатора використати друкований малюнок на ДП.

Для індикатора розряду акумулятора використано стабілізатор TL431, що виготовляється компанією Nexperia. Стабілізатор виконується у корпусі SOT23 та додаткового охолодження не потребує. Даний стабілізатор коли напруга на акумуляторі падає до 3,2В, засвічує світлодіод який вказує на розряд акумулятора.

4.1.3 Вибір DC-DC перетворювача.

Для підвищувального та понижуючого перетворювача використано мікросхему MC34063A, виробництва компанії AIC. Мікросхема має такі переваги:

- діапазон входних напруг 3-30 В;
- внутрішній захист спрацьовує при піковому струмі 1,6 А;
- низьке споживання струму без навантаження 1,6 мА;
- діапазон робочих частот 100 Гц – 100 кГц;
- внутрішній обмежувач струму.

Даний перетворювач виконується у корпусі SOIC8-1,27, охолодження не потребує.

					PI71.4644.15.001 ПЗ	Лист
						28
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

4.1.4 Вибір діода Шоткі

Для нормальної роботи перетворювача використано високошвидкісний діод Шоткі VS-10BQ015-M3, виготовлений компанією Vishay Semiconductors.

Зворотня напруга діода 15В, а струм прямий струм 1А, що повністю задовольняє вимоги схеми перетворювача, як і понижуючого, так і підвищувального. Діод виконується у корпусі SBM.

4.1.5 Вибір котушок індуктивності

Для роботи DC-DC перетворювача також потрібна котушку індуктивності. У схемах передавача та приймача використано котушку індуктивності виготовлену компанією EATON, у корпусі DR74, на 15 мкГн та 26 мкГн.

4.1.6 Вибір мікросхеми заряду акумулятора

Для правильного заряду акумулятора використано мікросхему-контролер заряду MCP73831. Мікросхема дозволяє правильно заряджати акумулятор, а також виконати індикацію повної зарядки. Струм заряду може регулюватися від 15мА до 500мА. Виготовляється мікросхема у корпусі SOT-23 на 5 виводів, компанією Microchip.

4.1.7 Вибір світлодіодів

Для індикації увімкнення, заряду акумулятора, розряду акумулятора використано кольорові світлодіоди GNL-0805xx у SMD корпусі типорозміру 0805, що виготовляються компанією G-NOR OPTOELECTRONICS Co.

Для підсвітки стрілочного індикатора використано вивідний світлодіод GNL-3014UES оранжевого кольору, діаметром 3мм. Він закріплюється на індикаторі і до плати під'єднується за допомогою провідників через роз'єм.

4.1.8 Вибір операційного підсилювача

Для ОП у передавачі та приймачі використано мікросхему LM258N це здвоєний операційний підсилювач, з низьким рівнем шуму, що виготовляється компанією STMicroelectronics. Дана мікросхема має такі переваги:

— великий динамічний діапазон 100 дБ;

					PI71.4644 15.001 ПЗ	Лист
						29
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

- напруга живлення 3-30В;
- низький коефіцієнт спотворень;
- струм споживання 0,7-2 мА.

4.1.9 Вибір генератора тактових імпульсів

Для нормальної роботи АЦП, та ЦАП використано одноканальний генератор тактових імпульсів на кварцовому резонаторі SN74LVC1GX04DCKR, що виготовляється компанією Texas Instruments. Амплітуда вихідного сигналу 3,3В, діапазон робочих частот 15кГц – 28МГц.

4.1.10 Вибір кварцового резонатора

Для забезпечення відповідної частот дискретизації при перетворенні сигналу використано кварцовий резонатор. Для частоти дискретизації 48кГц та 256-кратного оверсемплінгу частота кварцового резонатора має складати 12,288МГц. У приладі використано кварцовий резонатор КХ-КТ на 12,288МГц у корпусі QSMD12.3x4.5x4.2, виготовлений компанією GEYER ELECTRONIC.

4.1.11 Вибір АЦП

Для оцифровування вхідного аудіо сигналу АЦП РСМ1808 виробництва Texas Instruments. Даний АЦП може оцифровувати сигнал у 24 біти з частотою дискретизації від 8кГц до 92кГц, та від 256- до 512-кратним оверсемплінгом. Має два вхідних канали, що дозволяє оцифровувати стереофонічний сигнал. Напруга живлення аналогової частини 5В, цифрової — 3,3В.

4.1.12 Вибір ЦАП

Для перетворення цифрового сигналу знову в аналоговий використано ЦАП РСМ5102А виготовлений компанією Texas Instruments. Даний ЦАП може працювати з 16-,24- та 32-бітними сигналами, має стереовихід. Напруга живлення для аналогової та цифрової частини складає 3,3В.

					PI71.4644 15.001 ПЗ	Лист
						30
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

4.1.13 Вибір роз'ємів живлення

Роз'єм живлення приймача використано роз'єм для штекера 2,1x5,5мм. під такі параметри було обрано роз'єм DS-261B, виготовлений компанією Dragon City Industries.

Для зарядки акумулятора передавача використано роз'єм microUSB MCR-B-S-RA-TSMT-EH1, виробництва компанії ADAM TECH. Даний роз'єм кріпиться комбінованим монтажем, виводи поверхневим, а корпус наскрізним, це забезпечить стійкість роз'єму до механічних впливів.

4.1.14 Вибір вхідних та вихідних роз'ємів

Вхідні та вихідні роз'єми згідно технічного завдання мають бути під аудіо-штекер JACK 6,3мм. Дані роз'єми бувають двох типів — із кріпленням на корпус, та ті які монтуються на ДП. Ті які кріпляться на корпус є менш надійні та кріпляться до ДП за допомогою провідників. Для забезпечення надійності та спрощення монтажу використано роз'єм з монтажем на ДП, а саме JC-211 виробництва компанії Ninigi. Дані роз'єми часто використовуються у професійній музичній апаратурі. Перевагою цих роз'ємів є наявність додаткового контакту GND, який замикає сигнальний контакт при відсутності у роз'ємі штекера, що дозволяє прибрати можливі шуми які можуть потрапити на вхід підсилювача у передавачі.

4.1.15 Вибір роз'ємів підключення акумулятора, індикатора та його підсвітки, вмикача

Для підключення акумулятора, стрілочного індикатора його підсвітки та вмикача без пайки їх провідниками, більш доцільно використати роз'єми. Це значно спростить процес збирання приладу та значно окультурить вигляд ДП. Для цих цілей було обрано роз'єм NX1500-02SMS типу «male». Даний роз'єм має малі габарити і не матиме значного впливу на розміри ДП, та пристрою загалом.

					PI71.4644 15.001 ПЗ	Лист
						31
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

4.1.16 Вибір діода

Для нормальної роботи стрілочного індикатора на нього слід подавати постійну напругу, для цього у схему введений діод 1N4007. Це випрямний діод, він виготовляється у корпусі SM-1 компанією Toshiba.

4.1.17 Вибір стрілочного індикатора

Для серійного виробництва індикатор повинен мати свою шкалу та змінний корпус, але для експериментальної збірки можна використати стрілочний амперметр SE-52, попередньо прибравши з нього шунтуючий резистор.

4.1.18 Вибір підстроювальних та змінних резисторів

Підстроювальні резистори у пристрої використано поверхневого монтажу 3224W, що виготовляються компанією BOURNS. Основною їх перевагою є малі розміри та зручність монтажу, а також те, що цей підстроювальний резистор є багатоповоротним, це дозволить доволі точно налаштувати роботу приладу.

4.1.19 Вибір мікроконтролера та радіомодуля

У пристрої використано плату розробки ESP WROOM-32 DEVKIT1 на базі мікроконтролера ESP WROOM-32. Використання плати розробки значно спрощує використання МК, та дозволяє завантажувати прошивку без додаткових зовнішніх програматорів. ESP WROOM-32 має вбудовані потрібні шини SPI та I²S, а 32-х бітний процесор із змінною тактовою частотою (80 – 240 МГц) забезпечує швидку обробку даних та швидку роботу девайсу. Також МК має низьке споживання струму 80мА.

Для передачі та прийому використано радіомодуль nRF24L01. Цей радіомодуль має 128 каналів з кроком у 1МГц у діапазоні 2,400 ГГц – 2,527 ГГц. Дальність передачі сигналу до 100 метрів у межах прямої видимості, що з надлишком задовольняє вимоги до інструментальних радіосистем.

					PI71.4644.15.001 ПЗ	Лист
						32
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

4.1.20 Вибір вмикача приймача

Для увімкнення та вимкнення приймача без відключення його від блоку живлення використано двопозиційний вмикач AE-H8800VAAAB.

4.1.21 Вибір акумулятора

Для забезпечення автономної роботи передавача обрано полімерний Li-ion акумулятор. LP103454LC, виробництва компанії EEMB. Акумулятор має такі характеристики:

- номінальна напруга – 3,7 В;
- номінальна ємність – 2000 мАг;
- піковий струм розряду – 4 А;
- порогова напруга розряду – 2,75 В;
- максимальний струм заряду – 2 А;
- внутрішній опір – 100 мОм.

4.2 Проектування друкованого вузла передавача

4.2.1 Вибір матеріалу друкованої плати

Матеріалом друкованої плати передавача обрано двосторонній фольгований склотекстоліт FR4 товщиною 1,5 мм, та товщиною фольги 35мкм. Основа матеріалу склотканина з епоксидною смолою у якості зв'язуючої речовини. Даний матеріал має високу механічну міцність, термостійкість, температура склування близько 130°C – 180°C. Клас горючості UL94-V0 за стандартом ІЕС 60695-11-2 [8].

4.2.2 Вибір технології виготовлення

Оскільки плата матиме як елементи поверхневого монтажу так і елементи наскрізного монтажу з металізацією отворів, тому її доцільно виготовити використовуючи комбінований позитивний метод виготовлення друкованих плат.

Перевагами даного методу є:

					PI71.4644.15.001 ПЗ	Лист
						33
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

- можливість відтворення всіх типів друкованих елементів з високою роздільною здатністю;
- захищеність фольгою ізоляції від технологічних розчинів – хороша надійність ізоляції;
- хороша міцність зчеплення (адгезія) металевих елементів плати з діелектричною основою.

Також даний метод має деякі недоліки:

- відносно велика глибина травлення (фольга + металізація) створює бічне підтравлення, що обмежує роздільну здатність процесу;
- травлення рисунку по металорезисту обмежує свободу вибору травних розчинів;
- після травлення рисунка схеми, металорезист або освітлюють (для поліпшення пайки) або видаляють (а потім після нанесення паяльної маски знову осаджують фінішні покриття під пайку). З'являються додаткові витрати.

Виготовлення плати таким методом передбачає такі операції:

- підготовка матеріалу (зняття бруду, обезжирення);
- свердління отворів для вивідних елементів та для кріплення;
- активація поверхні для металізації та нанесення шару тонкої хімічної металізації (до 1 мкм);
- проведення попередньої тонкої гальванічної металізації (до 6 мкм);
- нанесення та експонування фоторезисту;
- проведення основної гальванічної металізації (до 25 мкм);
- нанесення металорезисту;
- проявлення фоторезисту та видалення зайвої фольги;
- видалення металорезисту;
- нанесення захисної маски;
- нанесення шовкографії.

					PI71.4644 15.001 ПЗ	Лист
						34
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

4.2.3 Вибір класу точності друкованої плати

Для того щоб визначити ширину провідника слід обрати клас точності ДП. Допустимі значення ширини друкованого провідника зазначені у ГОСТ 23751-86 [9]. У даному документі введені поняття класів точності ДП. Усього існує 5 класів точності плат: 1 та 2 застосовується при виготовленні плати у домашніх умовах, 3 у виробництві побутових приладів, 4 та 5 — у виробництві високоточних плат (у військовій апаратурі). У таблиці 4.1 наведено основні параметри для визначення класу точності.

Таблиця 4.1— Класи точності

Параметр	Клас точності				
	1	2	3	4	5
Ширина друкованого провідника, мм	0,75	0,45	0,25	0,15	0,10
Відстань між краями сусідніх елементів провідникового рисунку, мм	0,75	0,45	0,25	0,15	0,10
Гарантійний поясок, мм	0,30	0,20	0,10	0,05	0,025

У зв'язку з тим що окремі елементи у схемі приймача мають ширину контактів рівну 0,3 мм для ДП передавача було обрано третій клас точності.

4.2.4 Розрахунок ширини друкованих провідників

Розрахунок ширини провідників проведено у програмному забезпеченні Mathcad 15. Отримані дані занесені у таблицю 4.2. Знімки екрана з розрахунком у Mathcad 15 будуть наведені у додатку Б. Значення можуть бути округлені у більшу сторону.

Таблиця 4.2 — Ширина друкованих провідників плати передавача

Тип лінії	Напруга, В	Струм, А	Ширина провідника, мм		Зазор, мм
			у широ- кому	у вузь- кому	
Силова	3,3	0,5	0,72	0,72	0,35
Силова	5	0,5	0,72	0,72	0,35
Сигнальна	3	0,1	0,55	0,3	0,35
Діаметр перехідних отворів, мм			0,5		
Діаметр контактного майданчика пере- хідного отвору, мм			1,0		

Після розрахунків отримали рекомендовані значення:

- для силових ліній — 0,72 мм;
- для сигнальних — 0,55 мм, якщо неможливо провести то 0,3 мм.

4.2.5 Розрахунок контактних майданчиків

Розміри контактних майданчиків для елементів поверхневого монтажу за формулою :

$$Dk = Dv + 0,3,$$

де Dk — розміри контактних майданчиків (довжина та ширина);

Dv — розміри виводів (довжина та ширина).

Отримані значення наведено в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 — Розміри виводів та контактних майданчиків для елементів поверхневого монтажу

Назва елемента	Dv	Dk
Резистори	0,4x1,55	0,7x1,9
Конденсатори керамічні	0,4x1,55	0,85x0,85
Конденсатор танталовий	2,4x1,3	2,7x1,6

Діаметри отворів для вивідних елементів знаходяться за формулою:

$$Do = Dv + 0,2,$$

де Do — діаметр отворів для вивідних елементів;

Dv — розміри виводів(діаметр).

Розміри контактних майданчиків для вивідних елементів розраховуються за формулою:

$$Dk = Do + 2/3Do$$

Отримані значення наведено в таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 — Розміри контактних майданчиків для вивідних елементів

Назва елемента	Dv	Do	Dk
Роз'єм NX1500-02SM	1,0	1,2	2,0
Роз'єм Jack 6,3мм	1,2	1,5	2,5

Розміри контактних майданчиків для елементів які не вказані у таблиці 4.3 та 4.4, обрано згідно з рекомендаціями вказаними у технічній документації на елемент від виробника.

4.2.6 Розрахунок площі друкованої плати

Мінімальна площа ДП знаходиться за формулою:

$$S_{дп} = S_m + (1,5 \dots 2)S_c + (2,5 \dots 3)S_v + S_k,$$

де $S_{дп}$ — мінімальна площа ДП, мм², S_m — площа малогабаритних елементів, мм², S_c — площа середньогабаритних елементів, мм², S_v — площа великогабаритних елементів, мм², S_k — площа майданчиків під кріплення плати, мм².

Результати розрахунку площі елементів та плати занесені у таблицю 4.5.

Таблиця 4.5 — Площа елементів та мінімальна площа плати.

Назва елемента	Площа елемента, мм ²	Кількість	Загальна площа
Резистор	12,408	29	359,832
Конденсатор	10,58	18	190,44
Діод Шоткі	25,017	1	25,017
Світлодіод	7,39	4	29,56
Котушка індуктивності	67,015	1	67,015
Конденсатор танталовий	43,688	3	131,064
Конденсатор електролітичний	35,581	1	35,581
Кварцовий резонатор	74,496	1	74,496
SN74LVC1GX04DCKR	9,028	1	9,028
Підстроювальний резистор	24,496	1	24,496
ASM1117	58,807	1	58,807
TL431	11,305	1	11,305
MCP73831	11,468	1	11,468
MC34063A	39,458	1	39,458
LM258N	39,766	1	39,766
PCM1808	39,707	1	39,707
microUSB	100,691	1	100,691
Роз'єм NX1500-02SM	46,36	1	46,36
nRF24L01	440,801	1	440,801
Jack 6,3mm	667,213	1	667,213
ESP WROOM-32 DEVKIT1	1473,337	1	1473,337
Площа для кріплення	144	1	144
Мінімальна площа ДП, мм ²		8261,4145	

Для того щоб визначитись з розмірами потрібно обрати клас та тип монтажу елементів на ДП. Для друкованої плати передавача було обрано клас С тип 2, згідно IPC-7070, J-STD-013 [10]. На рис. 4.1 [11], показано зразок встановлення елементів.

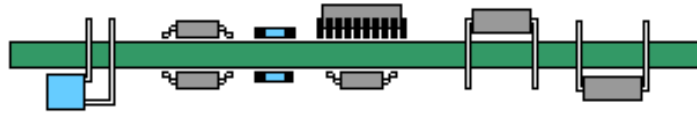


Рисунок 4.1 — Зразок встановлення елементів на плату

З отриманих даних було обрано плату розміром 60х75мм. Вивідні та SMD елементи будуть встановлюватись на різних сторонах плати.

4.2.7 Трасування друкованої плати передавача

Трасування ДП виконано у програмному забезпеченні Altium Designer [12]. Трасування верхнього шару показано на рис. 4.2, нижнього — на рис. 4.3.

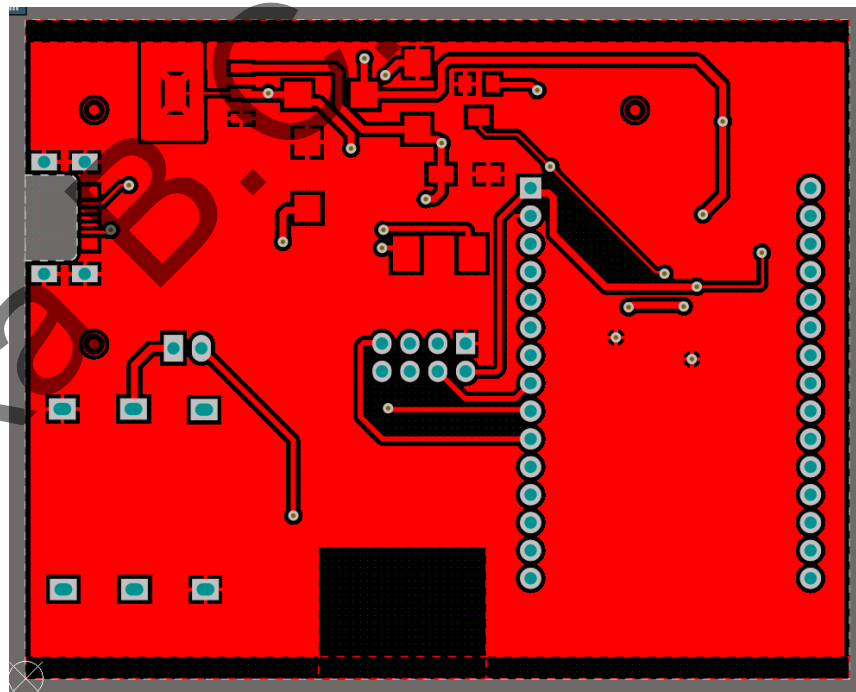


Рисунок 4.2 — Трасування верхнього шару

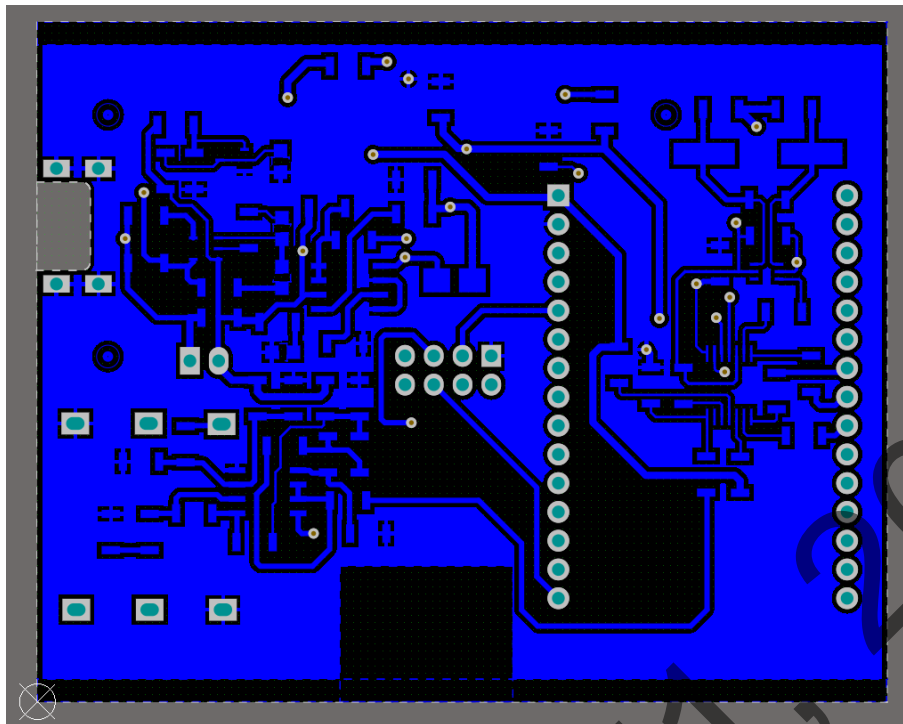


Рисунок 4.3 — Трасування нижнього шару

Додатково показано 3D-модель ДП на рис. 4.4 та 4.5.

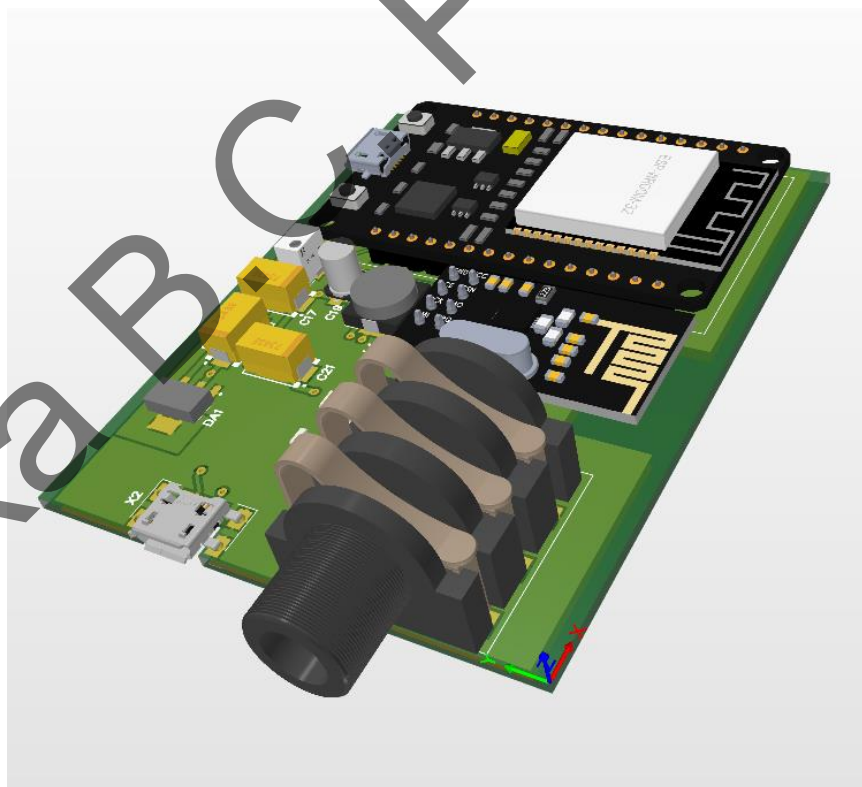


Рисунок 4.4 — 3D-модель ДП зі сторони верхнього шару

Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата

PI71.4644 15.001 ПЗ

Лист

40

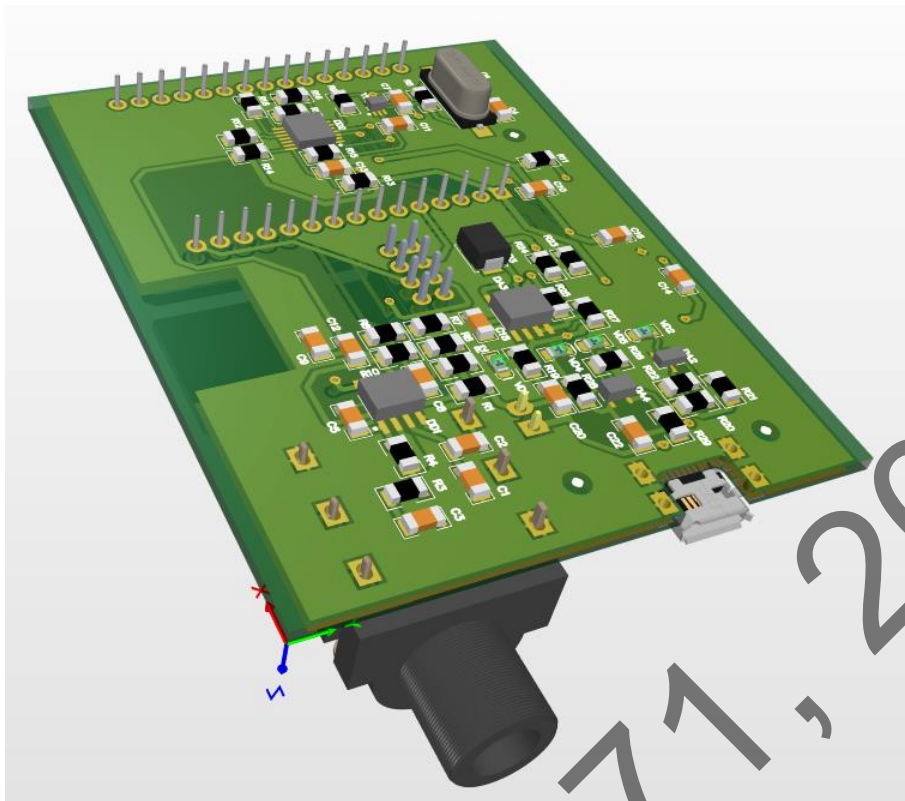


Рисунок 4.5 — 3D-модель ДП зі сторони нижнього шару

4.3 Проектування друкованого вузла приймача

4.3.1 Вибір матеріалу друкованої плати

Матеріал друкованої плати приймача обрано аналогічний що і у пункті 4.2.1, а саме двосторонній фольгований склотекстоліт FR4 товщиною 1,5 мм, та товщиною фольги 35мкм.

4.3.2 Вибір технології виготовлення

Технологія виготовлення обрана аналогічна що і у пкнкті 4.2.2, комбінований позитивний метод

4.3.3 Вибір класу точності друкованої плати

Клас точності для плати приймача обирається аналогічно як описано у пункті 4.2.3. Так як деякі елементи мають ширину контактів 0,3мм обрано третій клас точності.

Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата

PI71.4644 15.001 ПЗ

Лист

41

4.3.4 Розрахунок ширини друкованих провідників

Розрахунок ширини провідників проведено у програмному забезпеченні Mathcad 15. Отримані дані занесені у таблицю 4.6. Знімки екрана з розрахунком у Mathcad 15 будуть наведені у додатку В. Значення можуть бути округлені у більшу сторону.

Таблиця 4.6 — Ширина друкованих провідників плати передавача

Тип лінії	Напруга, В	Струм, А	Ширина провідника, мм		Зазор, мм
			у широкому	у вузькому	
Силова	9	0,7	1,0	1,0	0,35
Силова	3,3	0,5	0,72	0,72	0,35
Сигнальна	3,5	0,1	0,55	0,3	0,35
Діаметр перехідних отворів, мм			0,5		
Діаметр контактної майданчика перехідного отвору, мм			1,0		

Після розрахунків отримали рекомендовані значення:

- для силових ліній — 0,72 мм, та 1 мм;
- для сигнальних — 0,55 мм, якщо неможливо провести то 0,3 мм.

4.3.5 Розрахунок контактних майданчиків

Розміри контактних майданчиків для елементів поверхневого монтажу за формулою :

$$Dk = Dv + 0,3,$$

де Dk — розміри контактних майданчиків (довжина та ширина);

Dv — розміри виводів (довжина та ширина).

Отримані значення наведено в таблиці 4.7.

Таблиця 4.7 — Розміри виводів та контактних майданчиків для елементів поверхневого монтажу

Назва елемента	D_v	D_k
Резистори	0,4x1,55	0,7x1,9
Конденсатори керамічні	0,4x1,55	0,7x1,9

Діаметри отворів для вивідних елементів знаходяться за формулою:

$$D_o = D_v + 0,2,$$

де D_o — діаметр отворів для вивідних елементів;

D_v — розміри виводів(діаметр).

Розміри контактних майданчиків для вивідних елементів розраховуються за формулою:

$$D_k = D_o + 2/3D_o$$

Отримані значення наведено в таблиці 4.8.

Таблиця 4.8 — Розміри контактних майданчиків для вивідних елементів

Назва елемента	D_v	D_o	D_k
Потенціометр	1,0	1,2	2,0
Роз'єм NX1500-02SM	1,0	1,2	2,0
Роз'єм Jack 6,3мм	1,2	1,5	2,5

Розміри контактних майданчиків для елементів які не вказані у таблиці 4.3 та 4.4, обрано згідно з рекомендаціями вказаними у технічній документації на елемент від виробника.

4.3.6 Розрахунок площі друкованої плати

Розрахунок площі плати приймача виконувався аналогічно до описаного у пункті 4.2.6.

Результати розрахунку площі елементів та плати занесені у таблицю 4.9.

					PI71.4644 15.001 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		43

Таблиця 4.9 — Площа елементів та мінімальна площа плати.

Назва елемента	Площа елемента, мм ²	Кількість	Загальна площа
1	2	3	4
Резистор	12,408	11	136,488
Конденсатор	10,58	21	222,18
Діод Шоткі	25,017	1	25,017
Світлодіод	7,39	1	7,39
Котушка індуктивності	67,015	1	67,015
Змінний резистор	317,02	1	317,02
Конденсатор електро-літичний	35,581	4	142,324
Кварцовий резонатор	74,496	1	74,496
SN74LVC1GX04DCKR	9,028	1	9,028
Підстроювальний резистор	24,496	1	24,496
1	2	3	4
Діод 1N4007	7,926	1	7,926
Роз'єм живлення	184,036	1	184,036
MC34063A	39,458	1	39,458
LM258N	39,766	1	39,766
PCM5102A	52,392	1	52,392
Роз'єм NX1500-02SM	46,36	3	139,08
nRF24L01	440,801	1	440,801
Jack 6,3mm	667,213	1	667,213
ESP WROOM-32 DEVKIT1	1473,337	1	1473,337
Площа для кріплення	200	1	200
Мінімальна площа ДП		9182,587	

Для того щоб визначитись з розмірами потрібно обрати клас та тип монтажу елементів на ДП. Для друкованої плати передавача було обрано клас С тип, згідно IPC-7070, J-STD-013 [10]. На рис. 4.5 [11], показано зразок встановлення елементів.



Рисунок 4.6 — Зразок встановлення елементів на плату

З отриманих даних було обрано плату розміром 60x75мм. Вивідні та SMD елементи будуть встановлюватись на різних сторонах плати.

4.3.7 Трасування друкованої плати приймача

Трасування ДП виконано у програмному забезпеченні Altium Designer [12]. Трасування верхнього шару показано на рис. 4.7, нижнього — на рис. 4.8.

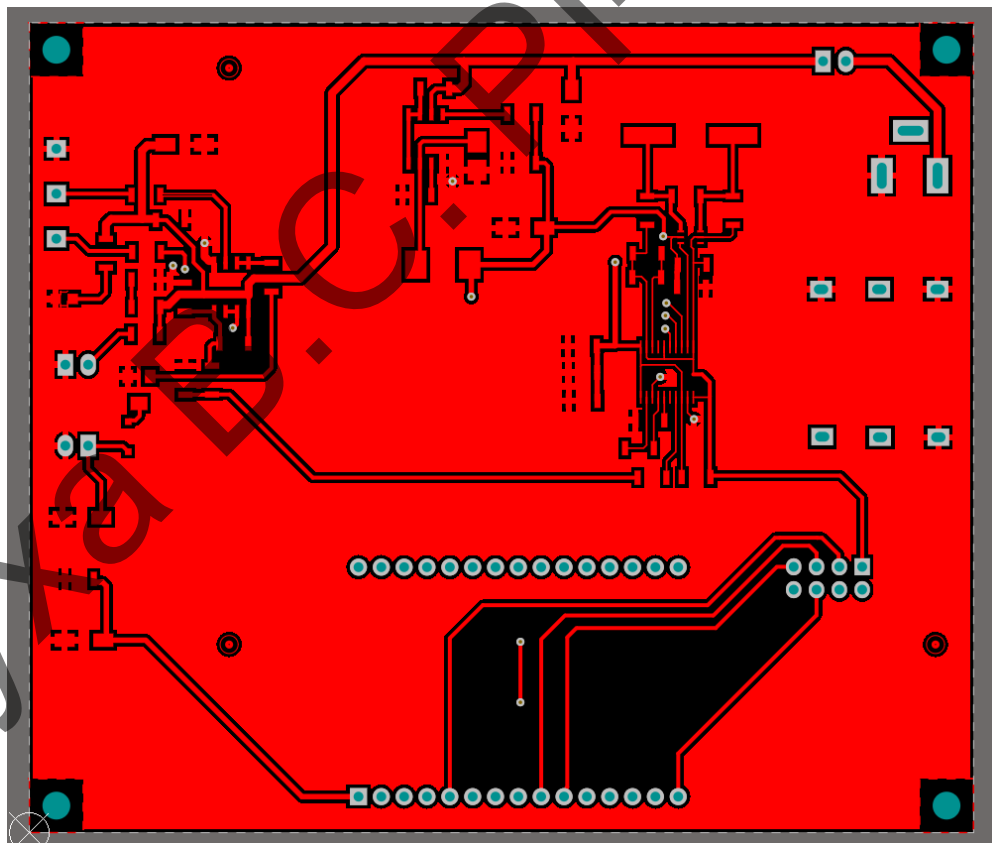


Рисунок 4.7 — Трасування верхнього шару

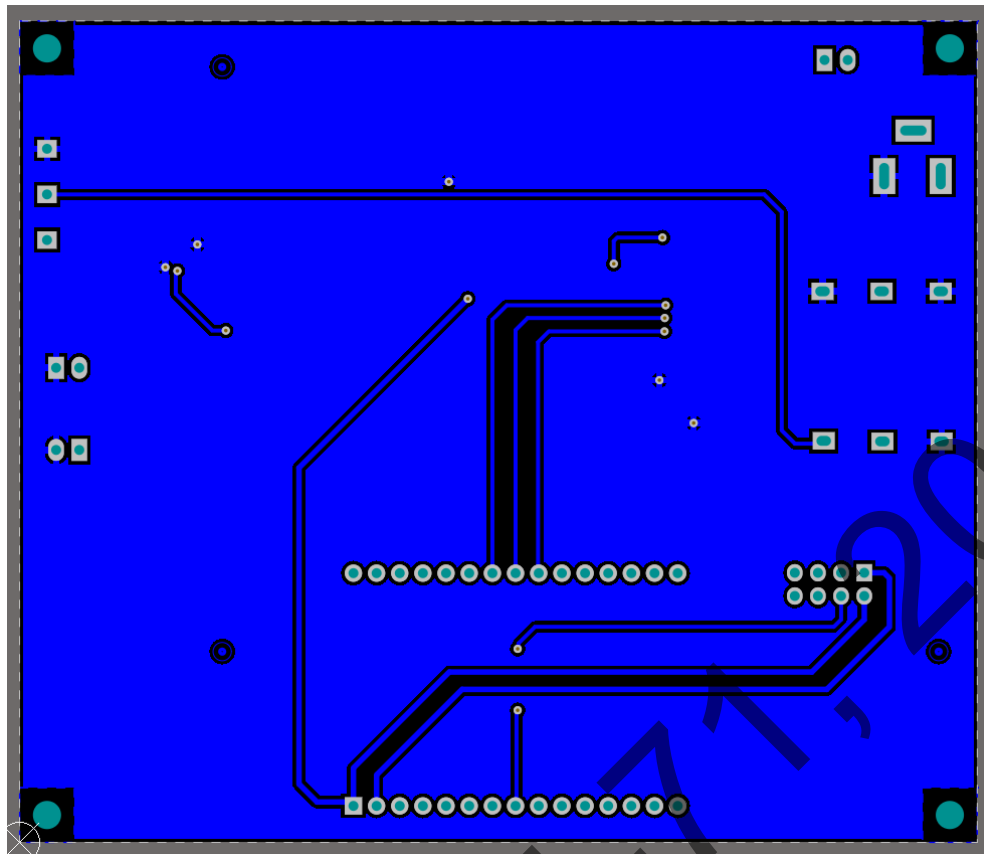


Рисунок 4.8 — Трасування нижнього шару

Додатково показано 3D-модель ДП на рис. 4.9.

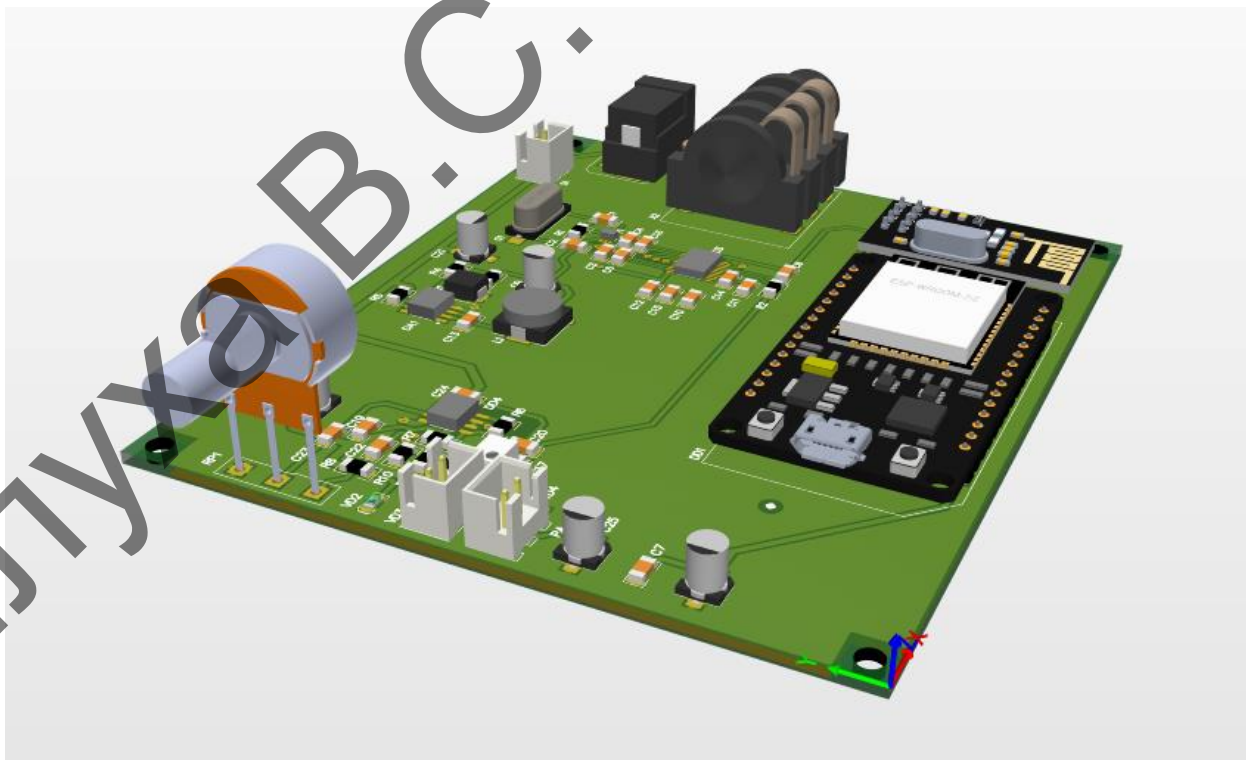


Рисунок 4.9 — 3D-модель ДП

Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата

PI71.4644 15.001 ПЗ

Лист

46

У результаті спроектовано електронні модулі приймача та передавача з розмірами: Приймач — 127х90х31 мм, а передавач — 86х60х24 мм

4.4 Вибір припою та проводу

Відповідно до директиви європейського парламенту № 2011/65/EU «RoHS 2» на території Європи діє обмеження до використання свинцю у побутовій техніці [13]. Через це використовувати олов'яно свинцеві припої є неприпустимо. У безсвинцевих припоях до олова додаються стабілізатори (наприклад вісмут), адже при низьких температурах олово стає крихким.

Для вивідних елементів було обрано припій SAC305, це безсвинцевий припій із додаванням срібла. Срібло у припої дозволяє покращити провідність та стійкість до корозії. Проте даний припій має і недолік, висока температура плавлення (у порівнянні з ПОС-61), що підвищує ризик перегріву елементів.

Склад припою Sn – 96,5%, Ag – 3,0%, Cu – 0,5%, температура плавлення — 219°C.

Для пайки SMD компонентів обрано паяльну пасту V8B45. Це безсвинцева легкоплавка паяльна паста, склад сплаву Sn – 42%, Si – 58%, температура плавлення 138°C. Завдяки низькій температурі плавлення знижується ризик перегріву елементів поверхневого монтажу при встановленні їх на плату.

Для підключення індикатора та його підсвітки, акумулятора та вмикача обрано провід FLRY-A0.22. На кінцях проводі для підключення до плати у роз'єми NX1500-02SM використано штекер NX1501-02PFS.

					PI71.4644.15.001 ПЗ	Лист
						47
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

5 ПРОЕКТУВАННЯ КОРПУСІВ ДЛЯ ЧАСТИН ПРИЛАДУ

Корпуси для передавача та приймача змодельовані у програмному забезпеченні SolidWorks [14].

5.1 Проектування корпусу передавача

Корпус передавача складається з чотирьох частин: основи, кришки, напівпрозорої вставки у вікно для світлодіода, та скоби для кріплення передавача. Частини корпусу виготовляються і з пластику методом лиття у пресформу, а скоба із листового металу методом штампування.

На рисунку 5.1 показано встановлення друкованого вузла у корпус.

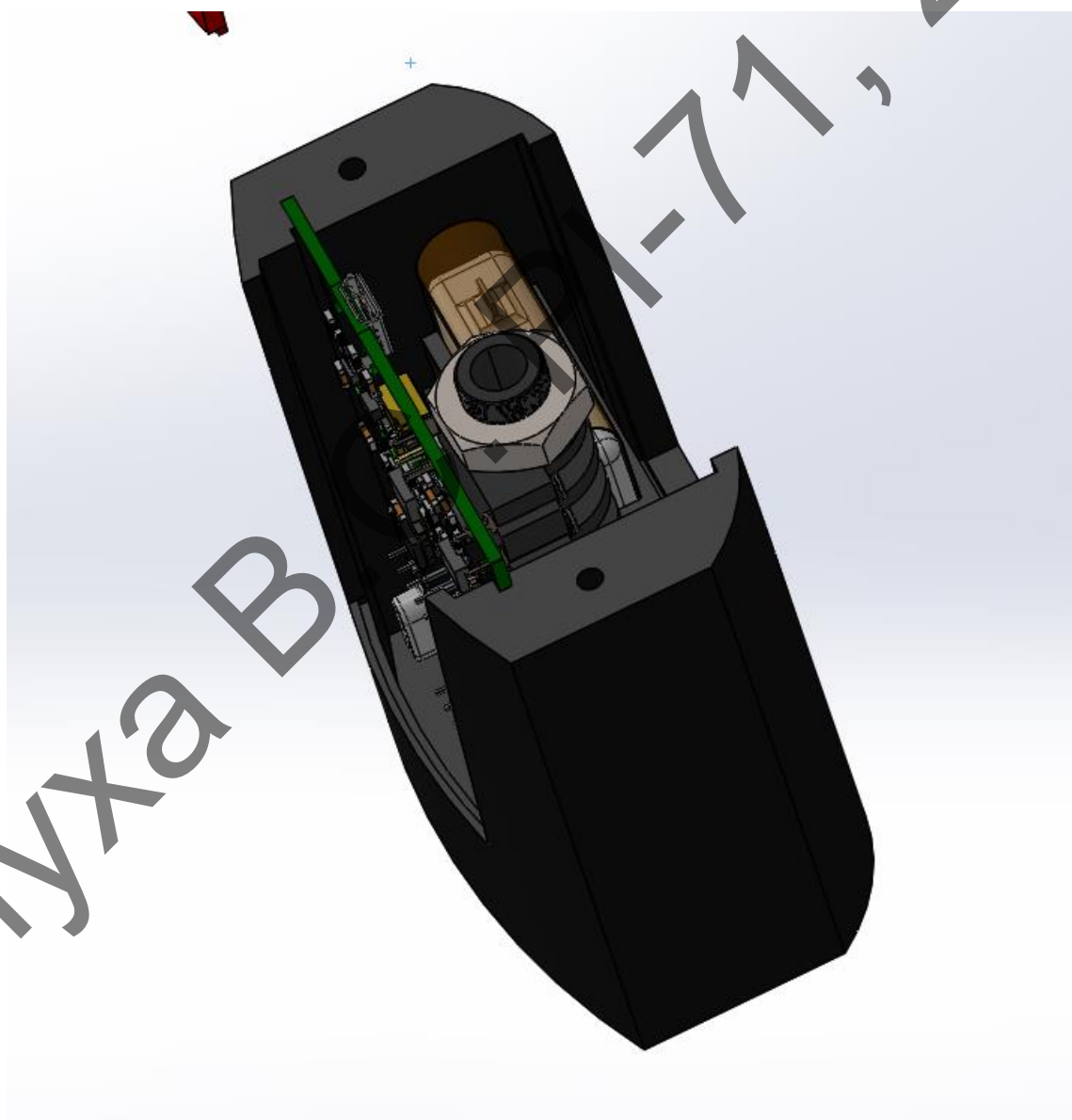


Рисунок 5.1 — Встановлення друкованого вузла у корпус

Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата

PI71.4644 15.001 ПЗ

Лист

48

Кріплення плати відбувається за рахунок розміщення їх в пази корпусу.

Зовнішній вигляд передавача показано на рисунку 5.2

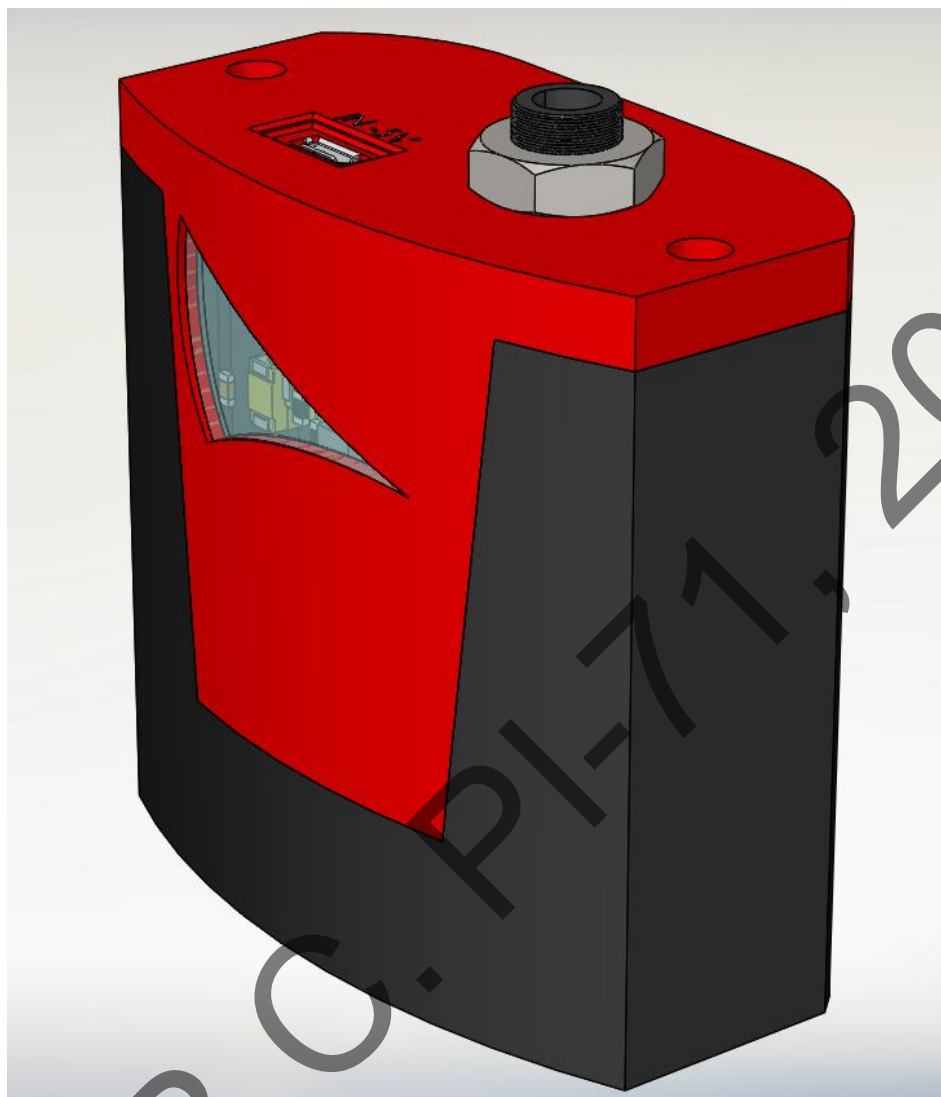


Рисунок 5.2 — Зовнішній вигляд передавача

На передній панелі розміщено роз'єми для підключення зарядного пристрою для акумулятора та вхідний аудіороз'єм.

5.1 Проектування корпусу приймача

Корпус приймача складається із чотирьох частин: основи, передньої та задньої стінок, кришки. Усі частини корпусу виготовляються із пластику методом лиття у пресформу.

					PI71.4644 15.001 ПЗ	Лист
						49
Зм.	Лист	№ докum.	Підпис	Дата		

На рисунку 5.3 показано встановлення плати у корпус. Плата кріпиться за допомогою двох гвинтів до нижньої кришки та двох гвинтів, які затискають плату між верхньою та нижньою частинами корпусу.

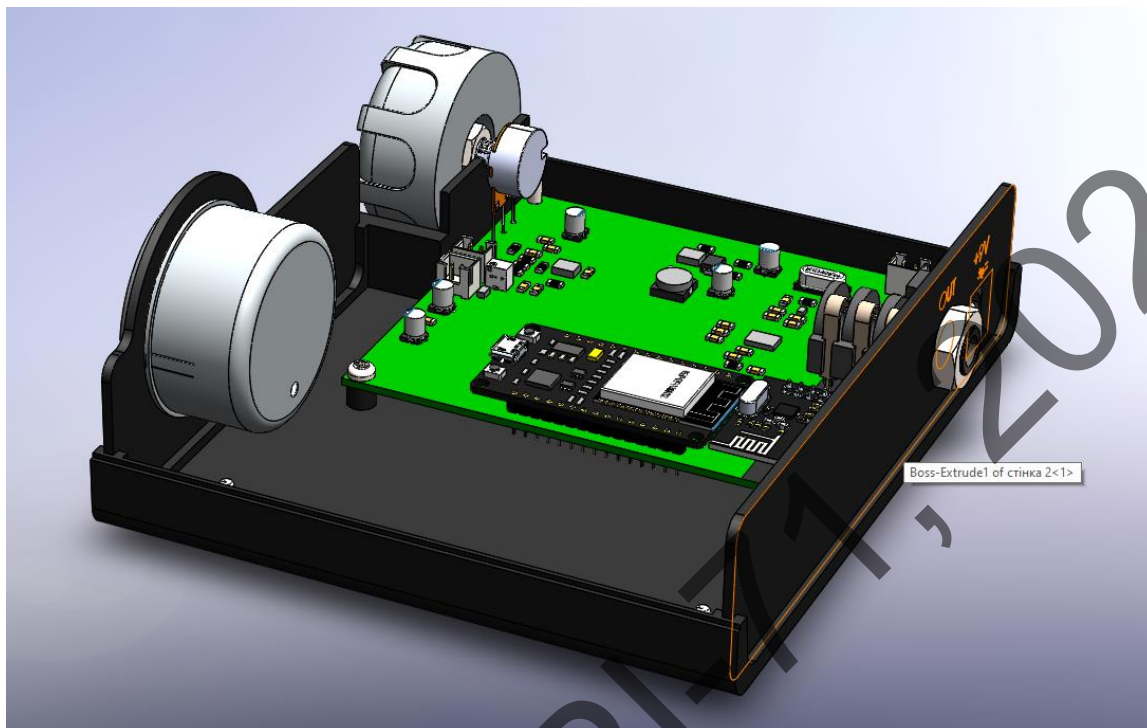


Рисунок 5.3 — Встановлення плати у корпус

Також було розроблено ручку регулятора рівня вихідного сигналу. Виконується із алюмінію методом лиття у пресформу, та подальшою полірувкою (рис. 5.4).

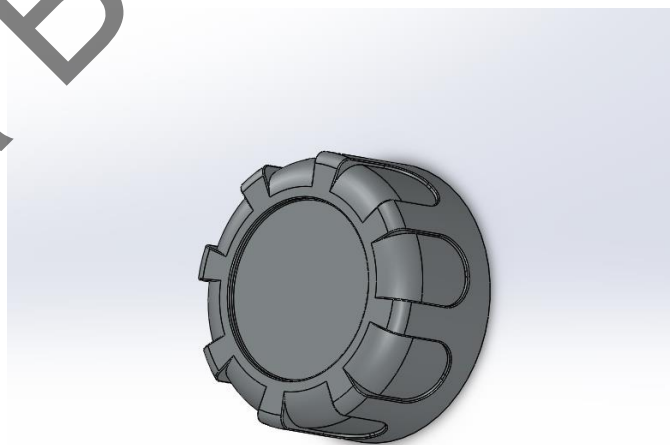


Рисунок 5.5 — Зовнішній вигляд ручки регулятора

					PI71.4644 15.001 ПЗ	Лист
						50
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

Зовнішній вигляд корпусу показано на рисунку 5.5

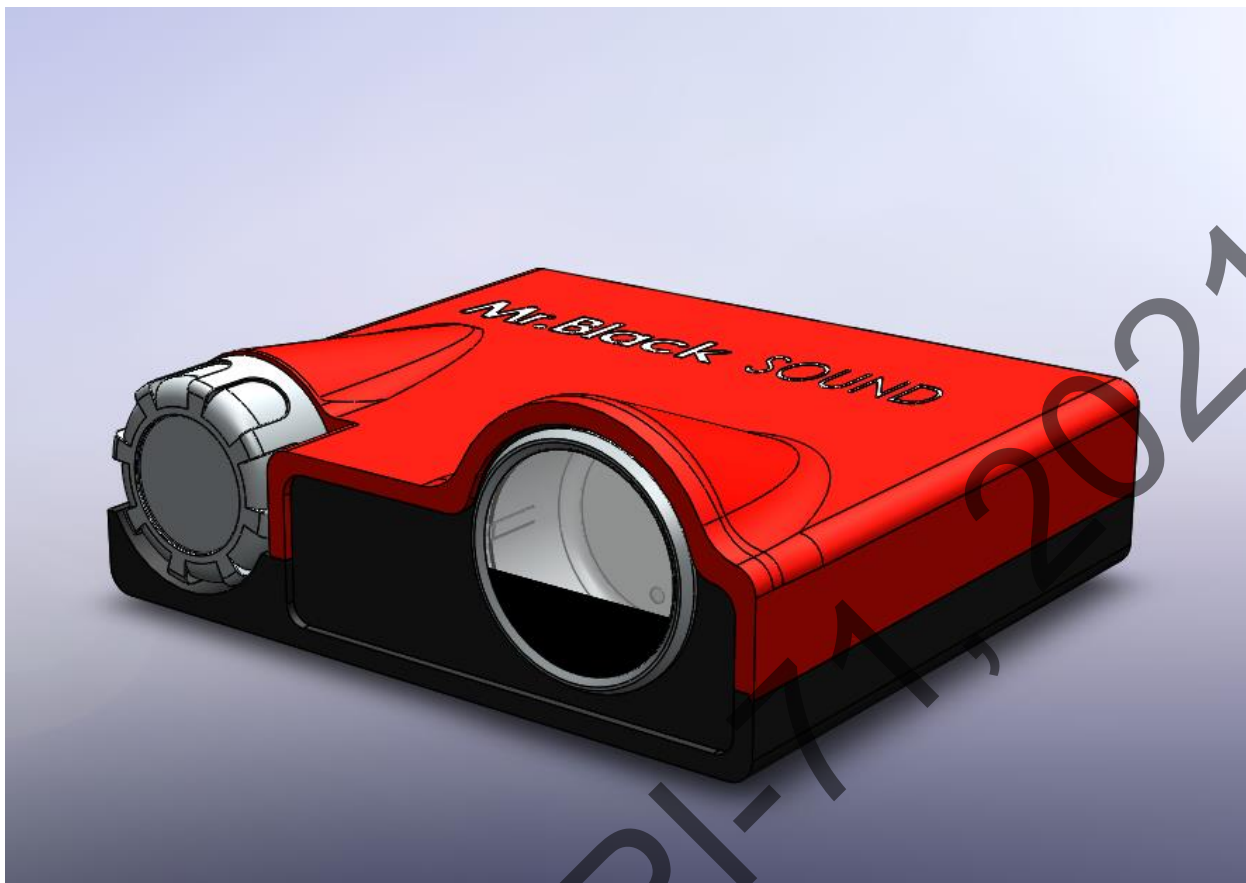


Рисунок 5.5 — Зовнішній вигляд корпусу

На передній панелі розміщено ручку регулятора рівня вихідного сигналу та індикатор рівня сигналу. Із зворотного боку розміщено вихідний аудіо-роз'єм та роз'єм для підключення живлення.

Розроблено конструкцію та дизайн корпусу для передавача та приймача. Так приймач має розміри (ШхДхВ) 49х80х79 мм, а передавач — 135х154х61 мм.

Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата

PI71.4644 15.001 ПЗ

Лист

51

ВИСНОВКИ

1. У результаті проведеного аналізу існуючих радіосистем, виявлено їхні основні недоліки, а саме висока вартість та живлення передача від батарейок, які постійно потрібно замінювати. Для усунення цих недоліків запропоновано розробити дешевий аналог, який працює від акумулятора.

2. Проведено проектування структурних та електричних принципових схем приймача та передавача, які дозволяють реалізувати зв'язок музичного інструменту з базовою станцією на частоті 2,4 ГГц з використанням цифрових методів передавання даних. У якості джерела живлення виступає полімерний Li-Ion акумулятор на 2000 мАг. Для забезпечення відповідного діапазону частот та потрібного рівня вхідного сигналу на вході АЦП розміщено та розраховано схему попереднього підсилювача та активного фільтра низьких частот. Коефіцієнт підсилення складає 7,4, а частота зрізу ФНЧ — 20 кГц.

3. Проведено аналізу методів виготовлення друкованих плат, обрано комбінований позитивний метод для плат передавача та приймача. З урахуванням класу точності, напруги та сили струму розраховано ширину друкованих провідників для силових та сигнальних ліній. Розроблено друковані плати передавача та приймача в середовищі Altium Designer, та оформлено відповідну конструкторську документацію. Габаритні розміри електронних модулів приймача складають 127x90x31 мм, а передавача — 86x60x24 мм

4. Розроблено конструкцію та дизайн корпусу для передавача та приймача. Так приймач має розміри (ШхДхВ) 49x80x79мм, а передавач — 135x154x61. Оформлено конструкторську документацію на частини приладу, та прилад загалом

					PI71.4644.15.001 ПЗ	Лист
						52
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. AKG DMS100 Inst Set Dgtal Wireless Micsys купить цифровую радиосистему в Киеве, Днепре и Одессе – Soundmag — Режим доступа: https://soundmag.ua/uk/akg-dms100-inst-set-dgtal-wireless-micsys.html?gclid=Cj0KCQjw4v2EBhCtARIsACan3nxkjxGLThShOBMtrWtYHRX3vnlO_t-.

2. Line6 Relay G30 Радиосистема цифровая гитарная — купить в Киеве и Украине: цена, стоимость и отзывы в Struny — Режим доступа: <https://struny.com.ua/product/line6-relay-g30/>.

3. Line6 Relay G30*□ Інструментальна радіосистема. Купити за низькою ціною з фото і описом в Києві — Режим доступа : <https://muzline.ua/uk/instrumentalna-radiosistema-line6-relay-g30/>.

4. Проектування підсилювача та фільтру для інструментальної радіосистеми: Матеріали IV Всеукр. науково-техніч. конф. студентів та аспірантів [«Радіоелектроніка в ХХІ столітті»], (Київ, 25 – 26 травня 2021 р.)/РТФ, Київ, НТУУ "КПІ ім Ігоря Сікорського"— 96с.

5. РКС Компоненти - РАДІОМАГ — Режим доступа: <https://www.rcscomponents.kiev.ua/>.

6. Imrad - інтернет-магазин радіодеталей та електронних комплектуючих — Режим доступа: <https://imrad.com.ua/ua>.

7. RadioLED - продажа электронных компонентов в Украине — Режим доступа: <http://radioled.com/>.

8. Fire hazard testing – Part 11-2: Test flames – 1 kW nominal pre-mixed flame – Apparatus,confirmatory test arrangement and guidance – IEC 60695-11-2 [Чинний від 2017—06] — IEC, 2017. — 18с.

9. Платы печатные. Основные параметры конструкции ГОСТ 23751-86. — [Чинний від 1989—04—01] — М. : Государственный стандарт союза ССР, 1986. — 7с. .

					PI71.4644 15.001 ПЗ	Лист
						53
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

10. Обращение, упаковка, транспортировка и использование компонентов для поверхностного монтажа, чувствительных к влаге при пайке методом оплавления. IPC-7070, J-STD-013. — [Чинний від 2007—01] — IPC 2007. — 4с. .

11. Типы SMT сборок - DIP-монтаж< — Режим доступа: https://studbooks.net/2343452/tehnika/typy_sborok.

12. Altium Designer — Altium.com — Режим доступа: <https://www.altium.com/altium-designer>.

13. Directive 2011/65/EU — Schmidt-export.ru — Режим доступа: https://schmidt-export.ru/sites/default/files/pdf/ce_cert/2011-65_rohs-en.pdf.

14. Solid Works — Solidworks.com — Режим доступа: <https://www.solidworks.com>.

					PI71.4644 15.001 ПЗ	Лист
						54
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

ДОДАТОК А РОЗРАХУНОК ШИРИНИ ДРУКОВАНОГО ПРОВІДНИКА

Для силових:

Мінімальне значення ширини друкованого провідника $t1$ у вузькому місці, мм:

Вибираємо за класом точності- $tminD_p := 0.25mm$

Допуск на ширину провідника (нижнє відхилення) $\Delta tno_p := -0.05mm$

$$t1V_p := tminD_p + |\Delta tno_p| = 0.3mm$$

Мінімальне значення ширини друкованого провідника $t1$ у широкому місці, мм:

Вибираємо за класом точності- $tminD_p := 0.45mm$

Допуск на ширину провідника (нижнє відхилення) $\Delta tno_p := -0.1mm$

$$t1III_p := tminD_p + |\Delta tno_p| = 0.55mm$$

Мінімально допустиму ширину провідника $t2$ з урахуванням допустимого падіння напруги на ньому (3%):

Питомий опір провідників (Ом*мм²/м)- $\rho_{\omega} := 0.0175 \frac{\Omega \cdot mm^2}{m}$

Довжина провідника (м)- $l_p := 0.1m$

Товщина фольги (мм)- $h_p := 35 \cdot 10^{-3}mm$

Прикладена напруга (В)- $U_{жзр_p} := 5V$

Максимальний струм (А)- $I_{max_p} := 0.5A$

$$t2_p := \frac{l_p \cdot I_{max_p} \cdot \rho}{h_p \cdot U_{жзр_p} \cdot 0.03} = 0.167mm$$

Мінімально допустиму ширину провідника $t3$ з урахуванням допустимого рівня струму на ньому:

Максимальний струм (мА)- $I_{max_p} := 0.5A$

Товщина фольги (мм)- $h_p := 35 \cdot 10^{-3}mm$

Допустима щільність струму в провіднику (А/мм²)- $j_p := 20 \frac{A}{mm^2}$

$$t3_p := \frac{I_{max_p}}{h_p \cdot j_p} = 0.714mm$$

Для силових:

Мінімальне значення ширини друкованого провідника $t1$ у вузькому місці, мм:

Вибираємо за класом точності- $tminD_p := 0.25mm$

Допуск на ширину провідника (нижнє відхилення) $\Delta tno_p := -0.05mm$

$$t1V_p := tminD_p + |\Delta tno_p| = 0.3mm$$

Мінімальне значення ширини друкованого провідника $t1$ у широкому місці, мм:

Вибираємо за класом точності- $tminD_p := 0.45mm$

Допуск на ширину провідника (нижнє відхилення) $\Delta tno_p := -0.1mm$

$$t1III_p := tminD_p + |\Delta tno_p| = 0.55mm$$

Мінімально допустиму ширину провідника $t2$ з урахуванням допустимого падіння напруги на ньому (3%):

Питомий опір провідників (Ом*мм²/м)- $\rho_{\omega} := 0.0175 \frac{\Omega \cdot mm^2}{m}$

Довжина провідника (м)- $l_p := 0.1m$

Товщина фольги (мм)- $h_p := 35 \cdot 10^{-3}mm$

Прикладена напруга (В)- $U_{жзр_p} := 3.3V$

Максимальний струм (А)- $I_{max_p} := 0.4A$

$$t2_p := \frac{l_p \cdot I_{max_p} \cdot \rho}{h_p \cdot U_{жзр_p} \cdot 0.03} = 0.202mm$$

Мінімально допустиму ширину провідника $t3$ з урахуванням допустимого рівня струму на ньому:

Максимальний струм (мА)- $I_{max_p} := 0.4A$

Товщина фольги (мм)- $h_p := 35 \cdot 10^{-3}mm$

Допустима щільність струму в провіднику (А/мм²)- $j_p := 20 \frac{A}{mm^2}$

$$t3_p := \frac{I_{max_p}}{h_p \cdot j_p} = 0.714mm$$

Рисунок 1 — Розрахунок ширини друкованого провідника для силових ліній

З розрахованих даних обираємо ширину провідників у вузькому та широкому місці, при цьому повинна виконуватись умова:

Для силових:

$tmin_v \geq t1V_p$ у вузькому місці

$t2_p$
 $t3_p$
 $t4_p$

$tmin_w \geq t1III_p$ у широкому місці

$t2_p$
 $t3_p$
 $t4_p$

$$tmin_vS := \max(t1V_p, t2_p, t3_p, t4_p) = 0.714mm \quad tmin_wS := \max(t1III_p, t2_p, t3_p, t4_p) = 0.714mm$$

Рекомендована ширина для силового провідника

$$tmin_wS = 0.714mm$$

Рисунок 2 — Розрахунок ширини друкованого провідника для силових ліній

Для сигнальних:

Мінімальне значення ширини друкованого провідника t_1 у вузькому місці, мм:

Вибираємо за класом точності-

$$t_{minD_S} := 0.25\text{mm}$$

Допуск на ширину провідника (нижнє відхилення) $\Delta t_{no_S} := -0.05\text{mm}$

$$t_{1V_S} := t_{minD_S} + |\Delta t_{no_S}| = 0.3\text{-mm}$$

Мінімальне значення ширини друкованого провідника t_1 у широкому місці, мм:

Вибираємо за класом точності (на один менше)

$$t_{minD_S} := 0.45\text{mm}$$

Допуск на ширину провідника (нижнє відхилення)

$$\Delta t_{no_S} := -0.1\text{mm}$$

$$t_{1III_S} := t_{minD_S} + |\Delta t_{no_S}| = 0.55\text{-mm}$$

Мінімально допустиму ширину провідника t_2 з урахуванням допустимого падіння напруги на ньому (3%):

Питомий опір провідників (Ом*мм²/м)-

$$\rho := 0.0175 \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$$

Довжина провідника (м)-

$$l_S := 0.1\text{m}$$

Товщина фольги (мм)-

$$h_S := 35 \cdot 10^{-3} \text{mm}$$

Прикладена напруга (В)-

$$U_{жив_S} := 3.5\text{V}$$

Максимальний струм (А)-

$$I_{max_S} := 0.1\text{A}$$

$$t_{2S} := \frac{l_S \cdot I_{max_S} \cdot \rho}{h_S \cdot U_{жив_S} \cdot 0.03} = 0.048\text{-mm}$$

Мінімально допустиму ширину провідника t_3 з урахуванням допустимого рівня струму на ньому:

Максимальний струм (А)-

$$I_{max_S} := 0.1\text{A}$$

Товщина фольги (мм)-

$$h_S := 35 \cdot 10^{-3} \text{mm}$$

Допустима щільність струму в провіднику (А/мм²)-

$$j_S := 20 \frac{\text{A}}{\text{mm}^2}$$

$$t_{3S} := \frac{I_{max_S}}{h_S \cdot j_S} = 0.143\text{-mm}$$

Для сигнальних:

$$t_{min_v} \geq \begin{cases} t_{1V_S} \\ t_{2S} \\ t_{3S} \end{cases} \quad \text{у вузькому місці}$$

$$t_{min_w} \geq \begin{cases} t_{1III_S} \\ t_{2S} \\ t_{3S} \end{cases} \quad \text{у широкому місці}$$

$$t_{min_vP} := \max(t_{1V_S}, t_{2S}, t_{3S}) = 0.3\text{-mm}$$

$$t_{min_wP} := \max(t_{1III_S}, t_{2S}, t_{3S}) = 0.55\text{-mm}$$

Рекомендована ширина для сигнального провідника

$$t_{min_wP} = 0.55\text{-mm}$$

Рисунок 3 — Розрахунок ширини друкованого провідника для сигнальних ліній

ДОДАТОК Б РОЗРАХУНОК ШИРИНИ ДРУКОВАНОГО ПРОВІДНИКА

Для силових:

Мінімальне значення ширини друкованого провідника t_1 у вузькому місці, мм:

Вибираємо за класом точності- $t_{minDp} := 0.25mm$

Допуск на ширину провідника (нижнє відхилення) $\Delta t_{noP} := -0.05mm$

$$t_{1Vp} := t_{minDp} + |\Delta t_{noP}| = 0.3 \cdot mm$$

Мінімальне значення ширини друкованого провідника t_1 у широкому місці, мм:

Вибираємо за класом точності- $t_{minDp} := 0.45mm$

Допуск на ширину провідника (нижнє відхилення) $\Delta t_{noP} := -0.1mm$

$$t_{1IIIp} := t_{minDp} + |\Delta t_{noP}| = 0.55 \cdot mm$$

Мінімально допустиму ширину провідника t_2 з урахуванням допустимого падіння напруги на ньому (3%):

Питомий опір провідників ($\Omega \cdot mm^2/m$)- $\rho := 0.0175 \frac{\Omega \cdot mm^2}{m}$

$$l_p := 0.1m$$

Довжина провідника (м)-

$$h_p := 35 \cdot 10^{-3} mm$$

Товщина фольги (мм)-

$$U_{жизp} := 9V$$

Прикладена напруга (В)-

$$I_{maxp} := 0.7A$$

$$\text{Максимальний струм } t_{2p} := \frac{l_p \cdot I_{maxp} \cdot \rho}{h_p \cdot U_{жизp} \cdot 0.03} = 0.13 \cdot mm$$

Мінімально допустиму ширину провідника t_3 з урахуванням допустимого рівня струму на ньому:

Максимальний струм (мА)-

$$I_{maxp} := 0.7A$$

$$h_p := 35 \cdot 10^{-3} mm$$

Допустима щільність струму в провіднику (A/mm^2)-

$$j_p := 20 \frac{A}{mm^2}$$

Товщина фольги (мм)-

$$t_{3p} := \frac{I_{maxp}}{h_p \cdot j_p} = 1 \cdot mm$$

З розрахованих даних обираємо ширину провідників у вузькому та широкому місці, при цьому повинна виконуватись умова:

Для силових:

$$t_{min_v} \geq \begin{cases} t_{1Vp} \\ t_{2p} \\ t_{3p} \end{cases} \text{ у вузькому місці}$$

$$t_{min_w} \geq \begin{cases} t_{1IIIp} \\ t_{2p} \\ t_{3p} \end{cases} \text{ у широкому місці}$$

$$t_{min_vS} := \max(t_{1Vp}, t_{2p}, t_{3p}) = 1 \cdot mm$$

$$t_{min_wS} := \max(t_{1IIIp}, t_{2p}, t_{3p}) = 1 \cdot mm$$

Рекомендована ширина для силового провідника

$$t_{min_wS} = 1 \cdot mm$$

Рисунок 4 — Розрахунок ширини друкованого провідника для силових ліній

Для силових:

Мінімальне значення ширини друкованого провідника t_1 у вузькому місці, мм:

Вибираємо за класом точності- $t_{minD_P} := 0.25\text{mm}$

Допуск на ширину провідника (нижнє відхилення) $\Delta t_{nop} := -0.05\text{mm}$

$$t_{1V_P} := t_{minD_P} + |\Delta t_{nop}| = 0.3\text{mm}$$

Мінімальне значення ширини друкованого провідника t_1 у широкому місці, мм:

Вибираємо за класом точності- $t_{minD_P} := 0.45\text{mm}$

Допуск на ширину провідника (нижнє відхилення) $\Delta t_{nop} := -0.1\text{mm}$

$$t_{1III_P} := t_{minD_P} + |\Delta t_{nop}| = 0.55\text{mm}$$

Мінімально допустиму ширину провідника t_2 з урахуванням допустимого падіння напруги на ньому (3%):

Питомий опір провідників ($\text{Om} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$)- $\rho := 0.0175 \frac{\Omega \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$

$$l_P := 0.1\text{m}$$

Довжина провідника (м)-

$$h_P := 35 \cdot 10^{-3}\text{mm}$$

Товщина фольги (мм)-

$$U_{жив_P} := 3.3\text{V}$$

Прикладена напруга U_{RL}

$$I_{max_P} := 0.5\text{A}$$

$$\text{Максимальний струм } t_{2P} := \frac{l_P \cdot I_{max_P} \cdot \rho}{h_P \cdot U_{жив_P} \cdot 0.03} = 0.253\text{mm}$$

Мінімально допустиму ширину провідника t_3 з урахуванням допустимого рівня струму на ньому:

Максимальний струм (мА)-

$$I_{max_P} := 0.5\text{A}$$

$$h_P := 35 \cdot 10^{-3}\text{mm}$$

Допустима щільність струму в провіднику ($\text{A}/\text{мм}^2$)-
Товщина фольги (мм)-

$$j_P := 20 \frac{\text{A}}{\text{мм}^2}$$

$$t_{3P} := \frac{I_{max_P}}{h_P \cdot j_P} = 0.714\text{mm}$$

З розрахованих даних обираємо ширину провідників у вузькому та широкому місці, при цьому повинна виконуватись умова:

Для силових:

$$t_{min_V} \geq \begin{cases} t_{1V_P} \\ t_{2P} \\ t_{3P} \end{cases} \text{ у вузькому місці}$$

$$t_{min_W} \geq \begin{cases} t_{1III_P} \\ t_{2P} \\ t_{3P} \end{cases} \text{ у широкому місці}$$

$$t_{min_V_S} := \max(t_{1V_P}, t_{2P}, t_{3P}) = 0.714\text{mm} \quad t_{min_W_S} := \max(t_{1III_P}, t_{2P}, t_{3P}) = 0.714\text{mm}$$

Рекомендована ширина для силового провідника

$$t_{min_W_S} = 0.714\text{mm}$$

Рисунок 5 — Розрахунок ширини друкованого провідника для силових ліній

Для сигнальних:

Мінімальне значення ширини друкованого провідника t1 у вузькому місці, мм:

Вибираємо за класом точності-

$$t_{minD_S} := 0.25\text{mm}$$

Допуск на ширину провідника (нижнє відхилення) $\Delta t_{no_S} := -0.05\text{mm}$

$$t1V_S := t_{minD_S} + |\Delta t_{no_S}| = 0.3\text{-mm}$$

Мінімальне значення ширини друкованого провідника t1 у широкому місці, мм:

Вибираємо за класом точності (на один менше)

$$t_{minD_S} := 0.45\text{mm}$$

Допуск на ширину провідника (нижнє відхилення)

$$\Delta t_{no_S} := -0.1\text{mm}$$

$$t1III_S := t_{minD_S} + |\Delta t_{no_S}| = 0.55\text{-mm}$$

Мінімально допустиму ширину провідника t2 з урахуванням допустимого падіння напруги на ньому (3%):

$$\rho := 0.0175 \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$$

Питомий опір провідників (Ом*мм²/м)-

$$l_S := 0.1\text{m}$$

$$h_S := 35 \cdot 10^{-3} \text{mm}$$

Довжина провідника (м)-

$$U_{жиз_S} := 3.5\text{V}$$

Товщина фольги (мм)-

$$I_{max_S} := 0.1\text{A}$$

$$\text{Прикладена напруга } t2_S := \frac{l_S \cdot I_{max_S} \cdot \rho}{h_S \cdot U_{жиз_S} \cdot 0.03} = 0.048\text{-mm}$$

Максимальний струм (А)-

Мінімально допустиму ширину провідника t3 з урахуванням допустимого рівня струму на ньому:

Максимальний струм (А)-

$$I_{max_S} := 0.1\text{A}$$

Товщина фольги (мм)-

$$h_S := 35 \cdot 10^{-3} \text{mm}$$

Допустима щільність струму в провіднику (А/мм²)-

$$j_S := 20 \frac{\text{A}}{\text{mm}^2}$$

$$t3_S := \frac{I_{max_S}}{h_S j_S} = 0.143\text{-mm}$$

Для сигнальних:

$$t_{min_v} \geq \begin{cases} t1V_S \\ t2_S \\ t3_S \end{cases} \quad \text{у вузькому місці}$$

$$t_{min_w} \geq \begin{cases} t1III_S \\ t2_S \\ t3_S \end{cases} \quad \text{у широкому місці}$$

$$t_{min_vp} := \max(t1V_S, t2_S, t3_S) = 0.3\text{-mm}$$

$$t_{min_wp} := \max(t1III_S, t2_S, t3_S) = 0.55\text{-mm}$$

Рекомендована ширина для сигнального провідника $t_{min_wp} = 0.55\text{-mm}$

Рисунок 6 — Розрахунок ширини друкованого провідника
для сигнальних ліній

Позн.	Найменування				Кіл.	Примітки
	<u>Конденсатори</u>					
C1	12065C335JAT2A -AVX 3,3 мкФ 50В ±5%				1	
C2	12065C2255JAT2A -AVX 2,2 мкФ 50В ±5%				1	
C3	12065C105JAT2A -AVX 1 мкФ 50В ±5%				1	
C4	12065C333JAT2A -AVX 33 нФ 50В ±5%				1	
C5	12065C106JAT2A -AVX 10 мкФ 50В ±5%				1	
C6	12065C333JAT2A -AVX 33 нФ 50В ±5%				1	
C7	12065C3104JAT2A -AVX 100 нФ 50В ±5%				1	
C8	12065C223JAT2A -AVX 22 нФ 50В ±5%				1	
C9	12065C103JAT2A -AVX 10 нФ 50В ±5%				1	
C10	12065C104JAT2A -AVX 100 нФ 50В ±5%				1	
C11,C12	12065C106JAT2A -AVX 10 мкФ 50В ±5%				2	
C13,C14	12065C103JAT2A -AVX 10 нФ 50В ±5%				2	
C15	TAJD107M016#NJV -AVX 100мкФ 10В ±10%				1	
C16	12065C103JAT2A -AVX 10 нФ 50В ±5%				1	
C17	TAJD107M016#NJV -AVX 100мкФ 10В ±10%				1	
C18	12065C284JAT2A -AVX 280 нФ 50В ±5%				1	
C19	CA010M0100REC-0505-YAGEO 100мкФ 10В				1	
C20	12065C106JAT2A -AVX 10 мкФ 50В ±5%				1	
C21	TAJD107M016#NJV -AVX 100мкФ 10В ±10%				1	
C22	12065C106JAT2A -AVX 10 мкФ 50В ±5%				1	
	<u>Мікроконтролер</u>					
DD4	ESP WROOM-32 DEVKIT1				1	
					PI71.464415.001 ПЕ	
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		
Розробив	Білуха				Передавач Перелік елементів	
Перевір.	Адаменко					
Реценз.						
Н. Контр	Попсуй					
Затверд.	Зінгер					
					Лім.	Арк.
						1
					Аркушів	4
					КПІ ім. Ігоря Сікорського, РТФ	

Позн.	Найменування	Кіл.	Примітки
	<u>Мікросхеми</u>		
DD1	LM258N корпус SOIC-1,75 max height	1	
DD2	PCM1808 корпус TSSOP	1	
DA3	MC34063A корпус SOIC-1,75 max height	1	
DA4	MCP73831 корпус SOT-23	1	
	<u>Радіомодуль</u>		
DD3	nRF24L01	1	
	<u>Стабілізатори напруги</u>		
DA1	AMS1117CD-3.3 у корпусі SOT-232.	1	
DA2	TL431 у корпусі SOT-23	1	
	<u>Кварцовий резонатор</u>		
G1	KX-KT 12,288МГц	1	
	<u>Акумулятор</u>		
GB1	LP103454LC 3,7В 2000мАг	1	
	<u>Котушка індуктивності</u>		
L1	DR74-8R2-R - EATON 15 мкГн	1	

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

PI71.467769.001 ПЕ

Арк.
2

Позн.	Найменування	Кіл.	Примітки
	<u>Резистори</u>		
R1,R2	RC1206FR-100KR -Hitano 100кОм 0.25 Вт ±5%	2	
R3	RC1206FR-15KR -Hitano 15 кОм 0.25 Вт ±5%	1	
R4	RC1206FR-100KR -Hitano 100кОм 0.25 Вт	1	
R5	RC1206FR-1MR -Hitano 1 МОм 0.25 Вт ±5%	1	
R6,R7	RC1206FR-100KR -Hitano 100кОм 0.25 Вт ±5%	2	
R8	RC1206FR-560R -Hitano 560 Ом 0.25 Вт ±5%	1	
R9	RC1206FR-47R -Hitano 47 кОм 0.25 Вт ±5%	1	
R10	RC1206FR-560R -Hitano 560 Ом 0.25 Вт ±5%	1	
R11,R12,R13	RC1206FR-10KR -Hitano 10 кОм 0.25 Вт ±5%	3	
R14	RC1206FR-100R -Hitano 100 Ом 0.25 Вт ±5%	1	
R15	RC1206FR-10KR -Hitano 10 кОм 0.25 Вт ±5%	1	
R16,R17,R18	RC1206FR-47R -Hitano 47 кОм 0.25 Вт ±5%	3	
R19	RC1206FR-470R -Hitano 470 Ом 0.25 Вт ±5%	1	
R20	RC1206FR-2KR -Hitano 2 кОм 0.25 Вт ±5%	1	
R21	RC1206FR-4K3R -Hitano 4,3кОм 0.25 Вт ±5%	1	
R22	RC1206FR-15KR -Hitano 15 кОм 0.25 Вт ±5%	1	
R23	RC1206FR-1KR -Hitano 1 кОм 0.25 Вт ±5%	1	
R24	RC1206FR-3KR -Hitano 3 кОм 0.25 Вт ±5%	1	
R25	RC1206FR-180R -Hitano 180 Ом 0.25 Вт ±5%	1	
R26	RC1206FR-470R -Hitano 470 Ом 0.25 Вт ±5%	1	
R27	RC1206FR-360R -Hitano 360 Ом 0.25 Вт ±5%	1	
R28	RC1206FR-470R -Hitano 470 Ом 0.25 Вт ±5%	1	
R29	RC1206FR-K2R -Hitano 2,2 кОм 0.25 Вт ±5%	1	
	<u>Генератор тактових імпульсів</u>		
Y1	SN74LV1GX04DCKR		
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис
PI71.464415.001 ПЕ			
Арк.			
3			
Дата			

[illegible]

Позн.	Найменування	Кіл.	Примітки
	<u>Конденсатори</u>		
C1,C2	12065C333JAT2A -AVX 33 нФ 50В ±5%	2	
C3,C4	12065C106JAT2A -AVX 10 мкФ 50В ±5	2	
C5,C6	12065C3104JAT2A -AVX 100 нФ 50В ±5%	2	
C7	12065C103JAT2A -AVX 10 нФ 50В ±5%	1	
C8	CA010M0100REC-0505-YAGEO 100мкФ 16В	1	
C9	CA010M0150REC-0505-YAGEO 150мкФ 16В	1	
C10	12065C3104JAT2A -AVX 100 нФ 50В ±5%	1	
C11	12065C225JAT2A -AVX 2,2 мкФ 50В ±5%	1	
C12	12065C3104JAT2A -AVX 100 нФ 50В ±5%	1	
C13	12065C224JAT2A -AVX 220 нФ 50В ±5%	1	
C14	12065C225JAT2A -AVX 2,2 мкФ 50В ±5%	1	
C15,C16	12065C106JAT2A -AVX 10 мкФ 50В ±5%	2	
C17	12065C222JAT2A -AVX 2,2 нФ 50В ±5%	1	
C18	CA010M0100REC-0505-YAGEO 100мкФ 16В	1	
C19	12065C103JAT2A -AVX 10 нФ 50В ±5%	1	
C20	12065C225JAT2A -AVX 2,2 мкФ 50В ±5%	1	
C21	CA010M0100REC-0505-YAGEO 100мкФ 16В	1	
C22	12065C106JAT2A -AVX 10 мкФ 50В ±5%	1	
C23	12065C225JAT2A -AVX 2,2 мкФ 50В ±5%	1	
C24	12065C106JAT2A -AVX 10 мкФ 50В ±5%	1	
C25	CA010M047REC-0505-YAGEO 47 мкФ 16В	1	
	<u>Мікроконтролер</u>		
DD1	ESP WROOM-32 DEVKIT1	1	

					PI71.464415.002 ПЕ
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	
Розробив	Білуха				Приймач Перелік елементів
Перевір.	Адаменко.				
Реценз.					
Н. Контр	Попсуй				
Затверд.	Зінгер				

Лім.	Арк.	Аркушів
	1	3
КПІ ім. Ігоря Сікорського, РТФ		

Позн.	Найменування	Кіл.	Примітки
	<u>Мікросхеми</u>		
DD4	LM258N корпус SOIC-1,75 max height	1	
DD3	PCM5102A корпус TSSOP	1	
DA1	MC34063A корпус SOIC-1,75 max height	1	
	<u>Радіомодуль</u>		
		1	
DD2	nRF24L01		
	<u>Кварцовий резонатор</u>		
G1	KX-KT 12,288МГц	1	
	<u>Котушка індуктивності</u>		
L1	DR74-8R2-R – EATON 26 мкГн	1	
	<u>Індикатор рівня сигналу</u>		
PA1	SE-52 стрілочний мікроамперметр	1	
	<u>Потенціометр</u>		
PR1	16K1 – А 100К, L– 20 КС	1	
	<u>Підстроювальний резистор</u>		
PR2	3224W – BOURNS 10 кОм ±10%	1	

					РІ71.467769.002 ПЕ	Арк.
						2
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

[illegible]

[illegible]

Формат	Зона	Поз.	Позначення	Назва	Кільк	Прим
				Документація		
A3			PI71. 464415.001 СК	Складальний кресленик		
A1			PI71.464415.001 ЕЗ	Схема електрична принципова		
A4			PI71.464415.001 ПЕ	Перелік елементів		
				Деталі		
A3		1	PI71.758724.001	Друкована плата		
				Інші вироби		
		2		12065C335JAT2A -AVX 3,3 мкФ 50В ±5%	1	C1
		3		12065C2255JAT2A -AVX 2,2 мкФ 50В ±5%	1	C2
		4		12065C105JAT2A -AVX 1 мкФ 50В ±5%	1	C3
		5		12065C333JAT2A -AVX 33 нФ 50В ±5%	2	C4,C6
		6		12065C106JAT2A -AVX 10 мкФ 50В ±5%	5	C5,C11,C12,C20,C22
		7		12065C3104JAT2A -AVX 100 нФ 50В ±5%	1	C7
		8		12065C223JAT2A -AVX 22 нФ 50В ±5%	1	C8
		9		12065C103JAT2A -AVX 10 нФ 50В ±5%	4	C9, C13, C14, C16
		10		TAJD107M016#NJV -AVX 100мкФ 10В ±10%	3	C15, C17, C21
				PI71.464415.001		
Зм	Арк.	№ докум.	Підп	Дата		
Розроб.	Білуха				Лім.	Аркуш
Перев	Адаменко					1
Т.конт					Друкований вузол	
Н.конт	Попсуй				НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», РТФ, PI-71	
Затв.	Зінгер					

Формат	Зона	Поз.	Позначення		Назва	Кільк	Прим
		11			12065C284JAT2A -AVX 280 нФ 50В ±5%	1	C18
		12			CA010M0100REC-0505-YAGEO 100мкФ 10В	1	C19
		13			Мікроконтролер ESP WROOM-32 DEVKIT1	1	DD4
		14			Мікросхема LM258N корпус SOIC-1,75 max height	1	DD1
		15			Мікросхема АЦП PCM1808 корпус TSSOP	1	DD2
		16			Мікросхема MC34063A корпус SOIC-1,75 max height	1	DA3
		17			Мікросхема MCP73831 корпус SOT-23	1	DA4
		18			Стабілізатор AMS1117CD-3.3 у корпусі SOT-232.	1	DA1
		19			Стабілізатор TL431 у корпусі SOT-23	1	DA2
		20			Радіомодуль nRF24L01	1	DD3
		21			Кварц КХ-КТ 12,288МГц	1	G1
		22			Акумулятор LP103454LC 3,7В 2000мАг	1	GB1
		23			Індуктивність DR74-8R2-R - EATON 15 мкГн	1	L1
		24			Потенціометр 3224W - BOURNS 10 кОм ±10%	1	PR1
		25			RC1206FR-100KR -Hitano 100кОм 0.25 Вм ±5%	5	R1, R2, R4,R6,R7
		26			RC1206FR-15KR -Hitano 15 кОм 0.25 Вм ±5%	2	R3,R2 2
		27			RC1206FR-1MR -Hitano 1 МОм 0.25 Вм ±5%	1	R5
		28			RC1206FR-560R -Hitano 560 Ом 0.25 Вм ±5%	2	R8,R1 0
		29			RC1206FR-47R -Hitano 47 кОм 0.25 Вм ±5%	4	R9,R16, R17,R18
		30			RC1206FR-10KR -Hitano 10 кОм 0.25 Вм ±5%	4	R11,R12, R13,R15
		31			RC1206FR-470R -Hitano 470 Ом 0.25 Вм ±5%	3	R19,R26, R28
		32			RC1206FR-2KR -Hitano 2 кОм 0.25 Вм ±5%	1	R20
		33			RC1206FR-4K3R -Hitano 4,3кОм 0.25 Вм ±5%	1	R21
		34			RC1206FR-1KR -Hitano 1 кОм 0.25 Вм ±5%	1	R23
		35			RC1206FR-3KR -Hitano 3 кОм 0.25 Вм ±5%	1	R24
					P/71.464415.001		2
Зм	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата			

[illegible]

Формат	Зона	Поз.	Позначення	Назва	Кільк	Прим
				<u>Документація</u>		
A3			PI71. 464415.002 СК	Складальний кресленик		
A1			PI71.464415.002 ЕЗ	Схема електрична принципова		
A4			PI71.464415.002 ПЕ	Перелік елементів		
				<u>Деталі</u>		
A3		1	PI71.758724.002	Друкована плата	1	
				<u>Інші вироби</u>		
		2		12065C333JAT2A -AVX 33 нФ 50В ±5%	2	С1,С2
		3		12065C106JAT2A -AVX 10 мкФ 50В ±5	6	С3,С4,С15, С16,С22,С24
		4		12065C3104JAT2A -AVX 100 нФ 50В ±5%	4	С5,С6, С10,С12
		5		12065C103JAT2A -AVX 10 нФ 50В ±5	2	С7,С9
		6		CA010M0100REC-0505-YAGEO 100мкФ 16В	3	С8,С18, С21
		7		CA010M0150REC-0505-YAGEO 150мкФ 16В	1	С9
		8		12065C225JAT2A -AVX 2,2 мкФ 50В ±5%	4	С11,С14 С20,С23
		9		12065C224JAT2A -AVX 220 нФ 50В ±5%	1	С13
		10		12065C222JAT2A -AVX 2,2 нФ 50В ±5%	1	С17
PI71.464415.002						
Зм	Арк.	№ докум.	Підп	Дата	Друкований вузол	
Розроб.	Білуха					
Перев	Адаменко					
Т.конт						
Н.конт	Попсуй					
Затв.	Зінгер				НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», РТФ, РІ-71	
					Літ.	Аркуш
						1
						3

Формат	Зона	Поз.	Позначення	Назва	Кільк	Прим
		11		CA010M047REC-0505-YAGEO 47 мкФ 16В	1	C25
		12		Мікроконтролер ESP WROOM-32 DEVKIT1	1	DD1
		13		Мікросхема LM258N	1	DD4
		14		Мікросхема ЦАП PCM5102A	1	DD3
		15		Мікросхема MC34063A	1	DA1
		16		Радіомодуль nRF24L01	1	DD2
		17		Кварц КХ-КТ 12,288МГц	1	G2
		18		Індуктивність DR74-8R2-R - EATON 26 мкГн	1	L1
		19		Індикатор SE-52 стрілочний мікроамперметр	1	PA1
		20		Потенціометр 16K1 - А 100K, L- 20 КС	1	PR1
		21		Потенціометр 3224W - BOURNS 10 кОм ±10%	1	PR2
		22		RC1206FR-1MR -Hitano 1 МОм 0.25 Вм ±5%	1	R1
		23		RC1206FR-470R -Hitano 470 Ом 0.25 Вм ±5%	1	R2
		24		RC1206FR-11KR -Hitano 11 кОм 0.25 Вм ±5%	1	R3
		25		RC1206FR-18KR -Hitano 18 кОм 0.25 Вм ±5%	1	R4
		26		RC1206FR-0R3 -Hitano 0,3 Ом 0.25 Вм ±5%	1	R5
		27		RC1206FR-100KR -Hitano 100кОм 0.25 Вм ±5%	4	R6,R7, R10,R9
		28		RC1206FR-4K7R -Hitano 4,7кОм 0.25 Вм ±5%	1	R8
		29		RC1206FR-K2R -Hitano 2,2 кОм 0.25 Вм ±5%	1	R11
		30		Вмикач AE-H8800VAAAB	1	S1
		31		SN74LVC1GХ04DCKR	1	Y1
		32		Діод Шоткі VS-10BQ015-M3	1	VD1
		33		Діод випрямний 1N4007		VD4
		34		Світлодіод GNL-3014xx 5В		VD3
		35		Світлодіод GNL-0805xx 5В	4	VD2
Зм	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата	P171.464415.002	
						2

[illegible]