

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

**ФАКУЛЬТЕТ ЕЛЕКТРОНІКИ**

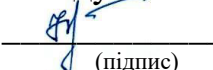
(повне найменування факультету)

**КАФЕДРА КОНСТРУЮВАННЯ ЕЛЕКТРОННО-ОБЧИСЛЮВАЛЬНОЇ  
АПАРАТУРИ**

(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

 Лисенко О.М.  
(підпис) (ініціали, прізвище)

« 17 » червня 2023 р.

**Дипломний проєкт  
на здобуття ступеня бакалавра**

зі спеціальності

172 «Телекомунікації та радіотехніка»

(код та назва спеціальності)

на тему: Вимірювач вольт-амперних характеристик біполярних транзисторів

Виконав: студент IV курсу, групи ДК-91  
(шифр групи)

Тисяк Євгеній Володимирович

(прізвище, ім'я, по батькові)



(підпис)

Керівник ст. викладач Лисенко О.І.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)



(підпис)

Рецензент с.н.с. Богдан О.В.

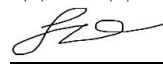
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)



(підпис)

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

Студент

  
(підпис)

Київ – 2023 року

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

Факультет електроніки

Кафедра конструювання електронно-обчислювальної апаратури

Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

Спеціальність 172 "Телекомунікації та радіотехніка"  
(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Завідувач кафедри  
Лисенко О.М.  
(прізвище ініціали)  
«03» квітня 2023 р.

**Завдання  
на дипломний проєкт студенту  
Тисяку Євгенію Володимировичу  
(прізвище, ім'я, по батькові)**

1. Тема проєкту Вимірювач вольт-амперних характеристик біполярних транзисторів  
керівник проєкту Лисенко Олександр Іванович, старший викладач  
затверджені наказом по університету 2063-с від 30.05.2023р.
2. Термін подання студентом проєкту 10 червня 2023 року
3. Вихідні дані до проєкту Пристрій являє собою одноплатну конструкцію, кліматичне використання УХЛ 4.2 по ГОСТ 15150-69. Пристрій макетного типу дає змогу автоматизовано вимірювати ВАХ біполярних транзисторів та надсилати результат на інші пристрої по шині UART. Габаритні розміри пристрою – не більше 70x60x20 мм. Живиться пристрій від сторонніх джерел +20В, +3.3В, -20В.
4. Зміст пояснювальної записки:
  - аналіз технічного завдання;
  - аналіз структурної схеми;
  - аналіз та обґрунтування елементної бази;
  - аналіз схеми електричної принципової;
  - аналіз друкованих вузлів;

- конструкторсько-технологічні розрахунки;
- аналіз програмного забезпечення;
- висновки.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень, плакатів, презентацій тощо):


- схема електрична принципова;
- схема електрична структурна;
- друкована плата;
- складальне креслення друкованої плати;
- перелік елементів;
- специфікація;

6. Дата видачі завдання 03.04.23

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

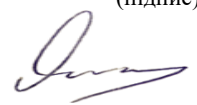
| №  | Назва етапів виконання дипломного проєкту | Термін виконання етапів проєкту | Примітка |
|----|---|---------------------------------|----------|
| 1  | Аналіз технічного завдання                | 03.04.23-04.04.23               | Виконано |
| 2  | Вибір елементної бази для проєкту         | 05.04.23-07.04.23               | Виконано |
| 3  | Схемотехнічне проєктування                | 08.04.23-11.04.23               | Виконано |
| 4  | Виконання схеми електричної принципової   | 12.04.23-17.04.23               | Виконано |
| 5  | Проектування друкованого вузла            | 18.04.23-21.04.23               | Виконано |
| 6  | Конструкторсько-технологічні розрахунки   | 22.04.23-28.04.23               | Виконано |
| 7  | Розрахунки надійності друкованої плати    | 02.05.23-04.05.23               | Виконано |
| 8  | Проектування програмного забезпечення     | 05.05.23-21.05.23               | Виконано |
| 9  | Виконання супроводжуючих креслень         | 21.05.23-28.05.23               | Виконано |
| 10 | Оформлення пояснювальної записки          | 28.05.23-9.06.2023              | Виконано |

Студент

  
(підпис)

Тисяк Є.В.  
(прізвище та ініціали)

Керівник проєкту

  
(підпис)

Лисенко О.І.  
(прізвище та ініціали)

## АНОТАЦІЯ

Вимірювач вольт-амперних характеристик біполярних транзисторів // Дипломний проект. Тисяк Є.В. «КПІ ім. Ігоря Сікорського», факультет електроніки, кафедра конструювання електронно-обчислювальної апаратури, група ДК-91 – К: «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2023. – С. – 89, табл. – 6, креслень – 4, бібліографічних найменувань – 15.

Дипломний проект вирішує задачу схемотехнічного проектування приладу макетного типу, призначеного для вимірювання різноманітних ВАХ біполярних транзисторів. Окрім прямого призначення, пристрій може бути використаний як програмоване джерело напруги та програмований вольтметр, здатний надсилати інформацію на інші пристрої за допомогою шини UART.

Пристрій містить роз'єми для конфігурації аналогової частини та можливість запису нового програмного забезпечення. Для полегшення вдосконалення наявного програмного забезпечення, в пояснювальній записці було детально описано всі функції та загальний алгоритм роботи.

Ключові слова: STM, UART, DAC, ADC, ВАХ, БІПОЛЯРНІ ТРАНЗИСТОРИ.

## **ABSTRACT**

The meter of current-voltage characteristics of bipolar transistors // Diploma project. Tysiak Y.V. "KPI named after Igor Sikorskyi", Faculty of Electronics, Department of Design of Electronic Computing Equipment, Group DK-91 - K: "KPI named after

Igor Sikorsky", 2023. - P. - 89, tab. – 6, drawings – 4, bibliographic titles – 15.

The diploma project solves the problem of schematic design of a mock-up type device intended for measuring various current-voltage characteristics of bipolar transistors. In addition to its direct purpose, the device can be used as a programmable voltage source and a programmable voltmeter capable of sending information to other devices via the UART bus.

The device contains connectors for the configuration of the analog part and the possibility of recording new software. To facilitate the improvement of the existing software, all functions and the general algorithm of operation were described in detail in the explanatory note.

Keywords: STM, UART, DAC, ADC, VAC, BIPOLAR TRANSISTORS.





**Пояснювальна записка**  
**до дипломного проекту**  
**на тему: Вимірювач вольт-амперних характеристик**  
**біполярних транзисторів.**

Київ – 2023 року

## ЗМІСТ

|  |    |
|--|----|
| ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ КОРОЧЕНЬ .....  | 3  |
| ВСТУП.....   | 5  |
| 1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ ТА ФОРМУЛЮВАННЯ ТЕХНІЧНОГО ЗАВДАННЯ .....          | 6  |
| 1.1.Аналіз ринку та наявних рішень.....                                      | 6  |
| 1.2.Формулювання вимог та задач .....  | 9  |
| Висновок до розділу 1 .....  | 10 |
| 2. СХЕМОТЕХНІЧНЕ ПРОЕКТУВАННЯ ТА РОЗРОБКА СХЕМИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ СТРУКТУРНОЇ..... | 12 |
| 2.1 Аналіз структурної схеми .....   | 12 |
| 2.2 Аналіз схеми електричної принципової .....                               | 17 |
| 2.3 Аналіз елементної бази.....  | 22 |
| 2.4 Симуляція схеми електричної принципової .....                            | 27 |
| Висновок до розділу 2 .....  | 38 |
| 3. РОЗРОБКА ДРУКОВАНОГО ВУЗЛУ ПРИСТРОЮ .....                                 | 39 |
| 3.1 Вибір і обґрунтування типу друкованої плати.....                         | 39 |
| 3.2 Вибір і обґрунтування матеріалу ДП .....                                 | 41 |
| 3.3 Вибір і обґрунтування класу точності друкованої плати .....              | 43 |
| 3.4 Вибір і обґрунтування методу виготовлення друкованої плати .....         | 44 |

ДК91.4 11711.001 ПЗ

|           |      |              |   |      |  |   |      |
|-----------|------|--------------|---|------|--|---|------|
|           |      |              |   |      | ДК91.4 11711.001 ПЗ  |   |      |
| Змн.      | Арк. | № докум.     | Підпис  | Дата |  |   |      |
| Розробив  |      | Тися Е.В.    |  |      | Вимірювач вольт-амперних характеристик біполярних транзисторів<br>Пояснювальна записка | Лім.                                    | Арк. |
| Перевірив |      | Лисенко О.І. |  |      |  | а                                       | 1    |
|           |      |              |   |      |  |   | 89   |
| Н. Контр. |      | Лисенко О.І. |  |      |  | КПІ ім. Ігоря Сікорського<br>ФЕЛ, ДК-91 |      |
| Завердив  |      | Лисенко О.І. |  |      |  |   |      |



|   |    |
|---|----|
| 3.5 Вибір та обґрунтування корпусу та кріплення друкованих плат .....                   | 46 |
| 3.6 Проектування друкованих плат у середовищі Altium Designer .....                     | 47 |
| Висновок до розділу 3 .....   | 48 |
| 4. РОЗРАХУНКИ, ЩО ПІДТВЕРДЖУЮТЬ ПРАВИЛЬНІСТЬ ПРИЙНЯТИХ<br>КОНСТРУКТОРСЬКИХ РІШЕНЬ ..... | 49 |
| 4.1 Конструкторсько-технологічний розрахунок друкованої плати .....                     | 49 |
| 4.2 Електричний розрахунок друкованої плати .....                                       | 58 |
| 4.3 Розрахунок віброміцності друкованого вузла.....                                     | 62 |
| 4.4 Розрахунок основних показників надійності .....                                     | 65 |
| Висновок до розділу 4 .....   | 69 |
| 5. ПРОЄКТУВАННЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ.....   | 71 |
| 5.1 Аналіз структури проєкту та файлів проєкт.....                                      | 71 |
| 5.2 Аналіз функцій .....  | 78 |
| Висновок до розділу 5 .....   | 84 |
| ВИСНОВКИ.....   | 85 |
| ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ .....  | 88 |
| ДОДАТОК А – Технічне завдання на проєктування   |    |
| ДОДАТОК Б – Програмне забезпечення мікроконтролера                                      |    |

## ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ КОРОЧЕНЬ

РЕА – Радіо-електронна апаратура

ВАХ – Вольт-амперні характеристики

БТ – Біполярний транзистор

ПК – Приватний комп'ютер

НП – Напівпровідниковий прилад

МК – Мікроконтролер

UART – Universal asynchronous receiver-transmitter

ADC – Analog to digital converter

DAC – Digital to analog converter

USB – Universal Serial Bus

САПР – Система автоматизованого проєктування і розрахунку

ЦАП – Цифро-аналоговий перетворювач

АЦП – Аналогово-цифровий перетворювач

USART – Universal synchronous-asynchronous receiver-transmitter

TTL – Transistor-transistor logic

HIS – High-speed internal

ДП – Друкована плата

ОП – Операційний підсилювач

GND – Ground

СЕП – Схема електрична принципова

|     |      |          |        |      |                     |      |
|-----|------|----------|--------|------|---------------------|------|
|     |      |          |        |      | ДК91.4 11711.001 ПЗ | Лист |
|     |      |          |        |      |                     | 3    |
| Зм. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                     |      |

СЕС – Схема електрична структурна

ПЗ – Програмне забезпечення

SMD – Surface mount technology

СЗЕ – Схема з загальним емітером

НБЕ – Напруга база-емітер

НКЕ – Напруга колектор-емітер

LTS – LTSpice

AD – Altium Designer

PSB – Polystyrene Foam Board

СК – Складальне креслення

ГОСТ – Государственный стандарт

КМ – Контактний майданчик

ЧТ – Частота тактування

ПМК – Периферія мікроконтролера

АМ – Апаратний модуль

ЦП – Центральний процесор

ДДП – Двостороння друкована плата

|     |      |          |        |      |                     |      |
|-----|------|----------|--------|------|---------------------|------|
|     |      |          |        |      | ДК91.4 11711.001 ПЗ | Лист |
|     |      |          |        |      |                     | 4    |
| Зм. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                     |      |

## ВСТУП

В сучасному світі широко використовуються біполярні транзистори.

Біполярний транзистор – це трьохпролюсний напівпровідниковий прилад. Він є базовим компонентом для створення РЕА, в одному ряді з такими компонентами як резистори чи конденсатори.

На відміну від багатьох інших базових компонентів РЕА, транзистор має велику кількість складних характеристик. Одним з основних є сімейство вольт-амперних характеристик прямого включення (Forward Characteristics).

Пряме включення БТ – це таке включення при якому на база-емітерний перехід подана пряма напруга. Саме таке включення є найбільш поширеним, але ВАХ БТ прямого включення сильно залежать від різноманітних зовнішніх факторів, таких як температура, радіаційний фон, сильні магнітні поля, тощо. До того ж, параметри БТ можуть відчутно відрізнятись в залежності від партії виробів. Через те, що характеристика БТ можуть так сильно коливатись, виникає потреба вимірювати їх для кожного екземпляру індивідуально.

В даній дипломній роботі, я ставлю перед собою завдання створити пристрій, що буде, в достатній мірі автоматизовано, вимірювати ВАХ БТ при прямому включенні, та надсилати результати та ПК, для того, щоб можна було переглянути їх в зручному для людини форматі, такому як графік чи діаграма.

Даний пристрій може знадобиться підприємствам, що займаються виготовленням БТ, різноманітним організаціям та людям, що займаються розробкою пристроїв з використанням БТ, науково-освітницьким центрам, наприклад університетам для навчання студентів інженерних спеціальностей, тощо.

|     |      |          |        |      |                     |      |
|-----|------|----------|--------|------|---------------------|------|
|     |      |          |        |      | ДК91.4 11711.001 ПЗ | Лист |
| Зм. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                     | 5    |

# 1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ ТА ФОРМУЛЮВАННЯ ТЕХНІЧНОГО ЗАВДАННЯ

## 1.1. Аналіз ринку та наявних рішень

Прилади здатні вимірювати ВАХ БТ можна умовно розділити на 3 категорії

1. Не автоматизовані
2. Автоматизовані, що не виводять результат в вигляді графіка
3. Автоматизовані, що виводять результат в вигляді графіка

Перший тип, неавтоматизовані прилади, це прилади, які зазвичай збираються, в одному екземплярі, в різних лабораторіях чи майстернях, тими ж людьми, що і будуть їх використовувати. Прикладом такого приладу є система з джерела пилкоподібної напруги та осцилографа.

Переваги:

- Можна швидко створити самому при наявності лабораторії чи майстерні
- Можна змінити конструкцію під конкретну задачу
- Може слугувати макетом для навчання студентів

Недоліки:

- При зміні вимірюваної характеристики слід вручну змінювати схему підключення. Наприклад переставити, щупи осцилографа чи генератора.
- Слід змінювати конструкцію при зміні типу транзистора. Наприклад інвертувати сигнал генератора пилкоподібної напруги.
- Немає можливості автоматизовано зберегти результати вимірювання.

|     |      |          |        |      |                     |      |
|-----|------|----------|--------|------|---------------------|------|
|     |      |          |        |      | ДК91.4 11711.001 ПЗ | Лист |
| Зм. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                     | 6    |

Другий тип, прилад, що автоматизовано робить вимірювання ВАХ БТ, але при цьому, не виводить отриманий результат у вигляді графіка. Приладом є Л2-54[1] (рис. 1.1).



Рисунок 1.1 – Прилад для випробувань малопотужних транзисторів і діодів Л2-

54

Для випробування НП слід підключити компонент, що тестується та виставити регуляторами потрібні налаштування. В конкретний момент часу, даний пристрій відображає значення ВАХ в певній точці, що є не дуже зручним, при спробі візуалізувати ВАХ.

Переваги:

- Можна випробовувати різні НП не змінюючи конструкцію самого приладу, але потребує зміни способу підключення.
- Не потребує наявності лабораторії чи майстерні, на відміну від приладів першого типу.

ДК91.4 11711.001 ПЗ

Лист

7

|     |      |          |        |      |
|-----|------|----------|--------|------|
|     |      |          |        |      |
| Зм. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |

### Недоліки:

- Спосіб відображення результатів може бути не зручним в певних ситуаціях.
- Немає можливості автоматизовано зберегти результати вимірювання.
- Не така велика гнучкість в налаштуваннях порівняно з приладами першого типу.

Третій тип, прилади, що автоматизовано вимірюють ВАХ БТ та здатні виводити результат у вигляді графіка. Зазвичай такі прилади виводять результат на ПК, що дозволяє, не тільки переглянути його, а і зберегти в зручному для подальшої комп'ютерної обробки вигляді. Прикладом такого приладу може бути АСС-4211[2] (рис. 1.2).



Рисунок 1.2 – Віртуальний вимірювач ВАХ НП АСС-4211

### Переваги:

- Прилад здатний виводити отримані результати в зручному для сприйняття людиною форматі графіка.

- Є можливість зберегти результати на ПК в зручному для комп'ютерної обробки вигляді. Це може бути .csv чи .txt файл.

Недоліки:

- Низька гнучкість в налаштуваннях.
- Потребує наявності ПК.

Пристрій даного типу я і буду розробляти в межах дипломного проєкту. Подібний вимірювач доцільно робити на основі МК з вбудованим UART та хорошими ADC та DAC.

Висновок до викладеного матеріалу такий: в даний момент на ринку є достатня кількість приладів різних типів, при цьому попит на них не є великим, це означає, що пристрій, що розробляється, хоч і може бути основою для повноцінного комерційного продукту, але такий продукт навряд буде користуватись високим попитом. Зазначу, що дипломний проєкт, переслідує не комерційні, а науково-освітницькі цілі, тому прилад є корисним і може цілком слугувати темою дипломної роботи.

## 1.2. Формулювання вимог та задач

Враховуючи результати аналізу ринку та цілі дипломного проєкту, я ставлю перед собою наступні вимоги до пристрою, що буде створений:

- Пристрій повинен містити на друкованій платі, всі необхідні для роботи компоненти.
- Наявне оснащення повинно давати змогу тестувати БТ певного типу. Наприклад n-p-n.
- Пристрій повинен містити засоби автоматизації вимірювань, наприклад мікроконтролер.

|     |      |          |        |      |                     |      |
|-----|------|----------|--------|------|---------------------|------|
|     |      |          |        |      | ДК91.4 11711.001 ПЗ | Лист |
| Зм. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                     | 9    |



- Пристрій повинен надсилати результати вимірювань на ПК за допомогою шини UART.
- Програмне забезпечення повинно бути універсальним і надавати змогу тестувати різні характеристики.
- Пристрій може потребувати для роботи не стандартного живлення.
- Потрібно забезпечити можливість змінювати програмне забезпечення внесенням змін в конструкцію.

Для того, щоб результат роботи в достатній мірі відповідав зазначеним вимогам, слід буде вирішити наступні задачі:

- Розробити схему електричну структурну (далі СЕС) пристрою
- Розробити схему електричну принципову
- Провести вибір елементної бази та обґрунтувати його
- Проектування друкованого вузла, розміщення компонентів на друкованій платі пристрою
- Конструкторсько-технологічні розрахунки друкованої плати
- Проектування друкованої плати у САПР
- Електричний розрахунок друкованої плати пристрою
- Розрахунок надійності друкованої плати пристрою

### Висновок до розділу 1

Проаналізувавши наявні на ринку рішення, я зрозумів, прилад якого формату буде доцільно розробити, враховуючи освітньо-просвітницьку мету проекту. Було вирішено створити тестувальний макет, що дасть змогу вимірювати ВАХ БТ n-p-n типу малої та середньої потужності та надсилати результат на ПК.

|     |      |          |        |      |                     |      |
|-----|------|----------|--------|------|---------------------|------|
|     |      |          |        |      | ДК91.4 11711.001 ПЗ | Лист |
|     |      |          |        |      |                     | 10   |
| Зм. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                     |      |

Такий пристрій розрахований на людей з відповідною інженерною освітою чи радіолюбителів самоучок. Він не тільки дасть змогу тестувати БТ, а ще і попрактикуватись в схемотехніці й розробці програмного забезпечення для мікроконтролерів ARM архітектури.

|     |      |          |        |      |                     |      |
|-----|------|----------|--------|------|---------------------|------|
|     |      |          |        |      | ДК91.4 11711.001 ПЗ | Лист |
| Зм. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                     | 11   |

## 2. СХЕМОТЕХНІЧНЕ ПРОЄКТУВАННЯ ТА РОЗРОБКА СХЕМИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ СТРУКТУРНОЇ

### 2.1 Аналіз структурної схеми

Проведемо аналіз блоків СЕС. Структурна схема наведена на рис. 2.1.

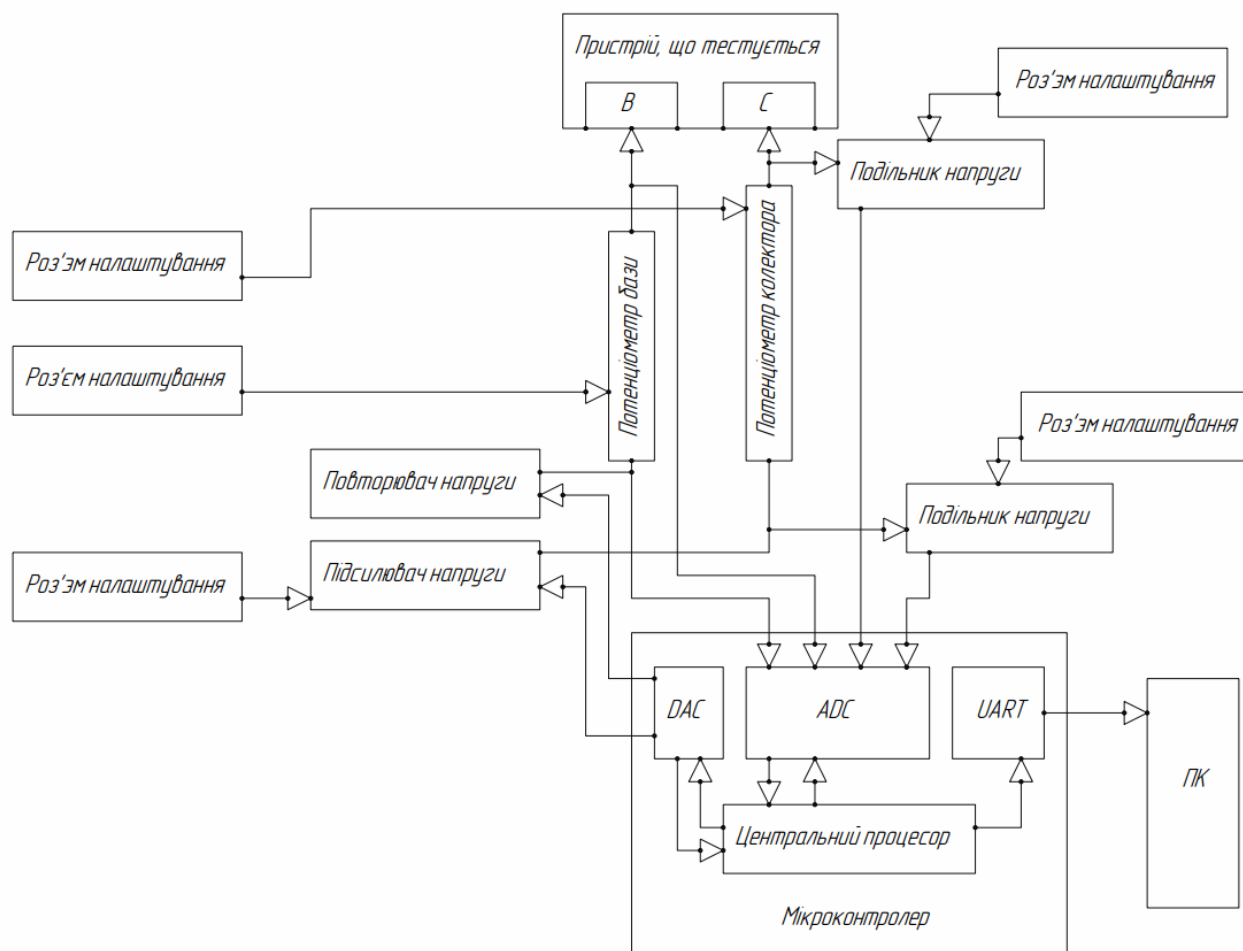


Рисунок 2.1 – Схема структурна

СЕС складається з наступних компонентів:

- Мікроконтролер – це головний пристрій в схемі, він повинен містити наступні блоки реалізовані програмно чи апаратно:

❖ DAC – ЦАП, за допомогою цього блоку, центральний процесор зможе встановлювати потрібні напруги з хорошою точністю. Наприклад для дванадцяти розрядного ЦАП число можливих напруг на виході становить 4096 варіантів. Для даного дипломного проєкту точність не так важлива, але все одно не стане зайвою. Всі вони лежать в діапазоні від 0 вольт до приблизно 3 вольт, з однаковим кроком. Важливою характеристикою ЦАП, є кількість каналів. В даній реалізації знадобиться два канали, тобто два незалежних виходи GPIO на яких ми зможемо встановлювати напругу окремо. Детально роботу ЦАП, його внутрішню структуру та налаштування в даному проєкті описано в «5. Проєктування програмного забезпечення».

❖ ADC – АЦП, це апаратний вбудований в МК блок, що дасть змогу визначати напругу в певній точці кола. В даній реалізації було використано 12 розрядний АЦП з чотирьома каналами, якщо кількість каналів менша, то можна по колу перемикатись між виходами всередині МК. Такий підхід зменшиться швидкість роботи пристрою, але дозволить по черзі перевірити напруги у всіх точках, що нас цікавлять. Як і в ЦАП в АЦП є 4096 можливих станів. Результат можна програмно приводити до значення в вольтах чи виводити умовні одиниці, це буде зручно при комп'ютерній обробці бо значення будуть в форматі цілих чисел. Детально роботу АЦП, його внутрішню структуру та налаштування в даному проєкті описано в «5. Проєктування програмного забезпечення».

❖ UART – це апаратний модуль (далі AM) USART всередині МК. Для даного AM є можливість налаштувати його на асинхронний режим роботи. В даній реалізації інформація поступає лише з пристрою на

ноутбук, тому для його роботи навіть не обов'язкова повноцінна шина UART. Але я зауважу, що для того, щоб отримати сигнал в віртуальний COM порт знадобиться USB to TTL конвертор та драйвера до нього. Вибір даного девайсу та програмного забезпечення до нього детально описано другому підрозділі «2.2 Аналіз схеми електричної принципової» в «2. Схемотехнічне проектування та розробка схеми електричної структурної». Основи цього інтерфейсу зв'язку та опис зміни до стандартної шини описані в «5. Проектування програмного забезпечення».

❖ Центральний процесор – це основний процесор МК. Саме він відповідає за налаштування всіх АМ, отримання від них інформації, надання їм команд, синхронізацію їх роботи та обробку даних. В даній реалізації процесор буде працювати на чистоті 16 МГц трактуючись від внутрішнього генератора тактового сигналу HSI. Більше деталей загалом про частоту тактування (далі ЧТ) МК та його складових описано в «5. Проектування програмного забезпечення».

- ПК – це пристрій користувача, на який будуть відправлятися результати тестування БТ. Це може бути приватний комп'ютер чи ноутбук. Важливо, щоб цей пристрій міг прочитати сигнал по шині UART. При створенні прототипу, я використовував ноутбук. Для того, щоб отримати сигнал, я використав USB to TTL конвертор, а саме пристрій «Prolific USB-to-Serial Comm Port» від компанії Prolific[3]. Зауважу, що даний конвертор вимогливий до драйвера, в моєму випадку, він запрацював тільки з драйвером 2011 року випуску, це версія 3.4.25.218[4]. Для прийому сигналу з віртуального COM-порту, було використано безкоштовну програму Tera

Term[5]. Користувач може використати будь яку іншу зручну для нього програму.

- Роз'єм налаштування – це гніздові роз'єми впаяні на ДП (рис. 2.2).

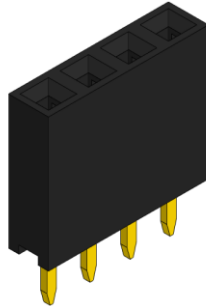


Рисунок 2.2 Роз'єм такого ж типу, як і роз'єми налаштування напаяні на ДП. Входи цих роз'ємів треба замикати один з одним, за допомогою провідників. Зручно це робити стандартними провідниками, що використовуються для з'єднання доріжок на платах, що не потребують пайки. Такі провідники наведені на рис. 2.3.



Рисунок 2.3 Провідники для з'єднання виходів роз'ємів на ДП

- Повторювач напруги – це пристрій задача якого, повторити напругу на виході ЦАП. Цей блок потрібне по тій причині, що максимальний струм на виході МК становить близько 3 мА. Основою цього блоку буде ОП в режимі повторювача напруги. Детальніше про підключення та обраний ОП буде нижче.
- Підсилювач напруги – це пристрій задача якого, підсилювати напругу на виході ЦАП. Цей блок потрібне по тій причині, що максимальний струм на виході МК становить близько 3 мА, максимальна напруга близько 3 В. Основою цього блоку буде ОП в режимі підсилювача напруги. Коефіцієнт підсилення буде залежати від співвідношення напруг на подільнику напруги. Конфігурувати подільник можна буде за допомогою відповідного роз'єму налаштування. Детальніше про підключення та обраний ОП буде нижче, в «2.2 Аналіз схеми електричної принципової».
- Подільник напруги – це блоки, що не мають відношення до подільника напруги в блоках «Підсилювач напруги» та «Повторювач напруги». Цей подільник також можна зконфігурувати за допомогою відповідного роз'єму налаштування. Цей блок потрібне, щоб зменшити напругу на деяких на входах АЦП.
- Потенціометр бази – це багатообертовий змінний резистор, що обмежує струм бази. Детально про його підключення буде нижчу в цьому ж розділі, в «2.2 Аналіз схеми електричної принципової».
- Потенціометр колектора – це багатообертовий змінний резистор, що обмежує струм колектора. Детально про його підключення буде нижчу в цьому ж розділі, в «2.2 Аналіз схеми електричної принципової».
- Пристрій, що тестується – це БТ n-p-n тип, який потрібно протестувати. На Рис. 2.1. цей блок містить дві частини:
  - ❖ «В» – це блок, що з'єднаний з базою транзистора.
  - ❖ «С» – це блок, що з'єднаний з колектором транзистора.

Оскільки схема підключення транзистора буде схема з загальним емітером (далі СЗЕ), то емітер буде завжди підключений на GND і окремо показувати це на СЕС не варто.

Підсумок до викладеного матеріалу такий – СЕС до пристрою, що розробляється готова. При розробці СЕС паралельно розроблялась СЕП. Для перевірки роботоздатності схеми використовувалась САПР LTSpice[6]. Таким чином, я можу бути впевнений, що дана концепція вимірювання ВАХ має право на життя і задовольняє вимоги даного дипломного проєкту.

## 2.2 Аналіз схеми електричної принципової

Проаналізуємо СЕП, для цього розділимо її на логічні частини (рис. 2.4).

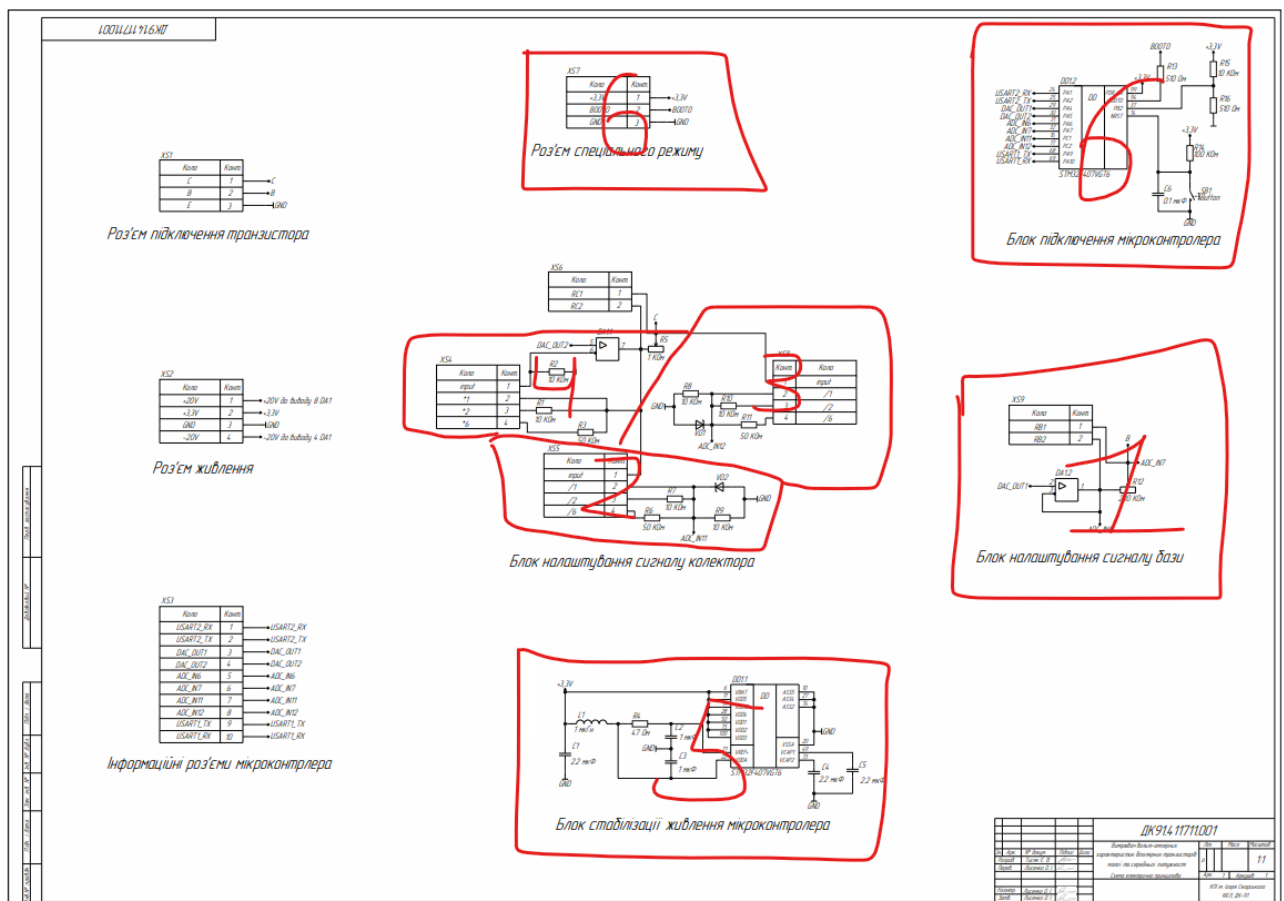
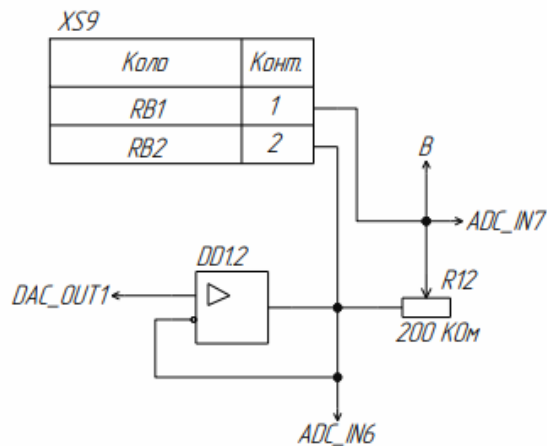


Рисунок 2.4 СЕП розділена на логічні частини



Розглянемо кожні частину більш детально:

Перша частина – відповідає за регулювання струму бази БТ, крупним планом зображено на рис. 2.5.



*Блок налаштування сигналів бази*

Рисунок 2.5 – Перша логічна частина СЕП крупним планом.

Для обмеження струму бази використовується змінний резистор на 25 обертів та з діапазоном опору від 0 Ом до 200 кОм. Опір від кута повороту залежить приблизно лінійно, це означає, що з кожним обертом опір буде змінюватись на 8 кОм. Для того, щоб точно налаштувати опір резистора R12, передбачений роз'єм XS9.

Забігаючи наперед, скажу, що схожа схема налаштування опору застосована до змінного резистора, що задає струм колектора. Це резистор R5, він також розрахований на 25 обертів і може приймати значення від 0 Ом до 1 кОм. Таким чином, кожен обер змінює опір на 40 Ом. Для більш точного налаштування передбачений роз'єм XS6.

Схема також містить ОП підключений в режимі повторювача напруги. До входів резистора підключені входи 6 і 7 АЦП МК, оскільки ОП в режимі

повторювача, а напруга на виході ЦАП не може бути більша за максимально допустиму для АЦП, то можна обійтись без схеми подільника напруги. Струм бази слід знаходити програмно визначаючи його, з закону Ома складеного для R12.

Друга частина – це подільник напруги, для АЦП 1, крупним планом зображено на рис. 2.6.

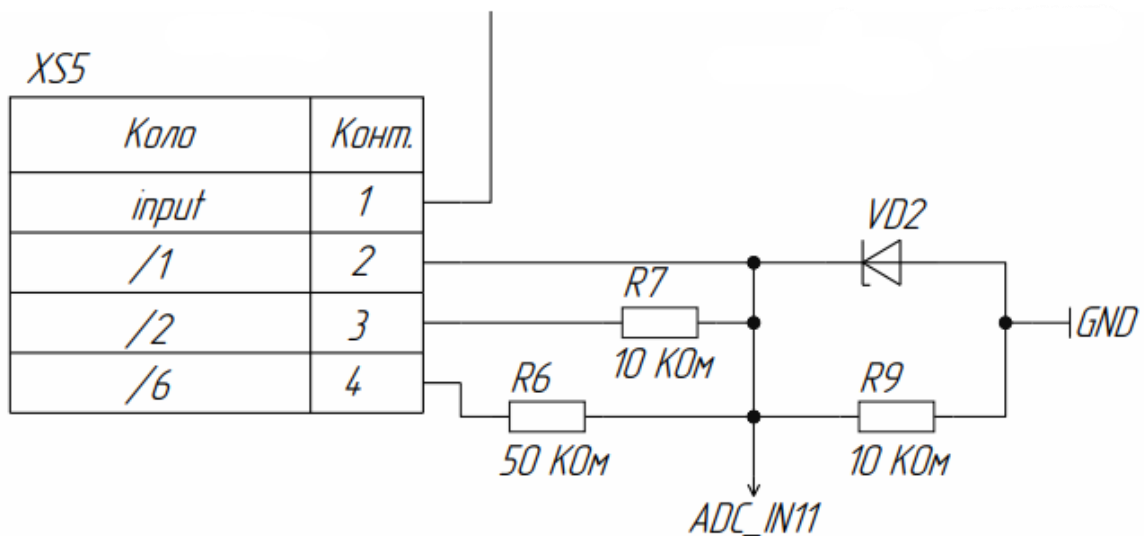


Рисунок 2.6 – Друга логічна частина СЕП крупним планом.

Як видно з Рисунка 2.6, в залежності від того, як з'єднати між собою виходи роз'єму XS5, ми отримаємо різне співвідношення опорів резисторів подільника. Можна отримати значення подільника 1, 2, або 6. Зауважу, що при живленні ОП двополярним живленням з амплітудою 20 В, на виході ОП може бути напруга, що не сильно перевищує 18В, тому подільника в 6 разів, буде достатньо, щоб привести напругу в допустимий для АЦП діапазон. Також зверну увагу на стабілітрон VD2, що відкривається при значенні 3,3В, він допоможе врятувати МК, у випадку неправильної конфігурації подільника напруги.

Третя частина – це такий ж само подільник напруги, але тепер не для АЦП 11, а для АЦП 12. Крупним планом ця логічна частина зображена на Рис. 2.7.

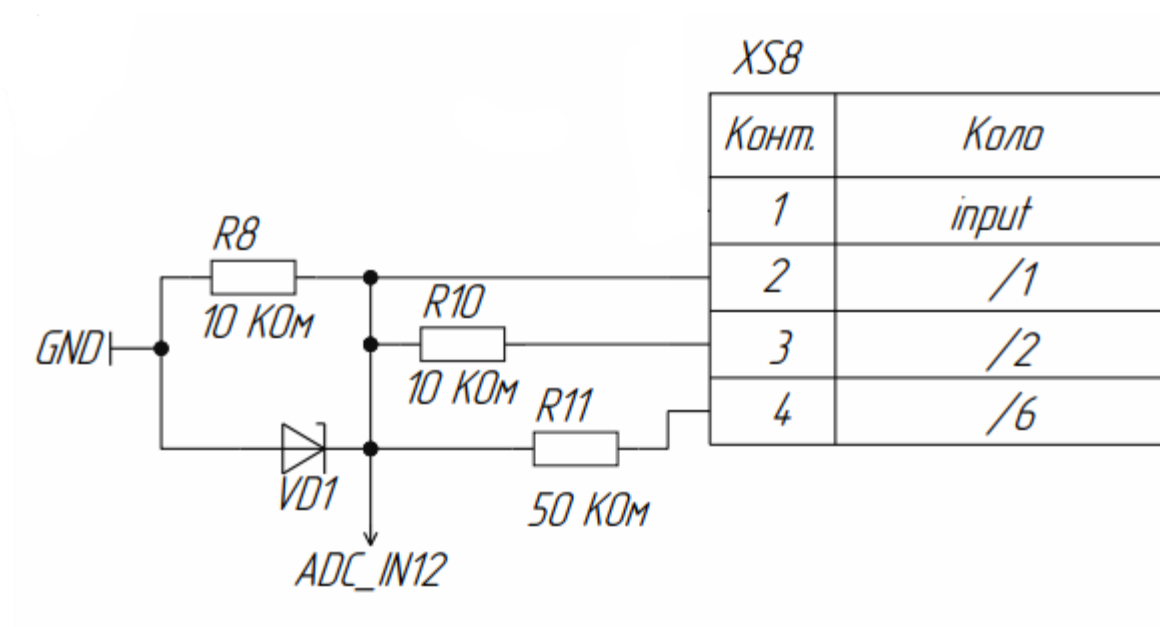


Рисунок 2.7 – Третя логічна частина СЕП крупним планом.

Четверта логічна частина – це ОП підключений в режимі помножувача напруги. Крупним планом на рис. 2.8.

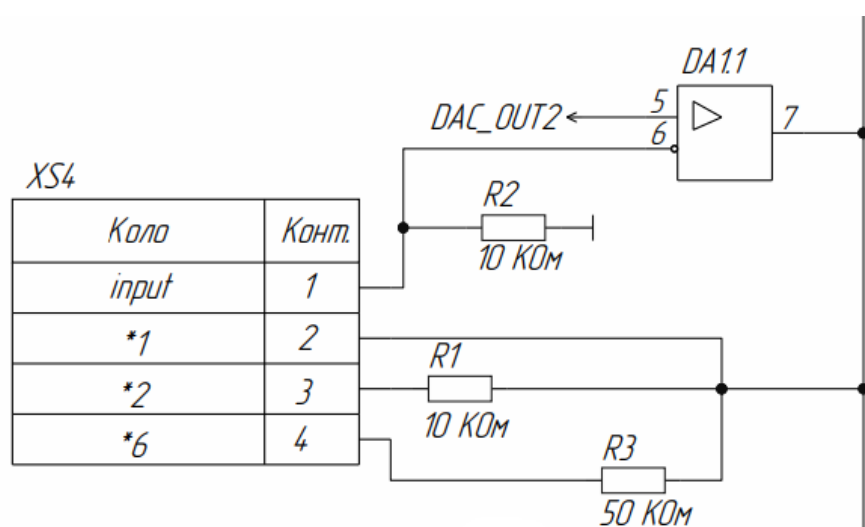
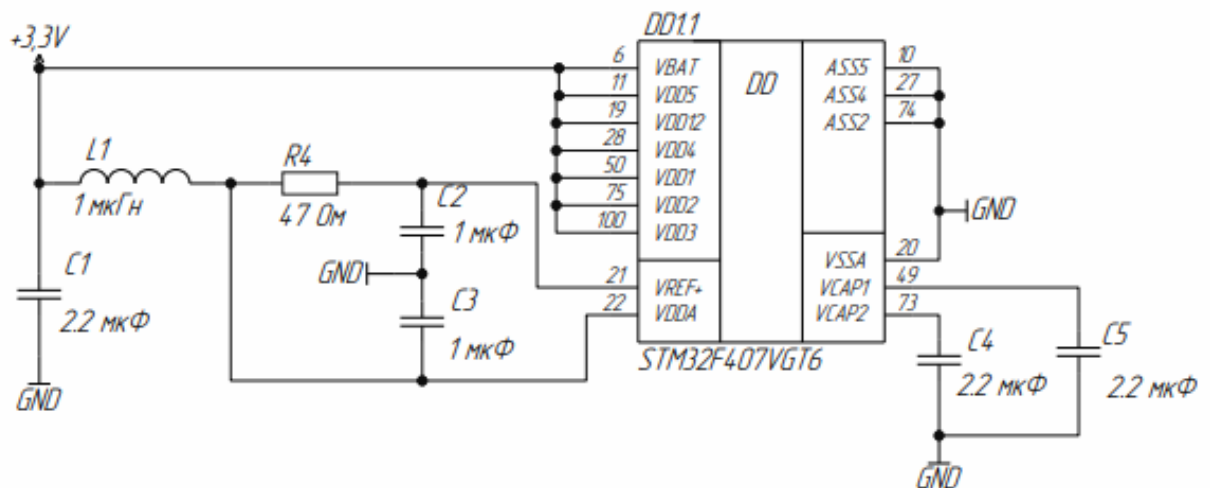


Рисунок 2.8 – Четверта логічна частина СЕП крупним планом.

Як видно з рисунка, в залежності від стану роз'єму XS4, коефіцієнт множення, може приймати значення 1, 2 або 6. Таким чином, в нас є можливість сильно збільшувати діапазон напруг, що передаються з виходу ЦАП 2 на колектор досліджуваного БТ.

П'ята логічна частина – це схема стабілізації живлення МК, дана схема взята з відповідної документації [7] на пристрій STM32F4DISCOVERY[8]. На базі цього пристрою робився макет, для налаштування ПЗ МК. Крупним планом п'ята логічна частина зображена на рисунку 2.9.



### *Блок стабілізації живлення мікроконтролера*

Рисунок 2.8 – П'ята логічна частина СЕП крупним планом.

Практично жодних змін в схему стабілізації не було винесено, номінали компонентів та інші їх характеристики вибирались з запасом по напругі та потужності, проте при створенні фізичного прототипу, цю схему варто додатково протестувати.

Шоста частина – відповідає за можливість змінити ПЗ МК, як і частина п'ята, скопійована з документації на STM32F4DISCOVERY.

На цьому основні огляд основних схемотехнічних рішень СЕП завершено. Додам, що на схемі також присутні ще декілька роз'ємів, для підключення живлення (XS2), БТ(XS1), що тестується та виходів МК(XS3). В роз'ємі XS3 є виходи не критичні для роботи, я вирішив додати можливість доступу до них, оскільки даний пристрій розрахований на людей, що будуть користуватись приладом в освітніх цілях, тому дати можливість додатково попрацювати з МК не буде зайвим.

### 2.3 Аналіз елементної бази

Пристрій містить наступні компоненти:

- Мікроконтролер
- Конденсатори
- ОП
- Котушки індуктивності
- Резистори
- Перемикачі кнопок
- Стабілітрони (діоди Зенера)
- Гніздові роз'єми

Проаналізуємо які компоненти були обрані та чому вибір пав саме на них.

#### Мікроконтролер

Враховуючи, що пристрій в першу чергу задумувався, як макет для людей, що займаються інженерними науками й дисциплінами, МК повинен мати значну кількість периферії (далі ПМК). Існує велика кількість різних виробників МК:

|     |      |          |        |      |                     |      |
|-----|------|----------|--------|------|---------------------|------|
|     |      |          |        |      | ДК91.4 11711.001 ПЗ | Лист |
|     |      |          |        |      |                     | 22   |
| Зм. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                     |      |

1. Microchip Technology Inc.
2. 1Atmel (належить Microchip Technology)
3. STMicroelectronics
4. Texas Instruments
5. NXP Semiconductors
6. Renesas Electronics Corporation
7. Infineon Technologies
8. Cypress Semiconductor Corporation (належить Infineon Technologies)
9. Silicon Laboratories Inc.
10. ARM Holdings (виробник архітектури ARM, яку використовують багато компаній для створення своїх мікроконтролерів)

Проаналізувавши пропозиції за допомогою інтернет-ресурсу digikey.com, мною було зроблено висновок, що в цих виробників МК мають приблизно однакові ціни в залежності від потужності МК та його спорядженості різною ПМК. Оскільки для прототипу я використовував пристрій STM32F4DISCOVERY, то і було прийнято рішення створювати прилад на його основі. Даний МК доволі масовий і до нього є велика кількість навчальних ресурсів українською та російською мовами. Це є принципова перевага над іншими МК, тому сенсу змінювати його на дешевший.

### Конденсатори

СЕР містить конденсатори наступних номіналів:

- 0,1 мкФ
- 1 мкФ
- 2,2 мкФ

|     |      |         |        |      |                    |      |
|-----|------|---------|--------|------|--------------------|------|
|     |      |         |        |      | ДК914.11711.001 ПЗ | Лист |
| Зм. | Лист | № доку. | Підпис | Дата |                    | 23   |

Доволі очевидним є рішення відати перевагу SMD-компонентам. Даний тип має наступні переваги:

1. Менша розмірність: SMD компоненти мають компактний дизайн та малий розмір, що дозволяє ефективно використовувати простір на платі і зменшує розміри кінцевого пристрою.
2. Висока щільність монтажу: завдяки компактному розміру та технології монтажу на поверхню, SMD компоненти можна розміщувати на платі з високою щільністю. Це дозволяє розміщувати більше компонентів на платі, забезпечуючи більшу функціональність.
3. Автоматизований монтаж: SMD компоненти легко монтувати автоматичними машинами, що дозволяє швидше та ефективніше збирати електронні пристрої.
4. Низькі індуктивність та опір: SMD компоненти, такі як резистори, конденсатори та індуктивності, мають низькі значення індуктивності та опору. Це важливо для деяких додатків, де низькі рівні шуму та втрат є критичними.
5. Краща відвідна точність: SMD компоненти мають більш точну геометрію та розміщення контактів, що дозволяє досягти кращої електричної та механічної стабільності.
6. Менші перешкоди для сигналів: SMD компоненти мають короткі підключення, що зменшує вплив паразитних параметрів і забезпечує кращу продуктивність високочастотних додатків.
7. Економія часу та зусиль: Монтаж SMD компонентів на плату вимагає менше часу та зусиль порівняно з паянням традиційних компонентів з виводами.

Зазначу, що рішення відати перевагу SMD-компонентам стосується не тільки конденсаторів, а й всіх інших компонентів. Забігаючи наперед скажу, що

|     |      |          |        |      |                     |      |
|-----|------|----------|--------|------|---------------------|------|
|     |      |          |        |      | ДК91.4 11711.001 ПЗ | Лист |
|     |      |          |        |      |                     | 24   |
| Зм. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                     |      |

серед компонентів до HE SMD типу відносяться тільки потенціометри та роз'єми.

Оскільки конденсатори, підключені до ліній, напруга на яких не перевищує 3,3 вольт, то максимальна номінальна напруга на конденсаторах, може бути не високою. Для конденсаторів всіх типів, були обрані компоненти з максимальною номінальною напругою 25 В. Ця напруга не є високою для конденсаторів, тому незважаючи на великий запас, це рішення не надто сильно збільшить ціну пристрою.

Стосовно точності, то практично всі конденсатори мають відхилення в  $\pm 5\%$ . Цього значення буде достатньо для тих конденсаторів, чия задача згладжувати сигнал. Для конденсатора С6, був обраний компонент з точністю  $\pm 2\%$ . Даний конденсатор використовується, щоб протримати низьку напругу певний час вхіді NRST МК, тому було прийняте рішення збільшити точність. Зазначу, що ціна від цього практично не змінюється.

### Котушки індуктивності

В СЕП є лише одна котушка індуктивності, вона підключена до лінії стабілізації живлення, враховуючи це та те, що струм живлення МК, було прийняте рішення використати SMD компонент з номіналом в 1 мкГн. Точність компонента складає  $\pm 20\%$ . Цією точністю буде достатньо, для правильного гладження імпульсів.

### Резистори

СЕП містить 16 резисторів. 2 з них – це змінні резистори. Частково про них було сказано в 2.2 Аналіз схеми електричної принципової. Додам лише те, що максимальна потужність розсіювання складає 0,5 Вт, а номінальна точність

|     |      |          |        |      |                     |      |
|-----|------|----------|--------|------|---------------------|------|
|     |      |          |        |      | ДК91.4 11711.001 ПЗ | Лист |
|     |      |          |        |      |                     | 25   |
| Зм. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                     |      |



$\pm 10\%$ . Даної точності буде достатньо, адже для точного налаштування потенціометрів, передбачені відповідні роз'єми.

Для всіх інших резисторів допустима доволі невисока потужність розсіювання, адже через них не буде протікати високий струм. Стосовно точності, то обирались резистори з точністю  $\pm 1\%$  або  $\pm 2\%$ , цієї точності буде достатньо для всіляких подільників напруги, а для резисторів, які використовуються для підтяжок входів на землю чи живлення, така точність більш ніж достатня. Знову ж таки, параметри потужності та точності були обрані з запасом по вимогам, оскільки ціни це сильно не збільшує. Виробник не є принциповим параметром ні для резисторів, ні для ще якихось компонентів, оскільки, довіра до всіх них однакова.

### Перемикачі кнопкові

СЕП містить один такий перемикач, головні вимоги до нього був великий розмір та SMD-кріплення. На місце може бути обрана велика кількість компонентів, даний вибір не є принциповим.

### Стабілітрони

СЕП містить 2 однакових стабілітрони. Їх задача, описана в 2.2 Аналіз схеми електричної принципової. Враховуючи це було обрано компонент, що відкривається при 3,3 вольтах та має точність в  $\pm 5\%$ . Потужність розсіювання складає 200 мВт, цього буде достатньо оскільки струм через стабілітрон обмежуватиметься резисторами. У випадку найгіршої конфігурації струм буде достатньо великим, щоб вивести з ладу ОП, доріжки ДП чи стабілітрон. В цьому питанні прилад покладається на розумні й уважні дії користувача.

|     |      |          |        |      |                     |      |
|-----|------|----------|--------|------|---------------------|------|
|     |      |          |        |      | ДК91.4 11711.001 ПЗ | Лист |
| Зм. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                     | 26   |

## Роз'єми

Про роз'єми вже було частково сказано в 2.2 Аналіз схеми електричної принципової. Рішення використовувати гніздові роз'єми, пов'язано з бажанням складними випадкове замикання контактів. Таке замикання можливе наприклад при використанні щупів мультиметра під час роботи пристрою. Для уніфікації були обрані роз'єми одного виробника і однієї серії (рис. 2.9).



Рисунок 2.9 – Гніздові роз'єми використані в пристрої.

Враховуючи викладені вище міркування, я роблю висновок, що компонентна база обґрунтована в достатній мірі, для дипломного проєкту.

### 2.4 Симуляція схеми електричної принципової

Загалом весь прилад можна умовно розділити на дві частини. Перша – МК та обв'язка до нього, друга – аналогова частина для вимірювання ВАХ. Підтвердження роботоздатності першої частини, може слугувати прототип, а для підтвердження роботоздатності другої, була проведена симуляція в LTSpice.

Розглянемо схему в САПР LTSpice (рис. 2.9.).

|     |      |          |        |      |                     |      |
|-----|------|----------|--------|------|---------------------|------|
|     |      |          |        |      | ДК91.4 11711.001 ПЗ | Лист |
|     |      |          |        |      |                     | 27   |
| Зм. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                     |      |

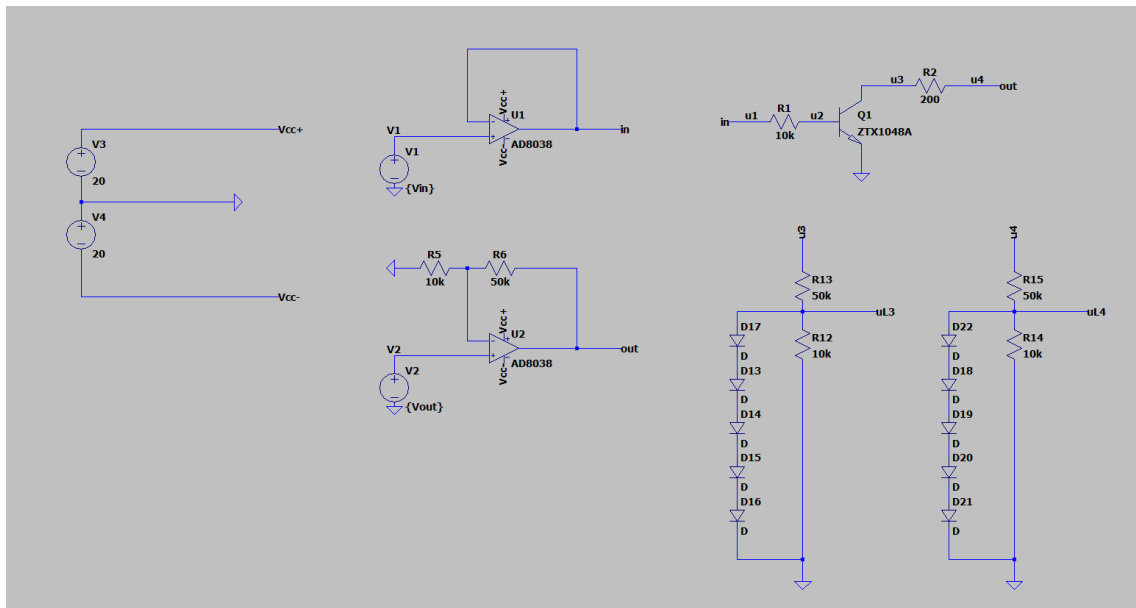


Рисунок 2.10 – Схема зібрана в САПР LTSpice загальним планом.

Зауважу, що симуляція проводиться для транзистора ZTX1048A. Можна побачити, що схема складається з 6 конструкцій.

- Схема забезпечення двохполярного живлення
- ОП в режимі повторювача напруги та його обв'язка
- ОП в режимі помножувача напруги та його обв'язка
- Схема з загальним емітером для підключення БП n-p-n типу
- Дві схеми вдосконаленого подільника напруги для АЦП.

Розглянемо кожну з них більш детально.

### Схема забезпечення двохполярного живлення

Зліва (рис. 2.11) знаходиться два джерела живлення підключені таким чином, щоб створити двохполярне живлення. Значення напруги на колах  $V_{cc+}$  та  $V_{cc-}$  продемонстроване на рисунку 2.12. Режим симуляції зображено на рисунку 2.13.

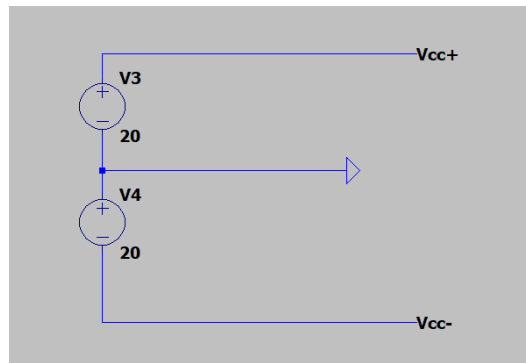


Рисунок 2.11 – скріншот реалізації двохполярному живленню.

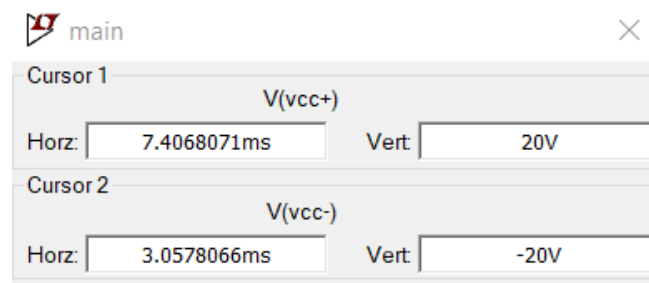


Рисунок 2.12 – Значення напруг на виходах схеми двохполярного живлення.

```
.tran 10m startup

.param Vin 1
.param Vout 2
```

Рисунок 2.13 – Один з режимів симуляції.

ОП в режимі повторювача напруги та його обв'язка

Наступним розглянемо схему повторювача напруги (рис. 2.13). Джерело напруги V1 – це еквівалент виходу ЦАП 2 МК. Головне в чому слід переконатись – струм на виході більший за струм на вході (рис. 2.14). Режим симуляції зображено на рисунку 2.13.

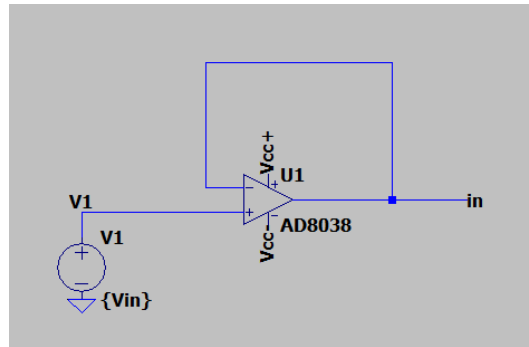


Рисунок 2.14 – Схема для симуляції ОП в режимі повторювача напруги.

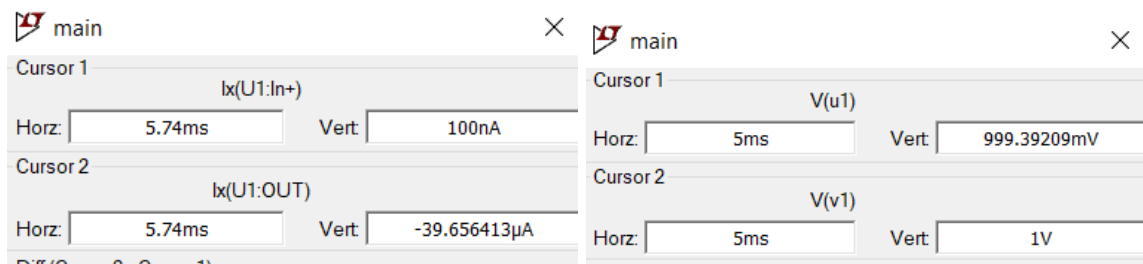


Рисунок 2.15 – Струми та напруги в частині ОП, що складає повторювач напруги.

### ОП в режимі помножувача напруги та його обв'язка

Сама схема наведена на рисунку 2.16. З рисунка видно, що задіяна конфігурація коли значення резисторів в подільнику напруг становлять 10 кОм та 50 кОм. Таким чином напруга на інвертованому вході ОП буде в 6 разів менше ніж на не інвертованому. Отже, очікуємо побачити напругу на виході в 6 разів більшу ніж напруга на неінвертованому вході. Результат зображено на рисунку 2.17. Режим симуляції зображено на рисунку 2.13.

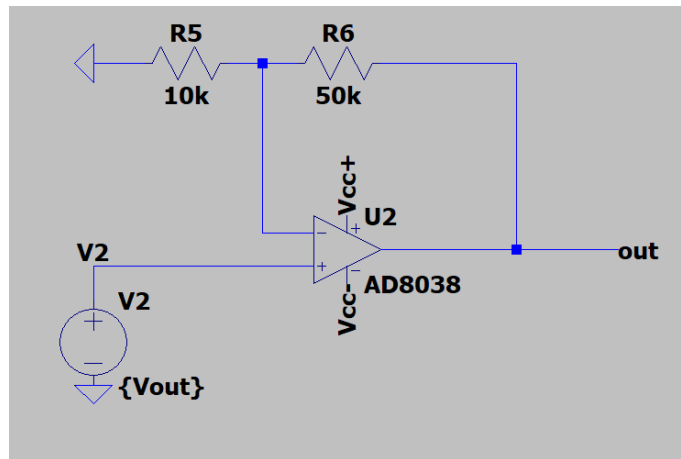


Рисунок 2.16 – Схема для симуляції ОП в режимі повторювача напруги.

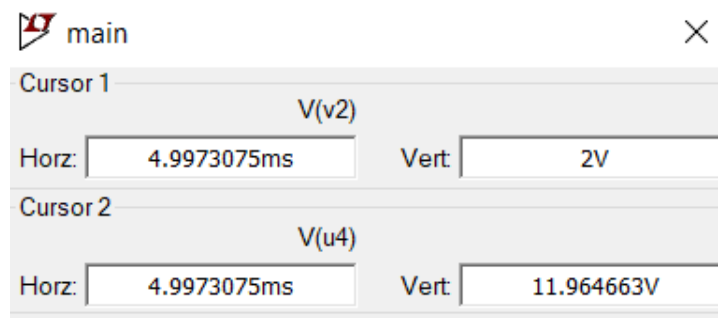


Рисунок 2.17 – Напруги в частині ОП, що складає помножувач напруги.

Схема з загальним емітером для підключення БП n-p-n типу

Це стандартна схема, детальніше про її особливості буде описано нижче в симуляції BAX.

Дві схеми вдосконаленого подільника напруги для АЦП

Це схеми удосконаленого подільника напруги. Схеми зображені на рисунку 2.18. Як видно з рисунку використана конфігурація подільника при якій напруга ділиться на 6. Якщо напруга на ЦАП 1 складе 2 вольти, то на

виході помножувача буде вже 12 вольт. На виході ж подільника будуть ті самі 2 вольти. Зазначу, що при цьому 5 діодів, що симулюють один діод Зенера на 3,2 вольти, не відкриються і через них тектиме лише малий паразитний струм протікання. Перевіримо ці припущення. Результат на рисунку 2.19. Режим симуляції зображено на рисунку 2.13.

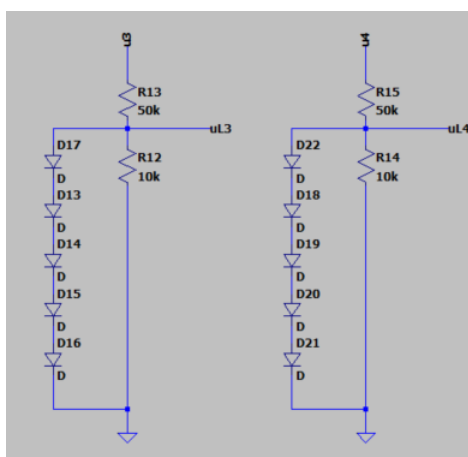


Рисунок 2.18 – Схеми вдосконаленого подільника напруги для АЦП

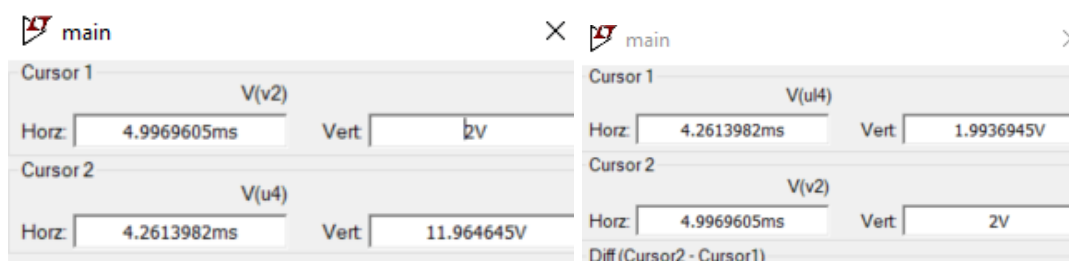


Рисунок 2.19 – Одні з результатів симуляції схеми вдосконаленого подільника напруги для АЦП

Тепер перевіримо, чи допоможе діод Зенера при неправильній конфігурації. Залишимо все незмінним, за винятку подільника напруги в схемах вдосконаленого подільника напруги для АЦП, в них змінимо конфігурацію подільника, так, щоб той зменшував напругу вдвічі (рис. 2.20). Результати наведені на рисунку 2.21. Режим симуляції зображено на рисунку 2.13.

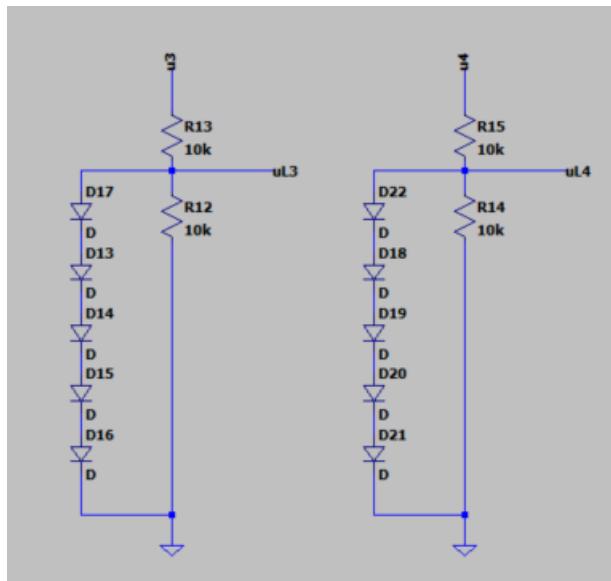


Рисунок 2.20 – Схеми вдосконаленого подільника напруги для АЦП

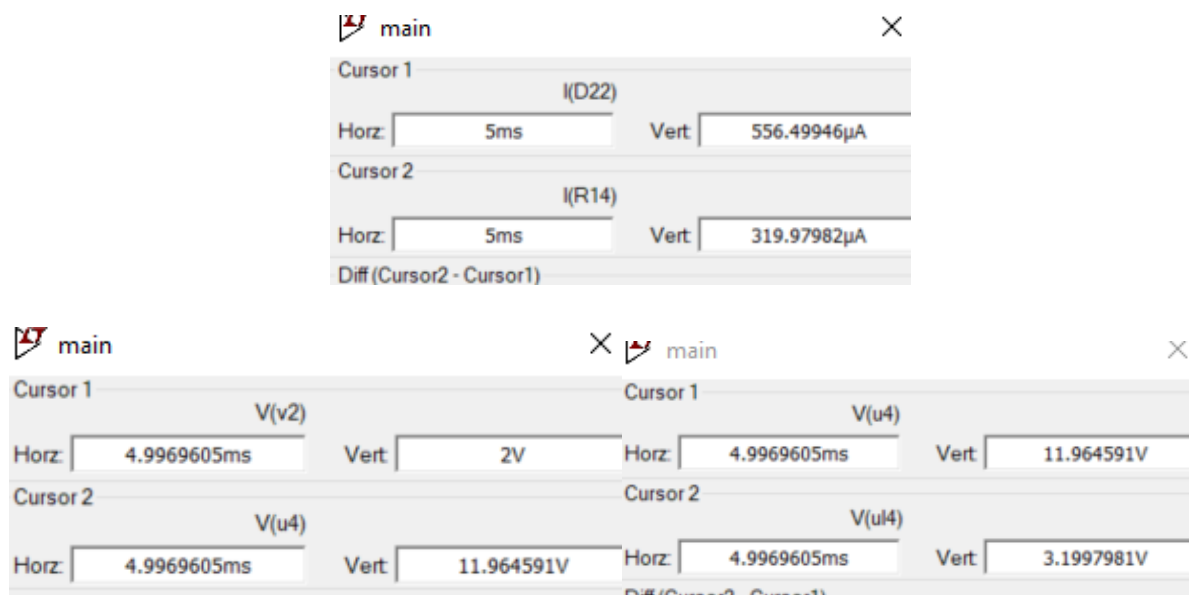


Рисунок 2.21 – Одні з результатів симуляції схеми вдосконаленого подільника напруги для АЦП

На цьому перевірку складових частин схеми можна вважати завершеним. Тепер наведи результати симуляції схеми в цілому. Провів симуляцію для вимірювання наступних ВАХ:

- Вхідна характеристика БТ підключеного за СЗЕ.



- Вихідна характеристика БТ підключеного за СЗЕ.
- Коефіцієнт передачі за струмом БТ підключеного за СЗЕ.

Вхідна характеристика БТ підключеного за СЗЕ.

Для того, щоб визначити залежність струму бази від напруги прикладеної між базою та емітером (далі НБЕ), потрібно задати стабільне значення між колектором та емітером (далі НКЕ), а після цього з якимось кроком збільшувати НБЕ.

Таким чином ми отримаємо одну криву. В реальності часто потрібна «розгортка», тобто декілька таких кривих. Для цього, після побудови однієї кривої слід змінити НКЕ, та повторити дії.

Для того, щоб провести такий дослід в LTS зібрати схему з правильною конфігурацією подільників напруги (рис. 2.10), налаштувати симуляцію в режимі «DC sweep» (рис. 2.22), зберегти потрібні дані в log-файл (рис. 2.23). Результат наведено на рисунку 2.24.

```
.tran 10m startup  
  
*Вхідна характеристика  
.step param Vin 0 4 0.1  
.step param Vout list 0.5 1 10
```

Рисунок 2.22 – Налаштування режиму «DC sweep» в LTS.

```
.meas Vinput avg V(u2)  
.meas Voutput avg V(u3)  
  
.meas Iinput avg Ib(Q1)  
.meas Ioutput avg Ic(Q1)  
  
.meas cur AVG Ioutput/Iinput  
.meas vol AVG Voutput/Vinput
```

Рисунок 2.23 – Збереження всіх основних характеристик БТ в log-файл.

|     |      |          |        |      |                     |      |
|-----|------|----------|--------|------|---------------------|------|
|     |      |          |        |      | ДК91.4 11711.001 ПЗ | Лист |
| Зм. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                     | 34   |

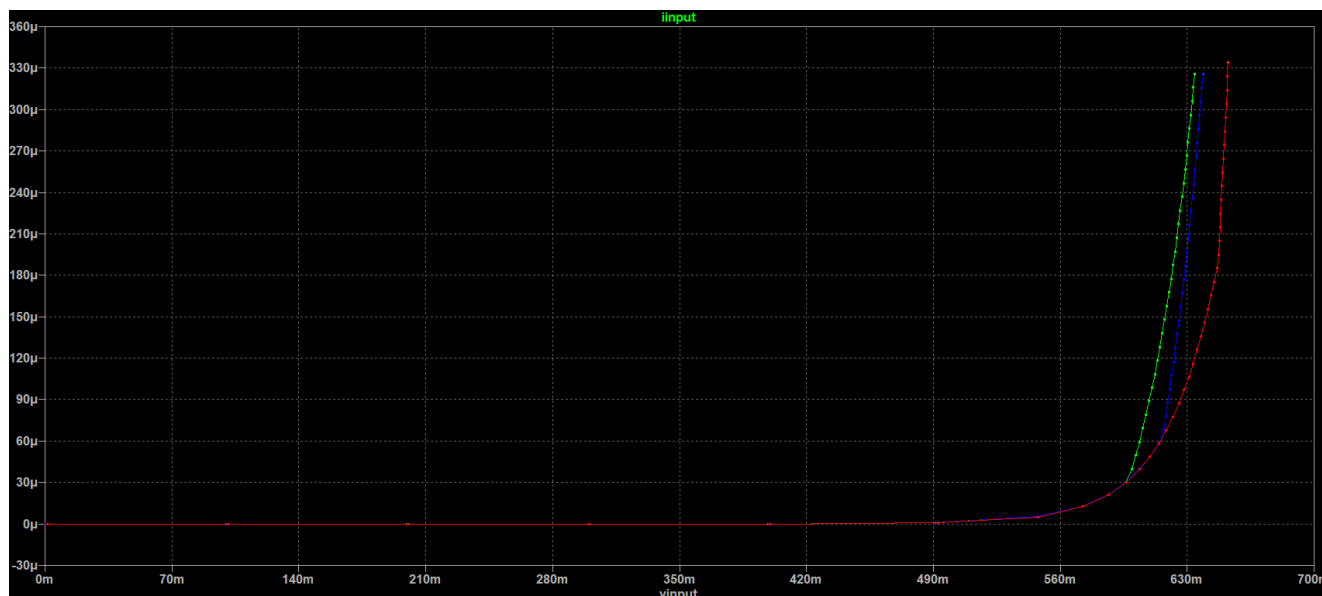


Рисунок 2.24 – Вхідна характеристика БТ.

Отриманий результат доволі сильно схожий на той, що можна бачити в спеціалізованій літературі[9], навіть спостерігається ефект Ерлі[10]. Схема працює коректно, навіть при невеликій кількості кроків НБЕ, їх лише 40, МК здатний створити більше 4000. Звісно, в такій великій кількості кроків, немає особливого сенсу через низьку точність всіх інших систем! Це принциповий момент, який слід враховувати при користуванні приладом.

#### Вихідна характеристика БТ підключеного за СЗЕ.

Для того, щоб визначити залежність струму колектора від НКЕ, потрібно задати стабільне значення НБЕ, а після цього з якимось кроком збільшувати НКЕ.

Таким чином ми отримаємо одну криву. В реальності часто потрібна «розгортка», тобто декілька таких кривих. Для цього, після побудови однієї кривої слід змінити НБЕ, та повторити дії.

Для того, щоб провести такий дослід в LTS зібрати схему з правильною конфігурацією подільників напруги (рис. 2.10), налаштувати симуляцію в

режимі «DC sweep» (рис. 2.25), зберегти потрібні дані в log-файл (рис. 2.23).  
Результат наведено на рисунку 2.26.

**.tran 10m startup**

**\*Вихідна характеристика**

**.step param Vout 0 3 0.05**

**.step param Vin list 0.5 0.55 0.6**

Рисунок 2.25 – Налаштування режиму «DC sweep» в LTS.

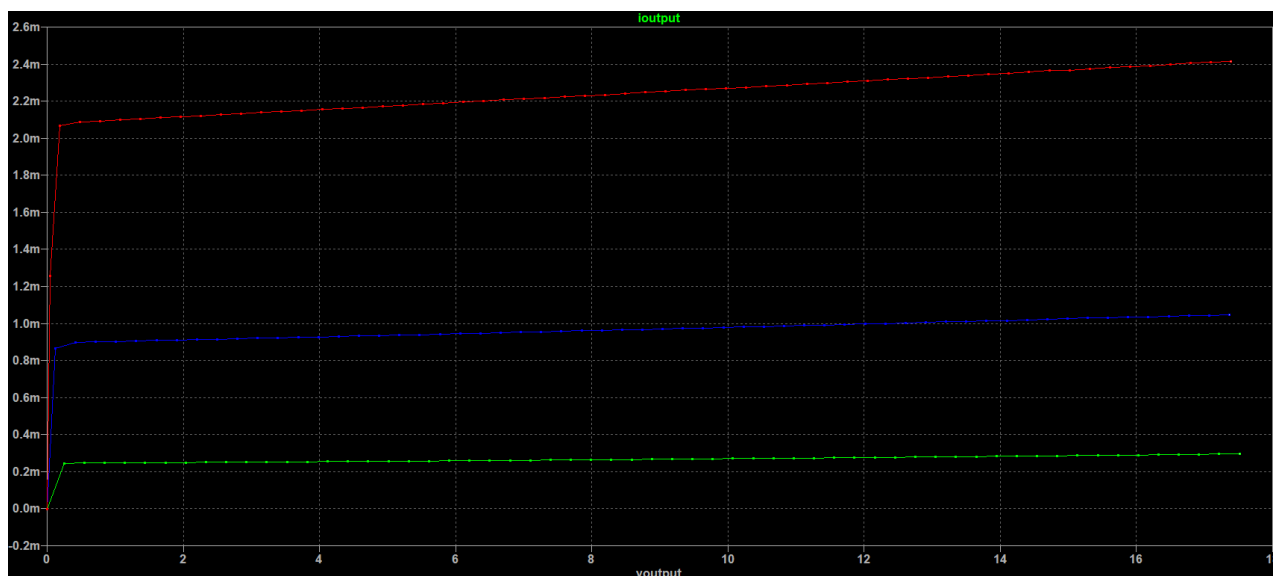


Рисунок 2.26 – Вихідна характеристика БТ.

Результат симуляції вихідної ВАХ так само правильний як і вхідної ВАХ.  
Це вже говорить про життєздатність даної СЕП.

Коефіцієнт передачі за струмом БТ підключеного за СЗЕ.

Для того, щоб знайти коефіцієнт передачі за струмом слід поділити струм колектора на струм бази. З теорії[11] відомо, що даний коефіцієнт не є стабільним і я пропоную побудувати його залежність від вхідного струму. Для цього слід встановити НКЕ та змінювати НБЕ з певним кроком. Після чого

отримані результати помістити на графік де по осі абсцис струм бази, а по осі ординат коефіцієнт передачі за струмом.

Для цього складемо схему як на рисунку 2.10, налаштуємо симуляцію в режимі «DC sweep» (рис. 2.27), збережемо потрібні дані в log-файл (рис. 2.23). Результат зображено на рисунку 2.28.

```
.tran 10m startup
*Передача за струмом
.step param Vin 0.3 0.5 0.001
.param Vout 2
```

Рисунок 2.27 – Налаштування режиму «DC sweep» в LTS.

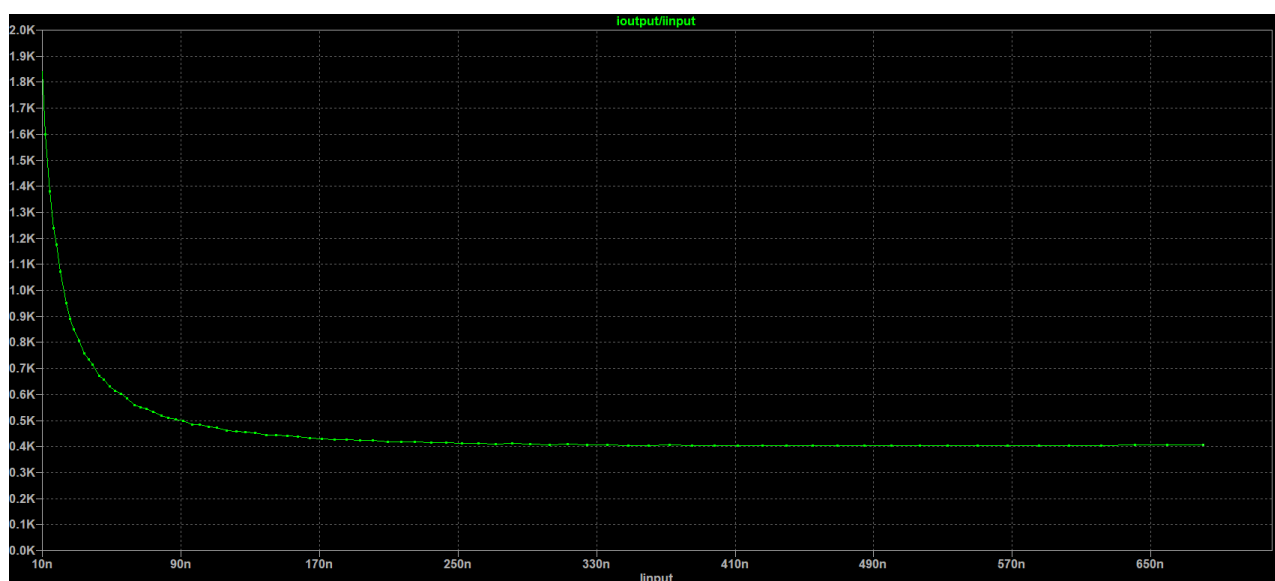


Рисунок 2.28 – Залежність коефіцієнту передачі за струмом від току бази .

Враховуючи цей та всі попередні результати, я роблю висновок, що не тільки частина пристрою з МК та його обв'язкою коректна, а і аналогова частина для вимірювання ВАХ БТ. Симуляція завершена і її результати доводять життєздатність СЕП.

## Висновок до розділу 2

Отже, СЕП частково містить рішення втіленні в пристрої STM32F4DISCOVERY, класичні схеми підключення ОП, а також оригінальні рішення по наданні можливості конфігурації схеми за допомогою гніздових роз'ємів. Оскільки при створенні прототипу, не було повністю реалізовано всю СЕП, а лише перевірено ПЗ МК, то для симуляції неперевіреної частини СЕП було використано LTS. Симуляція була успішною, розділ «2. Схемотехнічне проектування та аналіз схеми електричної структурної» можна вважати закінченим.

|     |      |          |        |      |                     |      |
|-----|------|----------|--------|------|---------------------|------|
|     |      |          |        |      | ДК91.4 11711.001 ПЗ | Лист |
|     |      |          |        |      |                     | 38   |
| Зм. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                     |      |

### 3. РОЗРОБКА ДРУКОВАНОГО ВУЗЛУ ПРИСТРОЮ

В цьому розділі буде проведено аналіз рішень стосовно створення ДП, зокрема вибір матеріалів, вибір точності класу точності, розміщення елементів та особливості при проектуванні в середовищі Altium Designer (далі AD).

#### 3.1 Вибір і обґрунтування типу друкованої плати

Для початку розглянемо які типи друкованих плат могли бути використані. Існує кілька типів друкованих плат, які використовуються в залежності від вимог щодо функціональності, розміру та складності пристрою. Основні типи друкованих плат включають:

1. Одношарові плати (Single-sided PCB): Це найпростіші типи ДП, на яких доріжки та контактні площини розміщені лише на одному боці основи. Цей тип плати використовується в дешевих електронних пристроях з низькими вимогами до складності та провідності.
2. Двошарові плати (Double-sided PCB): Ці плати мають доріжки та контактні площини як на передній, так і на задній стороні основи. Вони можуть використовуватися для більш складних пристроїв з вищим рівнем провідності та більшою кількістю компонентів.
3. Багатошарові плати (Multilayer PCB): Це складніші плати, які складаються з трьох або більше шарів основи, розділених діелектричними шарами. Кожен шар містить свої доріжки та контактні площини, а внутрішні шари з'єднані між собою за допомогою металізованих отворів. Багатошарові плати використовуються в дуже складних електронних пристроях, таких як комп'ютери, смартфони та мережеве обладнання.
4. Гнучкі плати (Flexible PCB): Ці плати виготовляються з тонких гнучких матеріалів, таких як полімери. Вони дозволяють платам згинатися та

|     |      |          |        |      |                     |      |
|-----|------|----------|--------|------|---------------------|------|
|     |      |          |        |      | ДК91.4 11711.001 ПЗ | Лист |
|     |      |          |        |      |                     | 39   |
| Зм. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                     |      |

пристосовуватися до складних форм. Гнучкі плати використовуються в пристроях, які потребують гнучкості, наприклад, в ноутбуках, мобільних телефонах та медичних пристроях.

Ці типи друкованих плат є лише деякими прикладами, існує також багато інших варіацій плат, які можуть використовуватися в залежності від конкретних потреб і вимог проєкту.

Тепер наведу основні характеристики мого приладу:

1. Простота – пристрій містить лише один компонент з великою кількістю виходів. Цей компонент – це МК, а враховуючи, що більшість його виходів не будуть використовуватись, стає очевидним, що для сучасної ДП, це спроста задача. Однин цей фактор, означає, що можна відмовитись від складного і дорогого в виробництві 3 типу. Зазначу, що 3 тип, поганий, ще і тим, що таку ДП неможливо створити без спеціалізованої техніки, на відміну від типу 1 та типу 2. Цей аспект відноситься ще і до 4 типу, що наводить на думку відкинути і його.

2. Відсутність вимог до пластичності та бажання здешевити продукт – ці два фактори я об'єднав в один, тому що вони обидва спонукають остаточно відмовитись від типу 4. Тепер будемо обирати між типом 1 та типом 2.

3. Остаточний вибір був зроблений при безпосередньому розміщенні та трасуванні ДП в AD. Було зроблено висновок, що у випадку використання типу 1, ДП стає значно більшою, цей параметр не є критичним, проте, відмовлятись від можливості зменшити габарити без особливого підвищення ціни й складності не варто.

Отже, в результаті тип ДП – це двостороння ДП, яка дає можливість зменшити габарити ДП без сильного збільшення ціни й складності.

|     |      |          |        |      |                     |      |
|-----|------|----------|--------|------|---------------------|------|
|     |      |          |        |      | ДК91.4 11711.001 ПЗ | Лист |
|     |      |          |        |      |                     | 40   |
| Зм. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                     |      |

### 3.2 Вибір і обґрунтування матеріалу ДП

Спершу розглянемо між якими матеріалами я робив вибір. Основні матеріали, що використовуються для виготовлення ДП, включають:

1. Фенольна фіброгартія (FR-4): Це найбільш поширений матеріал, що використовується для ДП. FR-4 складається з шарів склотканини, просоченої епоксидною смолою. Вона має добру електричну і теплопровідність, механічну міцність та стійкість до вологи. FR-4 підходить для багатьох застосувань та є відносно економічним варіантом.

2. Поліімід (PI): Поліімідні плати володіють високою термостійкістю, гнучкістю та механічною міцністю. Вони часто використовуються в пристроях, де потрібна гнучкість або висока температура експлуатації, наприклад, в аерокосмічній та автомобільній промисловості.

3. Цереброхлор (Ceramic): Керамічні плати використовуються в застосуваннях з високими частотами, де потрібна висока діелектрична проникність та добра стійкість до високих температур. Вони часто застосовуються в радіочастотній електроніці та мікрохвильовій техніці.

4. Металізований полімер (Metal Core PCB): Це спеціальні плати з металевим основою, такою як алюміній або мідь. Вони використовуються в пристроях, де потрібна висока теплопровідність і відведення тепла, наприклад, в світлодіодах (LED) або потужних електронних пристроях.

Враховуючи особливості пристрою описані в «3.1 Вибір і обґрунтування типу друкованої плати», мій вибір впав на типу 1, а саме FR4-2-35-1.5. FR4-2-35-1.5 є типовою специфікацією для фенольної фіброгартії (FR-4), яка

|     |      |          |        |      |                     |      |
|-----|------|----------|--------|------|---------------------|------|
|     |      |          |        |      | ДК91.4 11711.001 ПЗ | Лист |
| Зм. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                     | 41   |



використовується для виготовлення друкованих плат. Основні переваги цієї специфікації включають наступне:

1. Електрична і теплопровідність: FR-4 матеріал має добру електричну провідність, що дозволяє ефективно проводити електричні сигнали по друкованій платі. Також він має прийнятну теплопровідність, що допомагає відводити тепло від електронних компонентів на платі.
2. Механічна міцність: FR-4 матеріал є досить міцним і має високу механічну стійкість. Це дозволяє створювати друковані плати, які витримують фізичне навантаження та механічні впливи без пошкодження.
3. Стійкість до вологи та впливу навколишнього середовища: FR-4 матеріал має високу стійкість до вологи та впливу навколишнього середовища, що робить його придатним для використання в різних умовах експлуатації.
4. Доступність та вартість: FR-4 матеріал є широко доступним на ринку та має відносно низьку вартість порівняно з іншими спеціалізованими матеріалами для ДП. Це робить його економічно вигідним варіантом для багатьох проєктів.
5. Компатибельність з технологіями виготовлення: FR-4 матеріал є добре зарекомендованим і широко використовується у виробництві друкованих плат. Він сумісний з різними технологіями виготовлення, включаючи травлення, фрезерування, свердління та нанесення мідних шарів.

Загалом, специфікація FR4-2-35-1.5 для фенольної фіброгартії (FR-4) має декілька переваг, що робить її популярним і широко використовуваним матеріалом для виготовлення друкованих плат.

Отже, під час вибору матеріалу ДП – було обрано FR4-2-35-1.5.

|     |      |          |        |      |                     |      |
|-----|------|----------|--------|------|---------------------|------|
|     |      |          |        |      | ДК91.4 11711.001 ПЗ | Лист |
| Зм. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                     | 42   |

### 3.3 Вибір і обґрунтування класу точності друкованої плати

Для початку наведу таблицю, яка гарно покаже основні відмінності між класами точності, це таблиця 3.1.

Таблиця 3.1. Граничні значення основних параметрів елементів ДП

| Параметр   | Позначення                 | Клас точності |      |      |      |
|--|----------------------------|---------------|------|------|------|
|  |                            | 2             | 3    | 4    | 5    |
| Ширина друкованого провідника,<br>мм   | $b_{\text{пр}}^{\text{Г}}$ | 0,45          | 0,25 | 0,15 | 0,10 |
| Відстань між елементами<br>друкованого монтажу, мм   | $I^{\text{Г}}$             | 0,45          | 0,25 | 0,15 | 0,10 |
| Гарантований поясок, мм  | $b_{\text{по}}$            | 0,20          | 0,10 | 0,05 | 0,03 |
| Відношення номінального<br>діаметру найменшого з<br>металізованих отворів до<br>товщини друкованої плати, мм | $K_{\text{дт}}$            | 0,40          | 0,33 | 0,25 | 0,20 |

Враховуючи сучасний рівень глобалізації виробництва ДП, немає особливих причин обрати низький клас точності. Мною було обрано 4 клас точності, ДП такого типу можна замовити в різних закордонних сервісів. Найвідоміші з них – Китайські, пропонують хороші ціни та якість, єдиний недолі – довгий час доставки. Цей варіант є хорошим, при випуску приладу в серію.

Отже, було прийняте рішення робити ДП 4 класу точності, тому що 4 клас має високу точність, зберігаючи доступність та малу ціну.

### 3.4 Вибір і обґрунтування методу виготовлення друкованої плати

Розглянемо які типи виготовлення можуть бути застосовані:

1.      Метод травлення: Цей метод використовується для виготовлення багатошарових ДП. Він включає нанесення тонкого шару міді на поверхню базового матеріалу ДП, покриття маскою для захисту доріжок та отворів, а потім травлення зайвої міді розчинником. Цей процес використовує фотолітографію для нанесення маски та хімічне травлення для видалення непотрібної міді.
2.      Метод фрезерування: Цей метод використовується для вирізання доріжок та отворів на ДП. Він включає використання фрезерного верстата з числовим керуванням (CNC), який здатний точно фрезерувати форми та отвори, відповідно до заданої маски або креслення. Цей метод часто використовується для прототипування або виготовлення невеликих серій ДП.
3.      Метод гальванічного відкладення: Цей метод використовується для вирізання доріжок та виготовлення отворів на ДП. Він включає використання хімічних процесів гальванічного відкладення міді на поверхню ДП, використовуючи маску та електричний струм. Потім надлишкова мідь травиться, залишаючи тільки необхідні доріжки та отвори.
4.      Метод друку: Цей метод використовується для виготовлення одношарових ДП або ДП з невисокою густиною доріжок. Він включає нанесення провідної мастики або травлення фольгових шарів на базовий матеріал ДП. Цей метод використовується часто для виготовлення прототипів або для швидкого виробництва ДП з невисокими вимогами щодо точності.

Я зупинився на першому методі, метод травлення є одним з основних методів виготовлення друкованих плат (ДП) і має кілька переваг:

|     |      |          |        |      |                     |      |
|-----|------|----------|--------|------|---------------------|------|
|     |      |          |        |      | ДК91.4 11711.001 ПЗ | Лист |
| Зм. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                     | 44   |

1. Гнучкість дизайну: Травлення дозволяє створювати складні геометричні форми, включаючи доріжки, отвори та області без міді. Це дає можливість реалізувати різноманітні дизайни ДП для відповідання конкретним потребам проєкту.

2. Висока точність: Метод травлення забезпечує високу точність виготовлення ДП. Це дозволяє створювати мініатюрні компоненти, тонкі доріжки та малий міжконтактний інтервал, що особливо важливо для сучасних електронних пристроїв з високою щільністю компонентів.

3. Економічність: Метод травлення є відносно економічним порівняно з іншими методами виготовлення ДП, такими як фрезерування або лазерне вирізання. Він здатний виробляти ДП великими серіями за короткий час, що дозволяє знизити витрати на виробництво.

4. Висока продуктивність: Травлення є швидким процесом, особливо для масового виробництва ДП. Використання спеціальних хімічних розчинів та устаткування дозволяє ефективно виробляти велику кількість ДП за короткий час.

5. Універсальність матеріалів: Метод травлення може бути використаний для різних матеріалів ДП, таких як FR4, фольгована кераміка, поліімід і т. д. Це дозволяє пристосувати виготовлення ДП до вимог конкретного проєкту та використовувати різні матеріали залежно від їх властивостей.

Враховуючи ці переваги, метод травлення залишається популярним і ефективним методом для виготовлення друкованих плат у багатьох сферах, включаючи електроніку, телекомунікації, медицину та інші.

Загалом метод травлення відноситься до фотолітографії. Зазвичай, у фотолітографії ДП, існує три основних підходи:

1. Позитивний процес: у позитивному процесі фоточутливий шар реагує на світло, і після експозиції відкривається у відповідних областях. Це дозволяє утворювати доріжки та отвори на ДП. Використовуючи позитивний процес, області, які були піддані світлу, залишаються на ДП, тоді як непіддані світлу області видаляються.

2. Негативний процес: у негативному процесі фоточутливий шар реагує на світло, але відкривається у тих областях, які не були піддані світлу. Таким чином, доріжки та отвори на ДП формуються там, де фоточутливий шар не був відкритий. Области, які були піддані світлу, залишаються незмінними.

3. Комбінований процес: передбачає використання попередніх двох. В середньому дозволяє отримати кращі характеристики за рахунок більшої ціни та складності.

Отже, при виборі методу виготовлення, я відав перевагу методу травлення, без особливих вимог до процесу. Вибір процесу слід робити, безпосередньо при запуску пристрою в серію аналізуючи пропозиції на ринку.

### 3.5 Вибір та обґрунтування корпусу та кріплення друкованих плат

На даний момент на ДП, по кутам є 4 отвори діаметром 2мм. Загалом сенсу в цих отворах немає. Потрібно розуміти, що такі речі як форма ДП, отвори, прорізи, фаска, додаються з врахуванням бажаної конструкції корпусу пристрою. Зараз проєкт знаходиться на стадії прототипу і забігати наперед і розробляти корпус не потрібно.

Отже, корпус та кріплення ДП можуть бути спроектовані при подальшій розробці пристрою.

|     |      |          |        |      |                     |      |
|-----|------|----------|--------|------|---------------------|------|
|     |      |          |        |      | ДК91.4 11711.001 ПЗ | Лист |
| Зм. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                     | 46   |

### 3.6 Проєктування друкованих плат у середовищі Altium Designer

Для створення ДП було використано САПР AD[12]. Було обрано саме цю програму по причині наявності досвіду роботи з нею. Зазначу, що ця САПР дозволяти формувати файли, які в свою чергу використовувала інша САПР, AutoCAD[13], для створення складального креслення (далі СК).

Загалом розробка ДП в цьому середовищі складалась з наступних етапів:

1. Створення бібліотеки графічних компонентів.
2. Створення бібліотеки посадкових місць для цих компонентів.
3. Створення схеми з'єднання компонентів.
4. Компіляція схеми з'єднання компонентів, для створення Polystyrene Foam Board (далі РСВ) проєкту.
5. Розстановка компонентів. В даній реалізації схема доволі просто, тому розстановка проводилась вручну, без попереднього аналізу.
6. Створення всіх потрібних файлів для створення ДП та СК.

Зазначу, що для оформлення креслення ДП з врахуванням вимог в відповідних документах ГОСТ, також було імпортовано необхідні файли в САПР AutoCAD.

Зовнішній вигляд ДП зображено на рисунку 3.1.

|     |      |          |        |      |                     |      |
|-----|------|----------|--------|------|---------------------|------|
|     |      |          |        |      | ДК91.4 11711.001 ПЗ | Лист |
|     |      |          |        |      |                     | 47   |
| Зм. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                     |      |

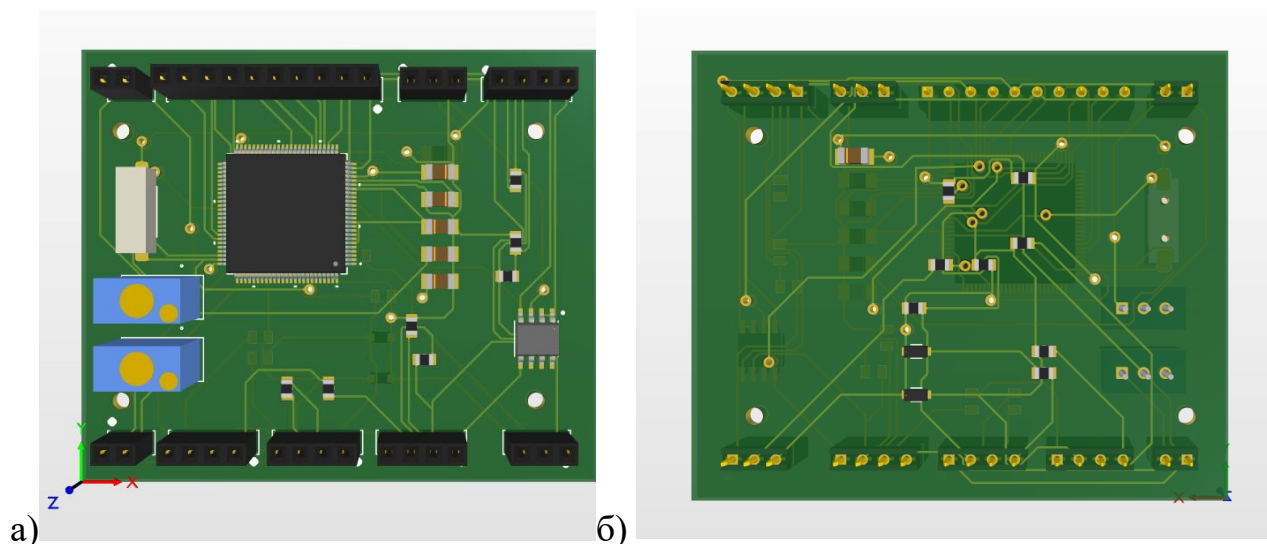


Рисунок 3.1 – Друкований вузол, а) Вид зверху, б) Вид знизу

Отже, для проєктування ДП було використано САПР AD, результатом проєктування стали відповідні файли та документація. Загалом етап вважаю успішним.

### Висновок до розділу 3

В цьому розділі було проведено аналіз всіх конструкторських рішень, що мають відношення до ДП з врахуванням наявних вимог, що диктуються бажаними характеристиками та наявними обмеженнями. Загалом, всі наявні рішення вважаю в достатній мірі обґрунтованими, а подальші кроки розробки розкритими.

#### 4. РОЗРАХУНКИ, ЩО ПІДТВЕРДЖУЮТЬ ПРАВИЛЬНІСТЬ ПРИЙНЯТИХ КОНСТРУКТОРСЬКИХ РІШЕНЬ

В цьому розділі будуть проведені конструкторсько-технологічні розрахунки для отримано ДП.

##### 4.1 Конструкторсько-технологічний розрахунок друкованої плати

Розрахунок мінімальної ширини провідника за постійним струмом для ланцюгів живлення та землі

Мінімальна ширина друкованого провідника за постійним струмом для ланцюгів живлення та «землі» визначається за наступною формулою:

$$b_{\min I} = \frac{I_{\max}}{j_{\text{доп}} \cdot t_{\text{пров}}}, \quad (4.1)$$

де  $I_{\max}$  – максимально можливий струм в ланцюгу, А;

$j_{\text{доп}}$  – допустима щільність струму для ДП, що виготовлена комбінованим позитивним методом,  $j_{\text{доп}} = 48 \frac{\text{А}}{\text{мм}^2}$  [15];

$t_{\text{пров}}$  – товщина друкованого провідника, мм.

Друкований провідник виготовлено комбінованим позитивним методом. Товщина друкованого провідника  $t_{\text{пров}}$ , згідно методу виготовлення може бути розрахована наступним чином:

$$t_{\text{пров}} = h_{\phi} + h_{\text{ГМ}} + h_{\text{ХМ}}, \quad (4.2)$$

де  $h_{\phi}$  – товщина фольги,  $h_{\phi} = 0,035$  мм

$h_{\text{ГМ}}$  – товщина шара гальванічно осадженої міді,  $h_{\text{ГМ}} = 0,055$  мм

$h_{\text{ХМ}}$  – товщина шара хімічно осадженої міді,  $h_{\text{ХМ}} = 0,0065$  мм

|     |      |          |        |      |                     |      |
|-----|------|----------|--------|------|---------------------|------|
|     |      |          |        |      | ДК91.4 11711.001 ПЗ | Лист |
|     |      |          |        |      |                     | 49   |
| Зм. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                     |      |



$$t_{\text{пров}} = 0,035 + 0,055 + 0,0065 = 0,0965 \text{ (мм)}$$

Параметр  $I_{\text{max}}$  у виразі (4.1) визначається як сума струмів, які споживають всі активні елементи схеми. В схемі присутні дві лінії напруг живлення: 20 В та 3 В. Таким чином, необхідно здійснити два окремі розрахунки мінімальної ширини друкованого провідника.

Значення струмів, що споживаються елементами схеми, для ліній живлення 20 В та 3 В представлені в таблицях 4.1 та 4.2 відповідно.

Таблиця 4.1 Струми споживання елементів схеми, лінія живлення 20 В

| Елемент схеми          | Кількість | $I_{\text{спож}}$ , мА | Сумарний $I_{\text{спож}}$ , мА |
|------------------------|-----------|------------------------|---------------------------------|
| OPA2614IDR             | 1         | 260                    | 260                             |
| Струм через подільники | 3         | 0,5                    | 1,5 (можна нехтувати)           |

Таблиця 4.2 Струми споживання елементів схеми, лінія живлення 3 В

| Елемент схеми | Кількість | $I_{\text{спож}}$ , мА | Сумарний $I_{\text{спож}}$ , мА |
|---------------|-----------|------------------------|---------------------------------|
| STM32F407     | 1         | 200                    | 200                             |
| Інші страти   | -         | 5                      | 5(можна нехтувати)              |

Сумарні струми споживання елементів схеми, для обох ліній живлення:

$$I_{\text{max}20\text{V}} = 260 \text{ (мА)}$$

$$I_{\text{max}3,3\text{V}} = 200 \text{ (мА)}$$

Мінімальна ширина друкованого провідника, за струмом, для кожної з ліній живлення:

$$b_{\text{min} I_{20\text{V}}} = \frac{I_{\text{max}}}{j_{\text{доп}} \cdot t_{\text{пров}}} = \frac{0,260}{48 \cdot 0,0965} = 0,056 \text{ (мм)}$$

$$b_{\min I_{3,3V}} = \frac{I_{\max}}{j_{\text{доп}} \cdot t_{\text{пров}}} = \frac{0,2}{48 \cdot 0,0965} = 0,044 \text{ (мм)}$$

Визначення мінімальної ширини провідника з урахуванням допустимого падіння напруги на ньому

Мінімальна ширина провідника з урахуванням допустимого падіння напруги на ньому визначається наступною формулою:

$$b_{\min U} = \frac{\rho \cdot I_{\max} \cdot L_{\text{пров}}}{U_{\text{доп}} \cdot t_{\text{пров}}}, \quad (4.3)$$

де  $\rho$  – питомий опір провідника, виготовленого комбінованим позитивним методом,  $\rho = 0,0175 \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$ ;

$L_{\text{пров}}$  – довжина найдовшого друкованого провідника на ДП;

$U_{\text{доп}}$  – допустиме падіння напруги на друкованому провіднику, В;

Допустиме падіння напруги на друкованому провіднику приймають рівним 5% від напруги живлення:

$$U_{\text{доп}20V} = 0,05 \cdot 20 = 1 \text{ (В)}$$

$$U_{\text{доп}3,3V} = 0,05 \cdot 3,3 = 0,16 \text{ (В)}$$

Мінімальна ширина друкованого провідника, з урахуванням допустимого падіння напруги на ньому, для кожної з ліній живлення:

$$b_{\min U_{20V}} = \frac{\rho \cdot I_{\max} \cdot L_{\text{пров}}}{U_{\text{доп}} \cdot t_{\text{пров}}} = \frac{0,0175 \cdot 0,260 \cdot 0,07}{1 \cdot 0,0965} = 0,032 \text{ (мм)}$$

$$b_{\min U_{3,3V}} = \frac{\rho \cdot I_{\max} \cdot L_{\text{пров}}}{U_{\text{доп}} \cdot t_{\text{пров}}} = \frac{0,0175 \cdot 0,2 \cdot 0,158}{0,16 \cdot 0,0965} = 0,037 \text{ (мм)}$$

|     |      |          |        |      |                     |      |
|-----|------|----------|--------|------|---------------------|------|
|     |      |          |        |      | ДК91.4 11711.001 ПЗ | Лист |
| Зм. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                     | 51   |

Проаналізувавши отримані результати можна стверджувати, що отримані значення  $b_{minU}$  та  $b_{minI}$  для жодної з ліній живлення є меншими за мінімально допустиму ширину провідника  $b_{прг}$  для 4 класу точності, котра рівна 0,15 мм.

#### Визначення номінального діаметру монтажного отвору

Значення номінального діаметру монтажного отвору може бути визначене за наступною формулою:

$$d \geq d_{ве} + \Delta d_{мо} + r, \quad (4.4)$$

де  $d_{ве}$  – діаметр виводу елемента, для якого визначається діаметр монтажного отвору, мм;

$\Delta d_{мо}$  – нижнє граничне відхилення від номінального діаметру МО, мм;

$r$  – різниця між мінімальним діаметром МО та максимальним діаметром виводу елементу,  $r = (0,1 \dots 0,2)$  мм.

В даному випадку необхідно розрахувати номінальний діаметр монтажних отворів для наступних елементів: R5 та R12 ( $d_{ве} = 1,4$ ), XS1-XS9 ( $d_{ве} = 1,3$ ).

Значення граничних відхилень від номінального діаметру обрані згідно з ГОСТ 23751-86.

Маємо:

$$d_1 \geq d_{ве} + \Delta d_{мо} + r = 1,4 + 0,1 + 0,2 = 1,7 \text{ (мм)}$$

$$d_2 \geq d_{ве} + \Delta d_{мо} + r = 1,3 + 0,1 + 0,2 = 1,6 \text{ (мм)}$$

|     |      |          |        |      |                     |      |
|-----|------|----------|--------|------|---------------------|------|
|     |      |          |        |      | ДК91.4 11711.001 ПЗ | Лист |
|     |      |          |        |      |                     | 52   |
| Зм. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                     |      |

Визначення діаметра контактної майданчика, максимального діаметра просвердленого отвору та максимального діаметра контактної майданчика

Розрахунок діаметра контактної майданчика виконується за формулою:

$$D_{min} = D_{min1} + 1,5 \cdot h_{\phi} + 0,03, \quad (4.5)$$

де  $D_{min1}$  – мінімальний ефективний діаметр КМ, мм;

$h_{\phi}$  – товщина фольги, для обраного матеріалу  $h_{\phi} = 0,035$  мм.

Коефіцієнт  $1,5 \cdot h_{\phi}$  враховує підтравлювання фольги друкованого провідника в ширину, коефіцієнт  $0,03$  враховує комбінований позитивний метод виготовлення контактної майданчика.

$$D_{min I} = 2 \cdot (b_{по} + \frac{d_{max}}{2} + \delta_o + \delta_{км}), \quad (4.6)$$

де  $d_{max}$  – максимальний діаметр отвору в ДП, мм;

$b_{по}$  – ширина пояса КМ, для обраного класу точності  $b_{по} = 0,05$  мм;

$\delta_o$  – похибка розташування центру отвору відносно вузла КС, для обраного класу точності  $\delta_o = 0,07$  мм;

$\delta_{км}$  – похибка розташування центру КМ відносно вузла КС, для обраного класу точності  $\delta_{км} = 0,05$  мм.

Максимальний діаметр просвердленого отвору може бути розрахований за наступною формулою:

$$d_{max} = d + \Delta d + (0,1 \dots 0,15), \quad (4.7)$$

де  $d$  – номінальний діаметр МО, мм;

$\Delta d$  – допуск на діаметр отвору, мм.

Значення допусків на діаметр отвору обрані згідно з ГОСТ 23751-86.

|     |      |          |        |      |                     |      |
|-----|------|----------|--------|------|---------------------|------|
|     |      |          |        |      | ДК91.4 11711.001 ПЗ | Лист |
|     |      |          |        |      |                     | 53   |
| Зм. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                     |      |

Максимальний діаметр контактної майданчика:

$$D_{max} = D_{min} + 0,02 \text{ мм} \quad (4.8)$$

Виконаємо розрахунки:

Для R5 та R12:

$$d_{max} = d_2 + \Delta d + (0,1 \dots 0,15) = 1,7 + 0,05 + 0,15 = 1,9 \text{ (мм)}$$

$$\begin{aligned} D_{min1} &= 2 \cdot \left( b_{по} + \frac{d_{max}}{2} + \delta_o + \delta_{км} \right) = 2 \cdot \left( 0,05 + \frac{1,9}{2} + 0,07 + 0,05 \right) \\ &= 2,24 \text{ (мм)} \end{aligned}$$

$$D_{min} = D_{min1} + 2,2 \cdot h_{\phi} + 0,03 = 1,9 + 2,2 \cdot 0,035 + 0,03 = 4,16 \text{ (мм)}$$

$$D_{max} = 4,16 + 0,02 = 4,18 \text{ (мм)}$$

Для XS1-XS9:

$$d_{max} = d_2 + \Delta d + (0,1 \dots 0,15) = 1,6 + 0,05 + 0,15 = 1,8 \text{ (мм)}$$

$$\begin{aligned} D_{min2} &= 2 \cdot \left( b_{по} + \frac{d_{max}}{2} + \delta_o + \delta_{км} \right) = 2 \cdot \left( 0,05 + \frac{1,8}{2} + 0,07 + 0,05 \right) \\ &= 2,14 \text{ (мм)} \end{aligned}$$

$$D_{min} = D_{min2} + 1,5 \cdot h_{\phi} + 0,03 = 2,14 + 1,5 \cdot 0,035 + 0,03 = 2,22 \text{ (мм)}$$

$$D_{max} = 2,22 + 0,02 = 2,24 \text{ (мм)}$$

Визначення мінімальної та максимальної ширини провідника.

$$b_{min} = b_{пр}^r + 1,5 \cdot h_{\phi} + 0,03 \text{ мм}, \quad (4.9)$$

де  $b_{пр}^r$  - мінімальна ширина провідника, для обраного класу точності,  
для четвертого класу точності  $b_{пр}^r = 0,15 \text{ мм}$ .

|     |      |          |        |      |                     |      |
|-----|------|----------|--------|------|---------------------|------|
|     |      |          |        |      | ДК91.4 11711.001 ПЗ | Лист |
|     |      |          |        |      |                     | 54   |
| Зм. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                     |      |

Маємо:

$$b_{min} = 0,15 + 1,5 \cdot 0,035 + 0,03 = 0,23 \text{ (мм)}$$

Нас також цікавить максимальна ширина провідника:

$$b_{max} = b_{min} + 0,02 = 0,25 \text{ (мм)}$$

Визначення мінімальної відстані між провідником та контактним майданчиком

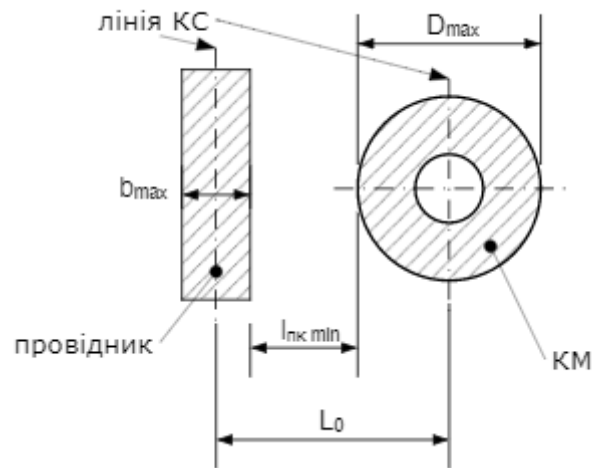


Рисунок 4.1 – Схематичне зображення відстані між провідником і контактним майданчиком

Мінімальна відстань між провідником та контактним майданчиком визначається за формулою:

$$l_{пкм min} = L_0 - \left( \frac{D_{max}}{2} + \delta_{км} + \frac{b_{max}}{2} + \delta_{сп} \right), \quad (4.10)$$

де  $L_0$  – відстань між центрами отворів та друкованим провідником, які кратні кроку КС,  $L_0 = 1,9$  мм (найгірший випадок).

$D_{max}$  - максимальний діаметр КМ, в даному випадку  $D_{max} = 1,54$  мм;

$\delta_{сп}$  - похибка, яка враховує зміщення провідника,  $\delta_{сп} = 0,05$  мм.

Маємо:

$$l_{ПКМ\ min} = 1,9 - \left( \frac{4,18}{2} + 0,05 + \frac{0,25}{2} + 0,05 \right) = -0,485 \text{ (мм)}$$

Визначення мінімальної відстані між краями двох сусідніх провідників

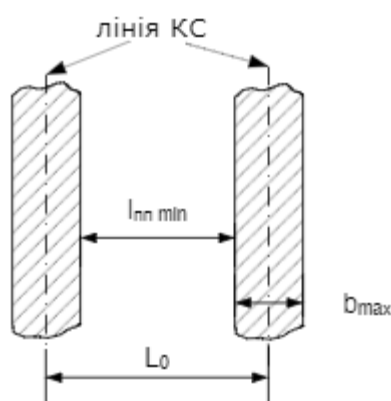


Рисунок 4.2 – Схематичне зображення відстані між двома сусідніми провідниками

Мінімальна відстань між краями двох сусідніх провідників обчислюється наступним чином:

|     |      |          |        |      |                     |      |
|-----|------|----------|--------|------|---------------------|------|
|     |      |          |        |      | ДК91.4 11711.001 ПЗ | Лист |
| Зм. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                     | 56   |

$$l_{\text{ПП min}} = L_0 - (b_{\text{max}} + 2 \cdot \delta_{\text{сп}}), \quad (4.11)$$

де  $L_0$  – відстань між центрами друкованих провідників, які кратні кроку КС,  $L_0 = 0,5$  мм.

$$l_{\text{ПП min}} = 0,5 - (0,25 + 2 \cdot 0,05) = 0,15 \text{ (мм)}$$

Отримане значення не є меншим за гранично допустиму мінімальну відстань між елементами друкованого монтажу для 4 класу точності, отже, може бути технологічно виконаним.

Розрахунок мінімальної відстані між двома контактними майданчиками

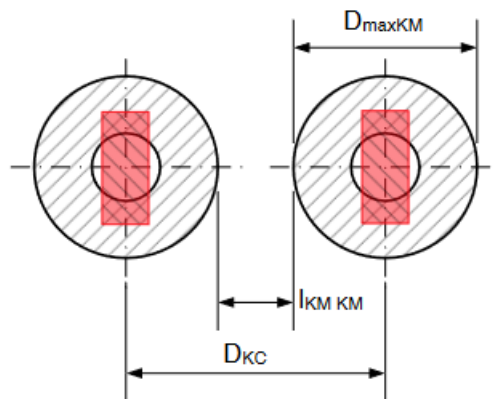


Рисунок 4.3 – Схематичне зображення відстані між двома контактними майданчиками

Мінімальна відстань між двома контактними майданчиками може бути розрахована за формулою:

$$l_{\text{КМ min}} = L_0 - (D_{\text{max}} + 2 \cdot \delta_{\text{КМ}}), \quad (4.12)$$



де  $L_0$  – відстань між центрами сусідніх КМ, в даному випадку  $L_0 = 2,8$  мм.

$$l_{\text{км min}} = 2,8 - (4,18 + 2 \cdot 0,05) = 0,52 \text{ (мм)}$$

#### 4.2 Електричний розрахунок друкованої плати

Визначимо падіння напруги на найдовшому друкованому провіднику

Падіння напруги на друкованому провіднику визначається за наступною формулою:

$$U_{\text{пад}} = \frac{\rho \cdot I_{\text{max}} \cdot l_{\text{пр}}}{b_{\text{пр}} \cdot t_{\text{пр}}}, \quad (4.13)$$

де  $\rho$  - питомий об'ємний опір для комбінованого позитивного методу виготовлення ДП,  $\rho = 0,0175 \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$ ;

$l_{\text{пр}}$  – максимальна довжина друкованого провідника;

$t_{\text{пр}}$  - товщина провідника;

$I_{\text{max}}$  – максимальний струм у провіднику.

Найдовшим провідником на ДП є провідник лінії живлення 3 В, падіння напруги на провіднику становить:

$$U_{\text{пад3,3V}} = \frac{0,0175 \cdot 0,2 \cdot 0,16}{0,25 \cdot 0,0965} = 0,022 \text{ (В)}$$

Розрахуємо падіння напруги на найдовшому провіднику лінії живлення 5 В:

$$U_{\text{пад20V}} = \frac{0,0175 \cdot 0,26 \cdot 0,07}{0,25 \cdot 0,0965} = 0,013 \text{ (В)}$$

|     |      |          |        |      |                     |      |
|-----|------|----------|--------|------|---------------------|------|
|     |      |          |        |      | ДК91.4 11711.001 ПЗ | Лист |
|     |      |          |        |      |                     | 58   |
| Зм. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                     |      |

Визначення потужності втрат двосторонньої друкованої плати.

Потужність втрат ДДП може бути визначеною за формулою:

$$P_{\text{втрат}} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C \cdot E_{\text{жив}}^2 \cdot \operatorname{tg} \sigma, \quad (4.14)$$

де  $f$  – робоча частота, в даному випадку рівна 25 Гц.

$\operatorname{tg} \sigma$  – тангенс кута діелектричних втрат для матеріалу друкованої плати;

$E_{\text{жив}}$  – напруга живлення;

$C$  – ємність друкованої плати мкФ.

Ємність друкованої плати розраховується за формулою:

$$C = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot S_m}{h}, \quad (4.15)$$

де  $\varepsilon$  – діелектрична проникність матеріалу ДП, для FR4  $\varepsilon = 4,5$ ;

$\varepsilon_0$  – електрична константа  $\varepsilon_0 = 9 \cdot 10^{-12}$  (Ф/м);

$S_m$  – площа металізації ДП, в даному випадку  $S_m = 2200$  мм<sup>2</sup>;

$h$  – товщина друкованої плати, в даному випадку  $h = 1,5$  мм.

$$C = \frac{9 \cdot 10^{-12} \cdot 4,5 \cdot 0,0022}{0,0015} = 59,4 \text{ (пФ)}$$

Тангенс кута діелектричних втрат для ДП, враховуючи покриття лаком у 2 шари, можна розрахувати за формулою:

$$\operatorname{tg} \sigma = \frac{\varepsilon_{\text{лаку}} \cdot h_{\text{мат.ДП}} \cdot \operatorname{tg} \sigma_{\text{мат.ДП}} + 2 \cdot \varepsilon_{\text{мат.ДП}} \cdot 2 \cdot h_{\text{шару лаку}} \cdot \operatorname{tg} \sigma_{\text{лаку}}}{2 \cdot \varepsilon_{\text{мат.ДП}} \cdot 2 \cdot h_{\text{шару лаку}} + \varepsilon_{\text{лаку}} \cdot h_{\text{мат.ДП}}}, \quad (4.16)$$

де  $\varepsilon_{\text{лаку}}$  – діелектрична проникність лаку, для УР-231 ТУ-6-21-14-90

$\varepsilon_{\text{лаку}} = 4,5$  Ф/м;

|     |      |          |        |      |                     |      |
|-----|------|----------|--------|------|---------------------|------|
|     |      |          |        |      | ДК91.4 11711.001 ПЗ | Лист |
|     |      |          |        |      |                     | 59   |
| Зм. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                     |      |

$h_{\text{мат.ДП}}$  – товщина друкованої плати, в даному випадку

$$h_{\text{мат.ДП}} = 0,0015 \text{ м};$$

$\text{tg}\sigma_{\text{мат.ДП}}$  – тангенс кута діелектричних втрат для матеріалу ДП, для

$$\text{FR4 } \text{tg}\sigma_{\text{мат.ДП}} = 0,002;$$

$\epsilon_{\text{мат.ДП}}$  – діелектрична проникність матеріалу ДП, для FR4

$$\epsilon_{\text{мат.ДП}} = 4,5 \text{ Ф/м};$$

$h_{\text{шару лаку}}$  – товщина одного шару лаку, в даному випадку

$$h_{\text{шару лаку}} = 0,000005 \text{ м};$$

$\text{tg}\sigma_{\text{лаку}}$  – тангенс кута діелектричних втрат лаку, для УР-231 ТУ-6-

$$21-14-90 \text{ tg}\sigma_{\text{лаку}} = 0,03.$$

Маємо:

$$\text{tg}\sigma = \frac{4,5 \cdot 0,0015 \cdot 0,002 + 2 \cdot 4,5 \cdot 2 \cdot 0,000005 \cdot 0,03}{2 \cdot 4,5 \cdot 2 \cdot 0,000005 + 4,5 \cdot 0,0015} = 0,0024$$

$$P_{\text{втрат}} = 2 \cdot 3,14 \cdot 25 \cdot 59,4 \cdot 10^{-12} \cdot 5^2 \cdot 0,0024 = 550 \text{ пВт}$$

Визначення ємності між двома сусідніми провідниками, які розташовуються на одній стороні ДП та мають однакову ширину

Значення ємності між двома сусідніми провідниками, котрі розташовані на одній стороні ДП та мають однакову ширину, може бути обчислене за наступною формулою:

$$C = 0,12 \cdot \epsilon \cdot l_{\text{пр}} \cdot \left[ \lg \frac{2 \cdot S}{b_{\text{пр}} + t_{\text{пр}}} \right]^{-1}, \quad (4.17)$$

|     |      |          |        |      |                     |      |
|-----|------|----------|--------|------|---------------------|------|
|     |      |          |        |      | ДК91.4 11711.001 ПЗ | Лист |
|     |      |          |        |      |                     | 60   |
| Зм. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                     |      |

де  $\varepsilon$  – діелектрична проникність для матеріалу ДП;

$S$  – відстань між двома паралельними провідниками, в даному випадку  $S = 0,325$  мм;

$b_{\text{пр}}$  – ширина друкованого провідника, в даному випадку  $b_{\text{пр}} = 0,25$  мм;

$t_{\text{пр}}$  – товщина друкованого провідника, в даному випадку  $t_{\text{пр}} = 0,0965$  мм;

$l_{\text{пр}}$  – довжина взаємного перекриття двох паралельних провідників, в даному випадку  $l_{\text{пр}} = 6$  мм.

Обчислимо значення діелектричної проникності для друкованої плати, враховуючи покриття лаком у 2 шари:

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_{\text{мат.ДП}} \cdot \varepsilon_{\text{лаку}} \cdot (h_{\text{мат.ДП}} + 2 \cdot 2 \cdot h_{\text{шару лаку}})}{h_{\text{мат.ДП}} \cdot \varepsilon_{\text{лаку}} + 2 \cdot 2 \cdot h_{\text{шару лаку}} \cdot \varepsilon_{\text{мат.ДП}}}, \quad (4.18)$$

де  $\varepsilon_{\text{мат.ДП}}$  – діелектрична проникність матеріалу ДП;

$\varepsilon_{\text{лаку}}$  – діелектрична проникність лаку;

$h_{\text{мат.ДП}}$  – товщина друкованої плати;

$h_{\text{шару лаку}}$  – товщина одного шару лаку;

$$\varepsilon = \frac{4,5 \cdot 4,5 \cdot (0,0015 + 2 \cdot 2 \cdot 0,000005)}{0,0015 \cdot 4,5 + 2 \cdot 2 \cdot 0,000005 \cdot 4,5} = 4,5$$

$$C = 0,12 \cdot 4,5 \cdot 6 \cdot \left[ \lg \frac{2 \cdot 0,325}{0,25 + 0,0965} \right]^{-1} = 11 \text{ (пФ)}$$

Визначення взаємної індуктивності двох паралельних провідників однакової довжини.

Взаємна індуктивність двох паралельних провідників однакової довжини може бути розрахована за формулою:

$$M = 0,02 \left( l_{\text{пр}} \lg \frac{\sqrt{l_{\text{пр}}^2 - L_0^2} + l_{\text{пр}}}{L_0} - \sqrt{l_{\text{пр}}^2 - L_0^2} + L_0 \right), \quad (4.19)$$

де  $l_{\text{пр}}$  – довжина перекриття паралельних провідників,  $l_{\text{пр}} = 0,6$  см;

$L_0$  – відстань між осьовими лініями двох паралельних провідників,

$L_0 = 0,058$  см;

Маємо:

$$M = 0,02 \left( 0,6 \cdot \lg \frac{\sqrt{0,6^2 - 0,05^2} + 0,6}{0,05} - \sqrt{0,6^2 - 0,05^2} + 0,05 \right) = 5,7 \text{ (пГн)}$$

### 4.3 Розрахунок віброміцності друкованого вузла

Для виконання розрахунку віброміцності друкованого вузлу спочатку потрібно визначити масу всіх елементів та самої плати. Відповідні дані занесено до таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 Маса елементів друкованої плати

| Компонент | Кількість | Маса, г | Сумарна маса, г |
|-----------|-----------|---------|-----------------|
| C-1206    | 6         | 0,007   | 0,0504          |
| DD1       | 1         | 0,05    | 0,056           |
| DD2       | 1         | 0,5     | 14,4            |
| L1        | 1         | 0,005   | 0,01            |

Таблиця 4.3 Маса елементів друкованої плати. Продовження

|          |    |       |       |
|----------|----|-------|-------|
| R-0805   | 14 | 0,005 | 0,35  |
| R5/R12   | 2  | 0,8   | 0,05  |
| SB1      | 1  | 0,7   | 2,4   |
| VD1/VD2  | 2  | 0,006 | 0,055 |
| XS6, XS9 | 2  | 0,02  | 17    |
| XS1, XS7 | 2  | 0,04  | 0,2   |
| XS2, XS4 | 2  | 0,06  | 0,024 |
| XS5, XS8 | 2  | 0,06  | 0,35  |
| XS3      | 1  | 0,2   | 0,24  |
| Всього   |    |       | 3,5   |

Розмір ДП:  $a \cdot b \cdot \delta = 52 \cdot 62 \cdot 1,5$  мм.

Густина склотекстоліту FR4:  $\rho = 1850$  кг/м<sup>3</sup>

Маса ДП може бути розрахована за формулою:

$$m = \rho \cdot V = \rho \cdot a \cdot b \cdot \delta = 1850 \cdot 0,052 \cdot 0,062 \cdot 0,0015 = 0,009 \text{ (кг)}$$

Параметри склотекстоліту FR4:

- Тимчасовий опір  $\sigma_{\text{тимч}} = 105$  МПа;
- Модуль Юнга  $E = 3,02 \cdot 10^{10}$  Па;
- Коефіцієнт Пуассона  $\mu = 0,22$ ;
- Показник затухання  $\varepsilon = 0,06$ ;
- Густина  $\rho = 1850$  кг/м<sup>3</sup>;
- Питома щільність  $\nu = 2,05 \cdot 10^4$  Н/м<sup>3</sup>;
- Коефіцієнт запасу міцності  $n_1 = 2$ ;

Обрано метод закріплення ДП – кріплення в 4 точках. Схематично це зображено на рисунку 4.5.



Рисунок 4.5 – Схематичне зображення методу закріплення ДП в 4 точках

Далі наведено розрахунки методу закріплення в 4 точках:

$$f = \frac{\pi}{2 \cdot a^2} \cdot \left( 1 + \left( \frac{a^2}{b^2} \right) \right) \cdot \sqrt{\frac{D}{M}} \cdot a \cdot b, \quad (4.20)$$

де  $a$  – довжина пластини,  $a = 0,052$  м;

$b$  – ширина пластини,  $b = 0,062$  м;

$D$  – циліндрична жорсткість, Н · м;

$M$  – маса пластини з електронними компонентами,  $M$ .

$$M = 0,009 + 0,0035 = 0,0125 \text{ (кг)}$$

У (4.28) наведено формулу розрахунку циліндричної жорсткості  $D$ :

$$D = E \cdot \frac{h^3}{12 \cdot (1 - \mu^2)} \quad (4.21)$$

де  $E$  – модуль пружності для матеріалу друкованої плати;

$h$  – товщина пластини;

$\mu$  – коефіцієнт Пуассона.

$$D = 3,02 \cdot 10^{10} \cdot \frac{0,0015^3}{12 \cdot (1 - 0,22^2)} = 8,93 \text{ (Н} \cdot \text{м)}$$

Розрахуємо власну частоту коливань ДП  $f_{\text{власн}}$ :

$$f_{\text{власн}} = \frac{\pi}{2 \cdot 0,062^2} \cdot \left( 1 + \left( \frac{0,062^2}{0,052^2} \right) \right) \cdot \sqrt{\frac{8,93}{0,0125} \cdot 0,052 \cdot 0,062} = 1501 \text{ Гц}$$

Так як розраховане значення перевищує 250 Гц, отже плата задовольняє всі умови по забезпеченню віброміцності, тому не потрібно застосовувати додаткових засобів по забезпеченню жорсткості кріплення.

#### 4.4 Розрахунок основних показників надійності

Надійність друкованого вузлу визначається надійністю всіх елементів, що встановлюються на ДП, власне самою ДП та пайкою елементів. Відмова одного чи декількох елементів веде до відмови всієї складної ЕОА, при чому ці елементи фактично є невідновлюваними. Тому найбільш точною кількісною мірою надійності кожного конструктивного елемента є час напрацювання його до відмови. Для повної характеристики надійності необхідна густина розподілу часу безвідмовної роботи даного типу конструктивного елемента  $f(t)$  та інтенсивність відмов  $\lambda(t)$ , то маючи ці залежності можна визначити імовірність відмови, середній час безвідмовної роботи.

Для розрахунку інтенсивності відмов елемента будемо використовувати базову інтенсивність відмов  $\lambda_0$  – тобто при нормальних умовах. Ця величина є експериментальною і наведена у довідниках для різних елементів.

|     |      |          |        |      |                     |      |
|-----|------|----------|--------|------|---------------------|------|
|     |      |          |        |      | ДК91.4 11711.001 ПЗ | Лист |
| Зм. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                     | 65   |



Оскільки коефіцієнт навантаження є недовідниковим значенням, тому розрахуємо його для кожного з типів конструктивних елементів. Він визначається як відношення навантаження в робочому режимі до навантаження номінального.

Для резисторів  $K_R$  визначається за потужністю, що на ньому розсіюється. Цілком логічно, що найбільша потужність буде виділятися на тому з резисторів, через який протікає струм, а струм, що протікає через резистор, обернено пропорційний його опору (чим більший опір, тим менший струм), тому розглянемо резистор з найменшим номінальним опором в приладі як найгірший випадок, оскільки для інших, більших, опорів коефіцієнт навантаження буде меншим, тому взявши для всіх резисторів коефіцієнт навантаження в найгіршому випадку, ми таким чином отримаємо гірші показники, але це краще для конструкторського розрахунку, оскільки створюватиме певний запас по надійності.

$$K_{HR} = \frac{P_{роб}}{P_{ном}} = \frac{U_{роб}^2}{R \cdot P_{ном}}, \quad (4.22)$$

де  $R$  – найменший з опорів для резисторів потужністю 0,1 Вт;

$P_{ном}$  – номінальна потужність;

$U_{жив}$  – напруга, що виділяється на резисторі.

Розрахуємо значення коефіцієнту навантаження для змінного резистора R5. Допустимо користувач налаштує його на 50 Ом:

$$K_{HR} = \frac{3,3^2}{50 \cdot 0,1} = 0,54$$

Для конденсаторів коефіцієнт навантаження визначається по напрузі.

$$K_{HC} = \frac{U_{роб}}{U_{ном}}, \quad (4.23)$$

|     |      |          |        |      |                     |      |
|-----|------|----------|--------|------|---------------------|------|
|     |      |          |        |      | ДК91.4 11711.001 ПЗ | Лист |
|     |      |          |        |      |                     | 66   |
| Зм. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                     |      |

де  $U_{роб}$  – робоча напруга конденсатора;  
 $U_{ном}$  – напруга пробою конденсатора.

Для керамічних конденсаторів з напругою пробою 25 В:

$$K_{Hc} = \frac{3,3}{25} = 0,13$$

Коефіцієнти для усіх інших елементів оберемо рівними 1 для розрахунку найгіршого випадку.

Інтенсивність відмов друкованого вузлу визначаємо як інтенсивність відмов металізованих отворів. Дані для розрахунку часу напрацювання до першої відмови занесені до таблиці 4.4. Кліматичне виконання приладу УХЛ 4.2. Даний друкований вузол відноситься до наземної рухомої ЕРА, тому  $\alpha_e = 15$ . Показники інтенсивності відмов, що наведені в таблиці дозволяють виконати розрахунок для «найгіршого випадку».

Таблиця 4.4 Показники для найгіршого випадку розрахунку надійності

| Компонент                                      | N   | $\lambda_{0e} \cdot 10^{-6}, \text{ год}^{-1}$ | $K_H$ | $\alpha_t$ | $\alpha_e$ | $N \cdot \lambda_{0e} \cdot 10^{-6} \cdot K_H \cdot \alpha_t \cdot \alpha_e$ |
|--|-----|--|-------|------------|------------|--|
| Конденсатори кер.                              | 6   | 0,022  | 0,54  | 0,4        | 15         | 0.43   |
| Резистори                                      | 16  | 0,044  | 0,13  | 0,2        |            | 0.27   |
| Діоди  | 1   | 0,003  | 1     | 0,9        |            | 0.04   |
| Мікросхеми                                     | 2   | 0,025  | 1     | 1,2        |            | 0.90   |
| Перемикачі                                     | 1   | 0,16   | 1     | 1          |            | 2.40   |
| Роз'єми  | 8   | 0,015  | 1     | 1          |            | 1.80   |
| Друкована плата                                | 1   | 0,001  | 1     | 1          |            | 0.02   |
| Мет. отвори                                    | 69  | 0,000017                                       | 1     | 1          |            | 0.02   |
| Пайки виводу                                   | 168 | 0,000069                                       | 1     | 1          |            | 0.17   |
| Сумарна інтенсивність відмов друкованого вузлу |     |  |       |            |            | 6.04   |

Фактична інтенсивність відмов дорівнює сумі інтенсивності відмов компонентів:

$$\sum_{i=1}^n \lambda_{pi} = 6 \cdot 10^{-6} \text{ год}^{-1}$$

Середній час напрацювання до першої відмови:

$$T_{cp} = \frac{1}{\lambda_p} \quad (4.24)$$

$$T_{cp} = \frac{1}{6 \cdot 10^{-6}} \approx 170000 \text{ (год)}$$

Ймовірність безвідмовної роботи протягом року:

$$P_{p\dot{u}q}(t) = e^{-\lambda_p t} \quad (4.25)$$

$$t = 365 \cdot 24 = 8760 \text{ (год)}$$

$$P_{p\dot{u}q}(t) = e^{-6 \cdot 10^{-6} \cdot 8760} = 0,95$$

Ймовірність відмов протягом року:

$$Q_{p\dot{u}q} = 1 - P_{p\dot{u}q} \quad (4.26)$$

$$Q_{p\dot{u}q} = 1 - 0,95 = 0,05$$

Таблиця 4.5 Значення безвідмовної роботи та відмов за час t (год)

|     |      |          |        |      |                     |      |
|-----|------|----------|--------|------|---------------------|------|
|     |      |          |        |      | ДК91.4 11711.001 ПЗ | Лист |
|     |      |          |        |      |                     | 68   |
| Зм. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                     |      |

| t, год   | P(t)   | Q(t)   |
|----------|--------|--------|
| 10       | 0.9999 | 0.0001 |
| 100      | 0.9994 | 0.0006 |
| 1000     | 0.9941 | 0.0059 |
| 10000    | 0.9421 | 0.0579 |
| 100000   | 0.5510 | 0.4490 |
| 1000000  | 0.0026 | 0.9974 |
| 10000000 | 0.0000 | 1.0000 |

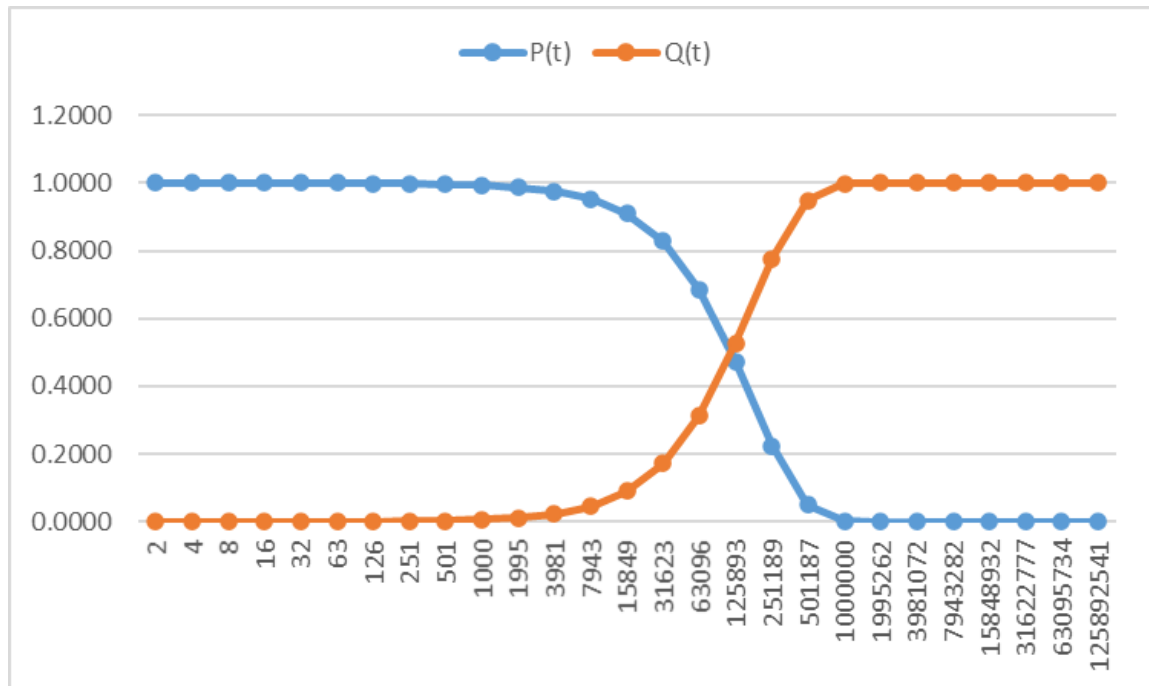


Рисунок 4.4 – Графік залежності ймовірності безвідмовної роботи та ймовірності відмови від часу  $t$

#### Висновок до розділу 4

В цьому розділі були проведені основні конструкторсько-технічні, електричні розрахунки, а також була розрахована віброміцність. Результат основних розрахунків такий:

- Ємність між двома сусідніми провідниками, які розташовуються на одній стороні ДП та мають однакову ширину – 11 пФ
- Середній час напрацювання до першої відмови склав 170 тисяч, що в 17 разів більше за висунуту вимогу в 10 тисяч.
- Індуктивність двох паралельних провідників однакової довжини – 5,7 пГн
- Потужність втрат двосторонньої друкованої плати – 550 пВт
- Власна частота коливань ДП – 1501 Гц (відповідає нормі)

Більшість результатів є задовільними, але при подальшому вдосконаленні пристрою, ДП слід буде переробити з врахуванням недоліків знайдених в цьому розділі.

|     |      |          |        |      |                     |      |
|-----|------|----------|--------|------|---------------------|------|
|     |      |          |        |      | ДК91.4 11711.001 ПЗ | Лист |
|     |      |          |        |      |                     | 70   |
| Зм. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                     |      |

## 5. ПРОЄКТУВАННЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

### 5.1 Аналіз структури проєкту та файлів проєкт

Загалом програма складається з чотирьох файлів. Розглянемо їх більш детально:

#### 1. Стартова програма.

Спершу програма запускає на виконання файл `start_up.s`. Це файл написаний на мові асемблер, він відповідає за базову конфігурацію МК. Цей файл старту для мікроконтролера STM32F407VG виконує декілька важливих функцій. Давайте розберемося детальніше, що відбувається в цьому файлі:

- Оголошення розміру стеку: Перші кілька рядків визначають розмір стеку (`Stack_Size`) і резервують відповідну кількість пам'яті для стеку (`Stack_Mem`).
- Оголошення областей пам'яті: Файл поділений на різні області пам'яті за допомогою директив `AREA`. В цьому конкретному випадку, використовується область пам'яті `STACK` для стеку, яка не ініціалізується (`NOINIT`) і доступна для читання/запису (`READWRITE`). Ця область містить `Stack_Mem`.
- Векторна таблиця: Наступні рядки визначають область пам'яті `RESET`, яка містить векторну таблицю. Векторна таблиця використовується для перехоплення переривань і початку виконання відповідних функцій обробки. У даному випадку, векторна таблиця містить два важливі записи:
  - ❖ `__initial_sp`: Запис вказує на вершину стеку (`__initial_sp`). Він вказує на початок області `Stack_Mem`, яка була визначена раніше.
  - ❖ `Reset_Handler`: Запис вказує на функцію обробки скидання (`Reset_Handler`), яка буде викликана після скидання мікроконтролера. У цьому випадку, вона викликає функцію `main`.

- Функція `Reset_Handler`: Ця функція є обробником скидання (`reset`) і є початковою точкою виконання програми. У цьому випадку, `Reset_Handler` імпортується (`IMPORT`) функція `main`, і після цього виконується перехід (`BX`) до функції `main`.

Отже, загальною метою цього файлу старту є ініціалізація стеку, встановлення векторної таблиці для обробки переривань і перехід до функції `main`, яка відповідає за подальше виконання програми вашого старту на мікроконтролері STM32F407VG.

Зазначу, що з лістингом коду можна ознайомитись в «Додаток Б».

## 2. Головна програма, вона описана в файлі `main.c`.

Даний файл починається з підключення файлу заголовків, за це відповідає рядок `#include "inc.h"`. Детальніше про файл `inc.h` буде в нижче.

Після підключення файлу заголовків, починається головна функція `main`. В цьому файлі перші 4 викликані функції проводять конфігурацію МК.

`«clock_conf();»` – конфігурація ЧТ МК.

`«init_UART2();»` – конфігурація вбудованого, АМ USART2.

`«init_DAC();»` – конфігурація вбудованого АМ DAC.

`«init_ADC();»` – конфігурація вбудованого АМ ADC.

Після цього блоку конфігурації ПМК, відбувається відправлення повідомлення по UART. Повідомлення наступне: `«START:»`. Таким чином, користувач розуміє, що результат він отримує з самого початку. Це потрібно для того, щоб присікти помилку інтерпретації даних, коли користувач бачить лише частину інформації.

|     |      |          |        |      |                     |      |
|-----|------|----------|--------|------|---------------------|------|
|     |      |          |        |      | ДК91.4 11711.001 ПЗ | Лист |
|     |      |          |        |      |                     | 72   |
| Зм. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                     |      |

Далі надсилається такий текст: «\n\n\nSTART:\n\r(V1:V2)U1|U2|U3|U4\n\r». Цей текст показує в якому форматі будуть надсилатись дані. Звідси видно, що напруга на ЦАП 1 та ЦАП 2 показуються в дужках. Значення цих напруг, це значення яке МК записує в регістр DAC\_DHR12R1 для ЦАП 1 та DAC\_DHR12R2 для ЦАП 2. Детальніше робота АМ ЦАП МК буде розкрита при описі функції init\_DAC(); в «5.2 Аналіз функцій».

Після виводу цього тексту починає свою роботу вкладений цикл. На першому рівні вкладеності, відбувається приріст значення на другому виході ЦАП на 100 одиниць. При напругі Vref в 3 вольти, це буде напруга приблизно рівна 73 мВ. Оновлене значення завантажується в відповідний регістр. Даний показник можна легко змінити, щоб збільшити, чи зменшити кількість кроків.

На другому рівні відбувається приріст значення напруги на першому виході ЦАП також на 100 умовних одиниць. Оновлене значення завантажується в відповідний регістр. Після цього, йдуть п'ять викликів функції, щоб надіслати по UART наругу з виходів ЦАП. Надсилається вона в форматі описаному вище.

Після того, як була надіслана напруга з виходів ЦАП, потрібно, ще зчитати значення з 4 входів АЦП та надіслати результат у відповідному форматі, за це відповідає функція ADC\_conv();.

Після того, як вкладений цикл відпрацює, надсилається повідомлення «STOP\n\r», саме з цього моменту робота МК вважається закінченою, а програма входить в нескінчений пустий цикл.

### 3. Файл заголовків inc.h

Файли заголовків є текстовими файлами, які містять декларації функцій, змінних та інших об'єктів у мові програмування C. Вони використовуються для



оголошення інтерфейсу модуля або бібліотеки, тобто вони містять лише сигнатури функцій та типи даних без визначення фактичного коду.

Файли заголовків широко використовуються в розробці програм на мові C для підключення бібліотек інших розробників або для створення інтерфейсу між різними компонентами програми. Вони дозволяють розділити декларації об'єктів від їх визначень, що сприяє модульності коду та забезпечує легку перевикористаність інших модулів.

Файл заголовка має розширення ".h" і зазвичай містить прототипи функцій, структури даних, макроси та константи, які використовуються в коді програми. Цей файл потім може бути підключений до вихідного коду за допомогою директиви препроцесора "#include".

Проведемо аналіз цього файлу. В перших двох рядках, з використанням ключового слова #include було відключено дві бібліотеки, stdio.h та stdlib.h.

Коротко про бібліотеку stdio.h, stdio.h є одним з файлів заголовків стандартної бібліотеки мови програмування C. Він містить декларації функцій, констант та типів даних, які використовуються для введення/виведення (I/O) у програмах на C.

stdio.h надає набір функцій для роботи зі стандартними потоками вводу/виводу, такими як клавіатура (stdin) та екран (stdout). Ці функції дозволяють читати вхідні дані з клавіатури, виводити результати на екран, читати/записувати дані у файли та керувати потоками даних.

Нижче наведено декілька прикладів функцій та констант, які доступні у stdio.h:

- printf: Функція, що виводить форматовані дані на екран.
- scanf: Функція, що читає вхідні дані з клавіатури за заданим форматом.
- fprintf: Функція, що виводить форматовані дані у файл.

|     |      |          |        |      |                     |      |
|-----|------|----------|--------|------|---------------------|------|
|     |      |          |        |      | ДК91.4 11711.001 ПЗ | Лист |
|     |      |          |        |      |                     | 74   |
| Зм. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                     |      |

- `fscanf`: Функція, що читає дані з файлу за заданим форматом.
- `fgetc`: Функція, що читає рядок з файлу або стандартного введення.
- `fopen`, `fclose`: Функції для відкриття та закриття файлів.
- `stdin`, `stdout`, `stderr`: Об'єкти, які представляють стандартні потоки вводу/виводу.

Крім цього, `stdio.h` включає в себе такі типи даних, як `FILE`, який представляє файловий потік, та `size_t`, який використовується для вимірювання розміру об'єктів.

Для включення `stdio.h` у вихідний код використовується директива `#include <stdio.h>`. Це дає доступ до функцій та констант, оголошених у файлі заголовка, і дозволяє їх використовувати у програмі.

Заголовок `stdio.h` є одним з найбільш використовуваних файлів заголовків у C, оскільки I/O - важлива частина багатьох програм, незалежно від їх призначення.

Коротко про бібліотеку `stdlib.h`, це одним з файлів заголовків стандартної бібліотеки мови програмування C. Він містить декларації функцій, які забезпечують різноманітні утиліти та функціональність, пов'язану з управлінням пам'яттю, перетворенням рядків, генеруванням випадкових чисел та іншими операціями.

Нижче наведено декілька часто використовуваних функцій та констант, які доступні у `stdlib.h`:

- `malloc`, `calloc`, `realloc`, `free`: Функції для управління динамічною пам'яттю. `malloc` використовується для виділення блоку пам'яті певного розміру, `calloc` - для виділення блоку пам'яті та ініціалізації

його нулями, realloc - для зміни розміру раніше виділеного блоку пам'яті, free - для звільнення виділеної пам'яті.

- atoi, atol, atof: Функції для перетворення рядків на цілі числа (atoi), довгі цілі числа (atol) та числа з рухомою точкою (atof).
- rand, srand: Функції для генерування псевдовипадкових чисел. rand повертає наступне псевдовипадкове число, srand встановлює початкове значення для генератора псевдовипадкових чисел.
- system: Функція, яка виконує системну команду, передану їй як рядок.
- exit: Функція для завершення програми та повернення контролю операційній системі.
- NULL: Константа, яка представляє нульовий вказівник.

stdlib.h також включає в себе інші функції, типи даних та макроси, які надають різні утиліти для роботи з пам'яттю, рядками, випадковими числами та іншими аспектами програми.

Для включення stdlib.h у вихідний код використовується директива #include <stdlib.h>. Це дає доступ до функцій та констант, оголошених у файлі заголовка, і дозволяє їх використовувати у програмі.

stdlib.h є важливим файлом заголовка для багатьох програм на C, оскільки надає широкі можливості для управління пам'яттю та іншими операціями, що забезпечують ефективну та функціональну роботу програми.

Після підключення бібліотек йде визначення констант Vref\_V та Vref\_mV. Програму можна вдосконалити, для автоматичного визначення однієї константи на іншу. З назв зрозуміло, що це константи, які показують значення напруги в вольтах та мілівольтах відповідно. По замовчуванню вони рівні 2,935 та 2935 відповідно.

|     |      |          |        |      |                     |            |
|-----|------|----------|--------|------|---------------------|------------|
|     |      |          |        |      | ДК91.4 11711.001 ПЗ | Лист<br>76 |
| Зм. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                     |            |

Після визначення цих констант йде визначення макросу Volt. У випадку якщо макрос буде визначений, то результат буде надсилатись по UART в вольтях, якщо макрос НЕ буде визначений, то результат буде надсилатись в умовних одиницях. Тобто буде повертатись значення з регістрів ЦАП та АЦП.

Після цього в файлі йде визначення прототипів функції. Визначення прототипів функцій у файлах заголовків є поширеним підходом у мові програмування C. Файли заголовків (файли з розширенням ".h") містять декларації функцій, структур даних, макросів та інших об'єктів, які використовуються у програмі. Вони слугують інтерфейсом до відповідних модулів або бібліотек.

Основна мета використання файлів заголовків - розділити оголошення функцій (прототипи) від їх визначень (реалізацій) у вихідному коді програми. Прототипи функцій містять лише оголошення функції, включаючи її ім'я, тип повернення, типи та імена параметрів. Вони не містять фактичного коду функції.

Визначення прототипів функцій у файлах заголовків дозволяє забезпечити модульність та перевикористаність коду. Завдяки цьому, інші модулі або файли вихідного коду можуть включати відповідний файл заголовка, щоб мати доступ до оголошень функцій і використовувати їх у своєму коді без необхідності знати деталі реалізації.

Після цього в файлі йде визначення макросів для полегшення використання регістрів. Цей підхід схожий з тим, що використовується в бібліотеці CMSIS.

#### 4. Файл з реалізацією функцій src.c.

В цьому файлі міститься реалізація всіх функцій, що використовуються в ПЗ. Детальніше кожен функцію буде розглянуто в нижче.

|     |      |          |        |      |                     |      |
|-----|------|----------|--------|------|---------------------|------|
|     |      |          |        |      | ДК91.4 11711.001 ПЗ | Лист |
|     |      |          |        |      |                     | 77   |
| Зм. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                     |      |

## 5.2 Аналіз функцій

В цьому підрозділі буде проведено аналіз функцій. Лістинг коду наводиться не буде, його можна переглянути в відповідному додатку.

`void clock_conf(void)` – це функція для конфігурації ЧТ МК. Щоб розуміти про що йдеться наведу структуру тактування STM32F407VG (рис. 5.1).

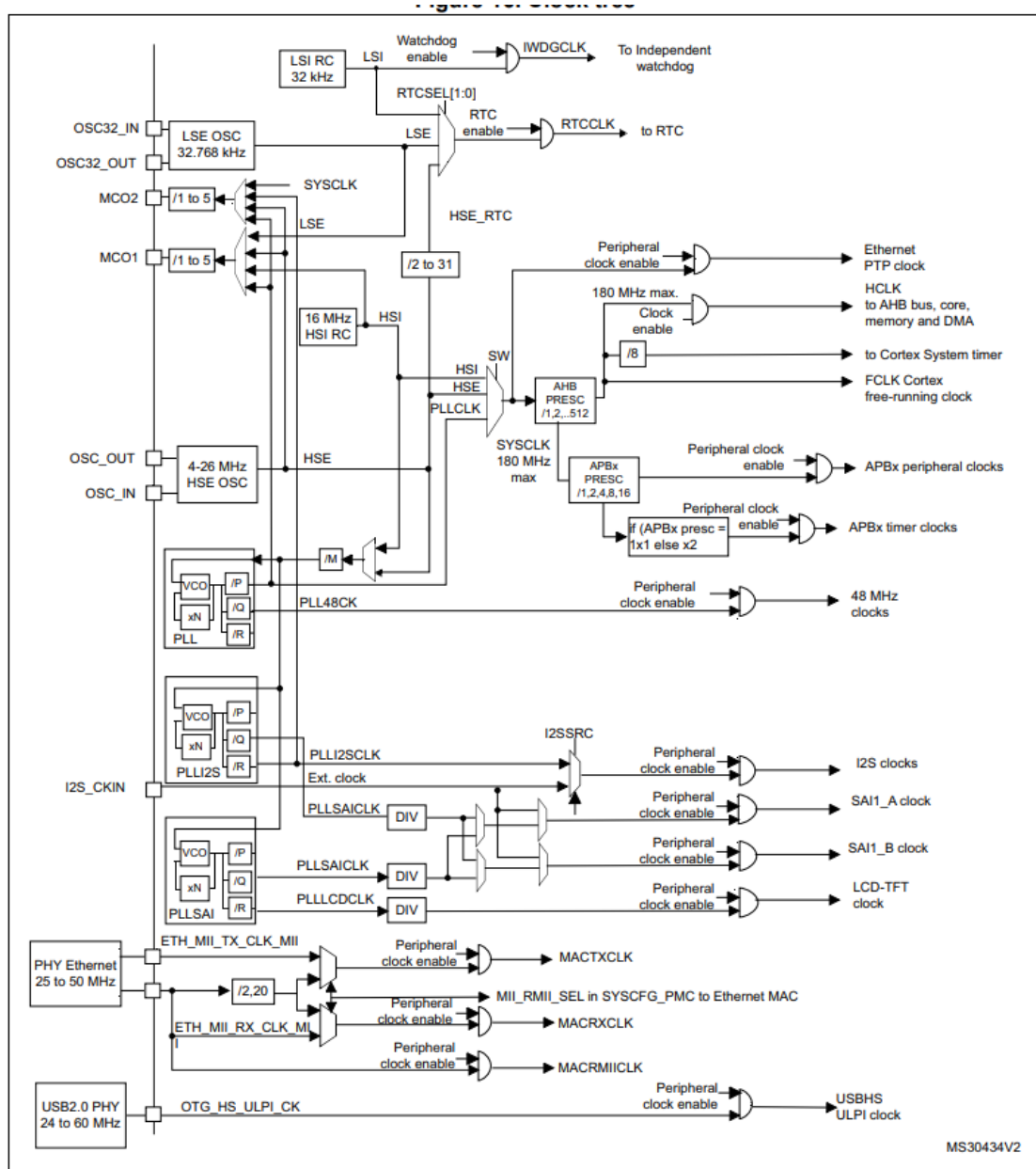


Рисунок 5.1 – Структура тактування STM32F407VG

На мультиплексор що керується сигналом SW буде поданий сигнал з HSI. Значення подільників ЧТ AHB\_PRESC та APBx\_PRESC виставленні в 1, тобто поділу не буде. Таким чином, ЧТ всієї ПМК буде складати 16 МГц. Знати ЧТ критично важливо для правильної передачі UART сигналу.

void init\_UART2(void) – це функція, що конфігурує АМ USART2 для передачі на частоті 9600, з пакетом корисної інформації в 8 біт, без біта парності, з одним стоп-бітом. Для розуміння структури цієї ПМК наведу його будову на рисунку 5.2.

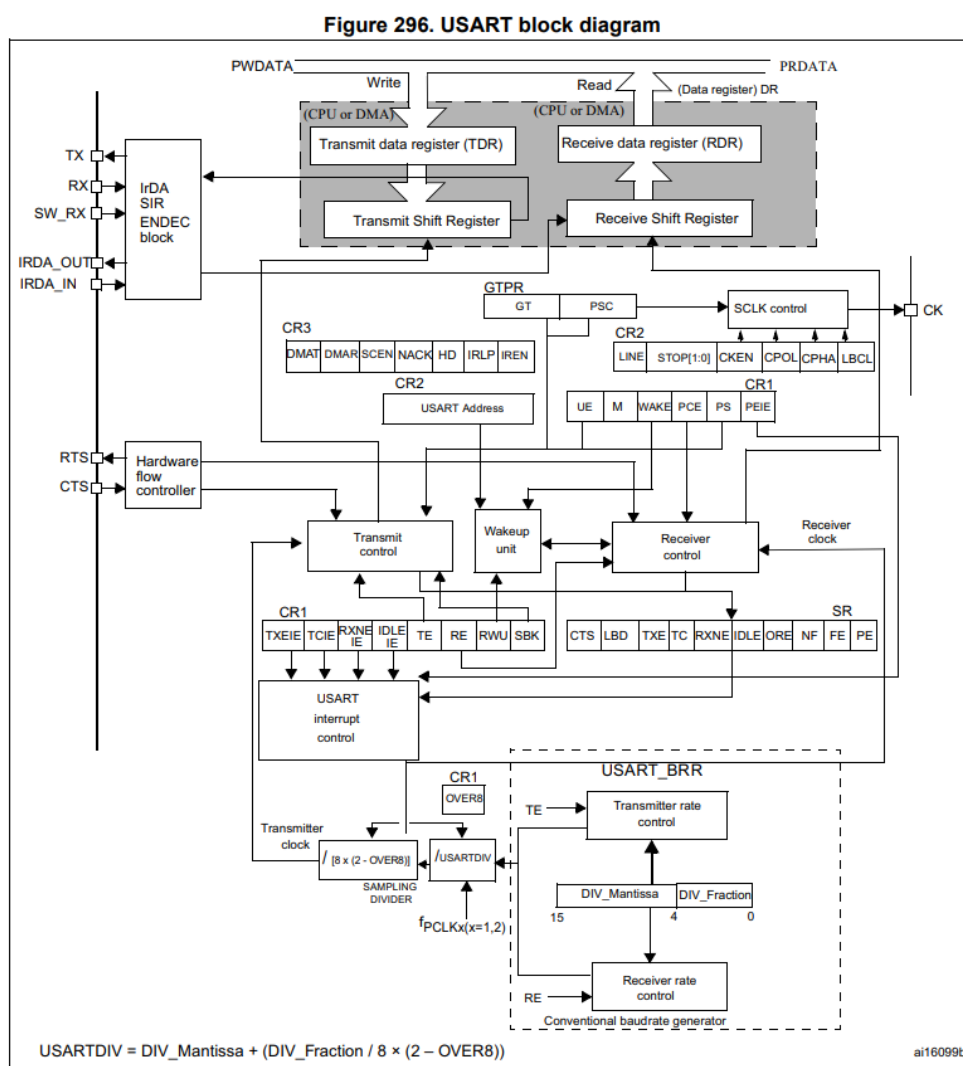


Рисунок 5.2 – Структура АМ USART2 МК STM32F407VG

Щоб налаштувати цей модуль так як було описано вище слід зробити наступні кроки:

- 1. Подати тактування на АМ GPIOA та USART2.
- 2. Зконфігурувати виходи PA2 та PA3, як TX та RX відповідно.  
Налаштувати для них модуль альтернативних функцій (рис. 5.3.).
- 3. Записати правильне значення в регістр USART\_BRR\_reg, який відповідає за швидкість роботи всього АМ. Записати правильне значення в регістр USART\_CR1\_reg який є одним з основних регістрів для контролю АМ GPIOA.

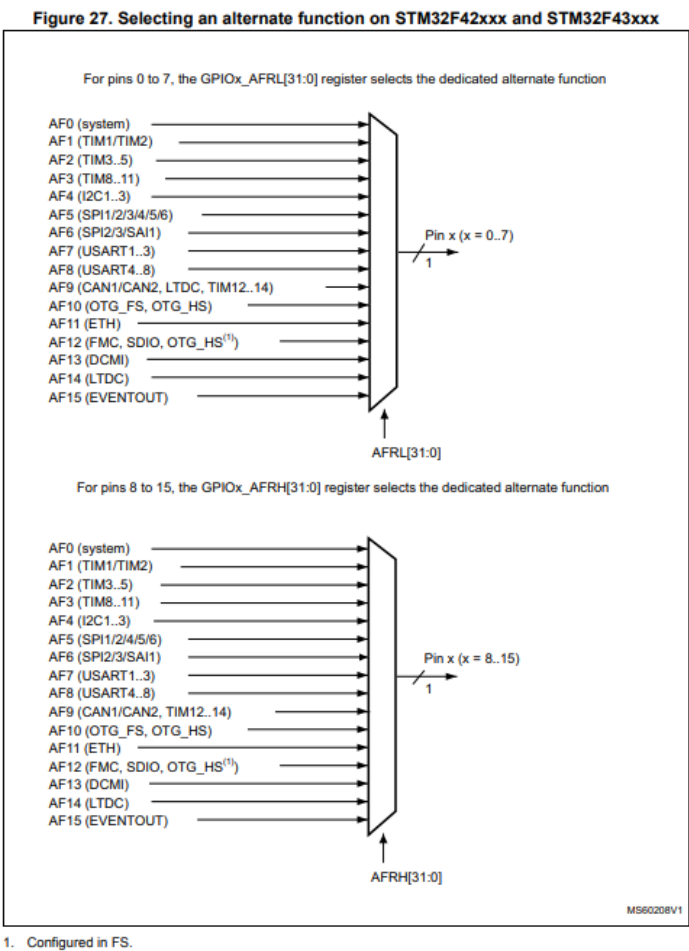


Рисунок 5.3 – Структура мепінгу альтернативних функцій МК STM32F407VG

`void UART_send_char(char ch)` – функція для передачі одного символу через UART. Використовує регістр `USART_DR_reg` (Рис. 5.2).

`void UART_send_string(char* message)` – функція для передачі рядка символів, використовує функцію `UART_send_char`.

`int power(int num, int s)` – функція для піднесення в степінь. Може виводити інформацію про помилки через UART за допомогою `UART_send_string`.

`int num_of_dec(int num)` – функція, що повертає кількість декад. Може виводити інформацію про помилки через UART за допомогою `UART_send_string`. Використовує `int power(int num, int s)`.

`int get_dec(int num, int dec)` – функція, що повертає цифру декади.

`void UART_send_int(int i)` – функція, що надсилає ціле число через UART як рядок символів. Може надсилати від’ємні числа. Може виводити інформацію про помилки через UART за допомогою `UART_send_string`. Використовує `int num_of_dec(int num)` та `void UART_send_char(char ch)`.

`void UART_send_adc(int num)` – функція, що надсилає значення з входів АЦП. Може надсилати в форматі напруги в вольтах чи в форматі умовних чисел, в залежності від того чи задіяний макрос `Volt`.



void delay(unsigned int i) – функція, що створює найпростішу затримку за рахунок простою ЦП МК.

void init\_DAC(void) – функція, що конфігурує АМ DAC. Містить наступні кроки:

1. Подача тактування на GPIOA та DAC.
2. Конфігурація виходів PA4 та PA5 GPIOA як out\_DAC\_1 та out\_DAC\_2.
3. Встановлення нульової напруги на виходах ЦАП.

void init\_ADC(void) – функція, що конфігурує АМ ADC. Для наочності наведу структуру цього АМ на рисунку 5.4. Складається з наступних кроків:

1. Попереднє очищення регістрів контролю ADC\_CR1 та ADC\_CR2.
2. Подача тактування на GPIOA, GPIOC та ADC1.
3. Налаштування відповідних виходів GPIOA, GPIOC на аналоговий режим роботи. Використано регістр MODER\_reg.
4. Налаштування виходів GPIOA, GPIOC як каналів АЦП. PA6 = CH6, PA6 = CH6, PC1 = CH11, PC2 = CH12.
5. Встановлення максимальної затримки читання для всіх задіяних каналів.
6. Налаштування впускної послідовності. Використовується ADC\_JSQR.
7. Налаштування режиму опитування за допомогою ADC\_CR2\_reg.
8. Остаточний запуск за допомогою ADC\_CR1\_reg.

Figure 44. Single ADC block diagram

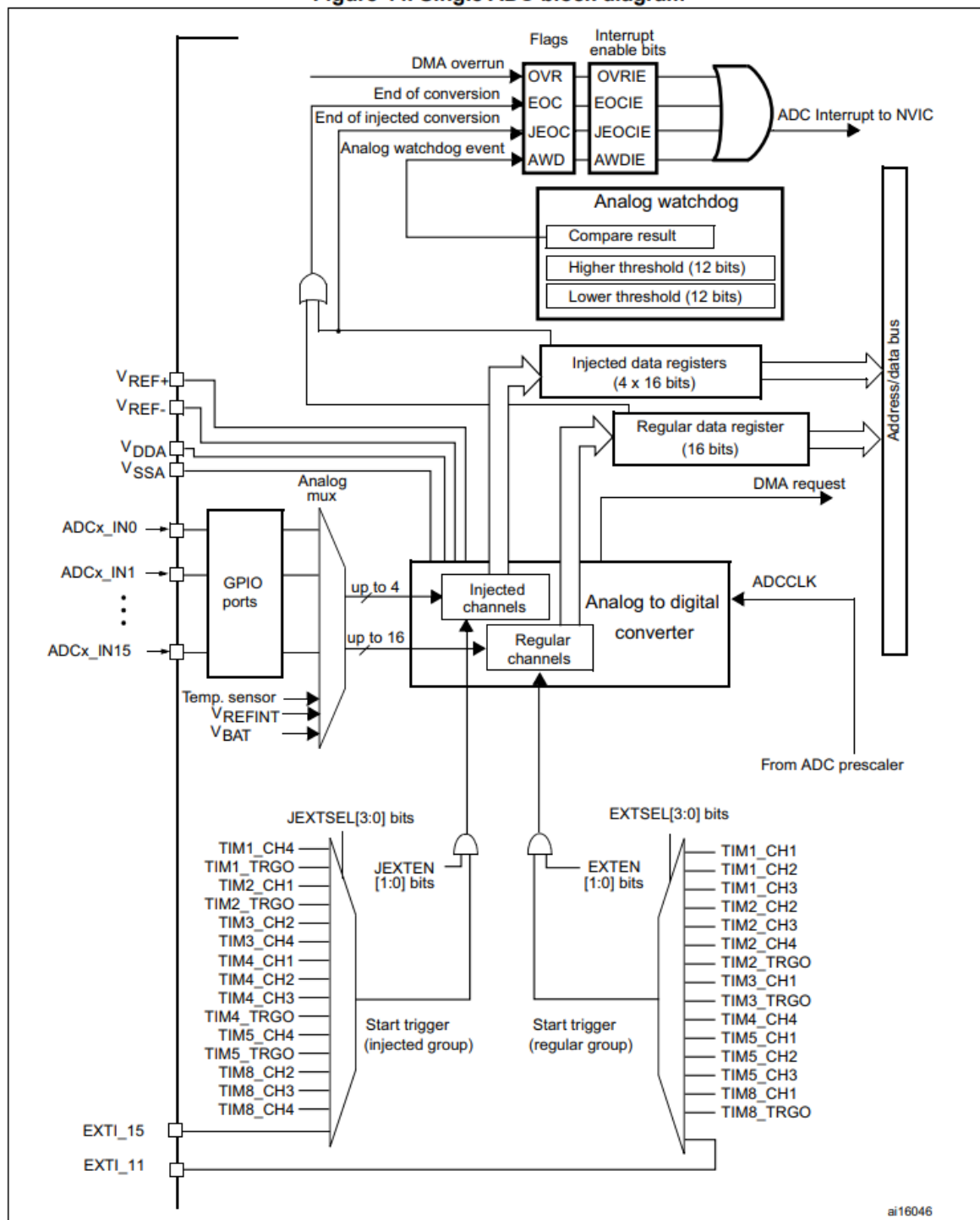


Рисунок 5.4 – Структура АМ ADC1 МК STM32F407VG

void ADC\_conv(void) – функція, що проводить зчитування сигналів АЦП та надсилає результат в визначеному форматі. Складається з наступних кроків:

1. JSWSTART за допомогою регістра ADC\_CR2\_reg.
2. Очікування кінця опитування каналів АЦП.
3. Передача результатів за допомогою UART\_send\_adc та UART\_send\_string.
4. Очищення біту готовності в ADC\_SR\_reg.

### Висновок до розділу 5

В цьому розділі було проведено аналіз ПЗ для МК. Було розглянуто файлову структуру, з якої стала зрозумілий загальний процес роботи, та було розкрито особливості кожної функції окремо. Зауважу, що код ПЗ відноситься не до процедурного чи об'єктного, а саме до функціонального стилю. Саме тому розкриття функцій є важливим для розуміння.

ПЗ працює, це перевірено емпіричним методом, відео роботи буде додано до файлі дипломного проєкту. Загалом етап розробки ПЗ вважаю вдалим.

|            |             |                 |               |             |                            |      |
|------------|-------------|-----------------|---------------|-------------|----------------------------|------|
|            |             |                 |               |             | <i>ДК91.4 11711.001 ПЗ</i> | Лист |
| <i>Зм.</i> | <i>Лист</i> | <i>№ докум.</i> | <i>Підпис</i> | <i>Дата</i> |                            | 84   |

## ВИСНОВКИ

Отже, при розробці пристрою, було проаналізовано ринок, наявні рішення та технології, сформульована задача, визначено з тим який пристрій потрібен, що він буде робити, для яких цілей, та хто буде ним користуватись. Було прийнято рішення робити пристрій макетного типу, який би давав змогу використовувати МК з його АМ та додаткову аналогову частину для вимірювання ВАХ БТ n-p-n типу. Детально ці міркування були описані в розділі «Аналіз існуючих рішень та формулювання технічного завдання».

Принцип роботи пристрою найкраще розкривається в розділі «Схемотехнічне проектування та розробка схеми електричної структурної», де також є і результати симуляції частини пристрою. Результати симуляції:

- Схеми повторювача і помножувача наруги на ОП працюють коректно і виконують задачі по збільшенню діапазонів напруг та струмів.
- Схеми для розширення діапазону вимірюваних напруг за допомогою АЦП справді дають змогу вимірювати всі можливі значення напруг в відповідних точках схеми, а стабілітрон забезпечує короткотривалий захист від неправильної конфігурації схеми.

Результати проектування друкованого вузла:

- Відповідне креслення ДК91.758724.001 ДП, що надається разом з цією пояснювальною запискою в рамках дипломного проекту.
- Обраний тип плати – двостороння друкована плата.
- Обраний тип матеріалу – FR4 (скловолокно просочене епоксидною смолою).
- Обраний клас точності – четвертий.

ДК91.4 11711.001 ПЗ

Лист

85

|     |      |          |        |      |
|-----|------|----------|--------|------|
|     |      |          |        |      |
| Зм. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |

- Обраний виготовлений – метод травлення.
- Обраний тип процесу при травленні – комбінований.
- Зазначу, що проєктування проводилось в СПАР АД.

Результати інженерних розрахунків:

- Середній час роботи приладу до першої відмови з урахуваннями лише раптових відмов склав 170 тисяч годин.
- Ймовірність безвідмовної роботи з урахуваннями лише раптових відмов протягом першого року склала 95%.
- Циліндрична жорсткість ДП склала близько 9 Н · м.
- Власна частота коливань ДП 1500 Гц.
- Найбільша паразитна індуктивність – це індуктивність між 2 провідниками, що знаходяться по одну сторону ДП (лінія живлення -20 В та вихід МК АЦП 6). Ця індуктивність склала 11 пГн.
- Найбільша паразитна ємність – це ємність між 2 провідниками, що знаходяться по одну сторону ДП (лінія живлення -20 В та вихід МК АЦП 6) склала 11 пФ.
- Потужність втрат на ДДП склала 550 пВт.

Результати розробки програмного забезпечення:

- Створено універсальну стандартну програму.
- Тип програмного забезпечення – функціональний.
- В відповідному розділі пояснювальної записки детально описана кожна функція. Це спростить для користувачів задачу створення ПЗ конкретно для своїх потреб.

|     |      |          |        |      |                    |      |
|-----|------|----------|--------|------|--------------------|------|
|     |      |          |        |      | ДК914.11711.001 ПЗ | Лист |
|     |      |          |        |      |                    | 86   |
| Зм. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                    |      |

Зазначу, що для ефективного використання приладу у користувача повинні бути знання з основ аналогової схемотехніки, а також досвід написання ПЗ для мікроконтролерів, або хоча б простих програм на мові програмування «С».

В цілому, вважаю, що результати дипломного проектування є задовільними. Пристрій відповідає очікуванням, всі класичні етапи були успішно пройдені включно зі створенням відповідної документації.

Дані результати можуть слугувати основою для подальшої розробки й вдосконалення приладу. Шляхи розробки розкривались в багатьох розділах, головний напрямок подальшої розробки – вдосконалення ДП з врахуванням результатів з розділу «4. Розрахунки, що підтверджують правильність прийнятих конструкторських рішень». Це першочергове питання, тому що критично впливає на надійність і працездатність пристрою.

Також слід додати можливість керування МК за допомогою UART, для цього варто розробити авторське ПЗ для ПК. Індикація роботи за допомогою світлодіодів чи дисплею, також була би хорошим доповненням.

Дипломне проектування вважаю успішно завершеним, а його результати задовільними.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ

1. Прилад ЛІ2- 54. [Електронний ресурс] – режим доступу до ресурсу:  
[https://cels.com.ua/ru/production/izmeriteli\\_ppp/12-54.html](https://cels.com.ua/ru/production/izmeriteli_ppp/12-54.html)
2. Прилад АСС-4211. [Електронний ресурс] – режим доступу до ресурсу:  
<http://www.eliks.ru/product/vi/acc4211.htm>
3. Компанія Prolific. [Електронний ресурс] – режим доступу до ресурсу:  
<https://www.prolific.co>
4. Драйвер Prolific USB-to-Serial Comm Port версія 3.4.25.218. [Електронний ресурс] – режим доступу до ресурсу: <http://smartandyoung.com.ua/drajver-prolific-usb-to-serial-comm-port-dlja>
5. Tera Term Open Source Project. [Електронний ресурс] – режим доступу до ресурсу: <http://ttssh2.osdn.jp/index.html.en>
6. LTspice Information Center | Analog Devices. [Електронний ресурс] – режим доступу до ресурсу: <https://www.analog.com/en/design-center/design-tools-and-calculators/ltspice-simulator.html>
7. STM32F4DISCOVERY – STMicroelectronics #documentation. [Електронний ресурс] – режим доступу до ресурсу: <https://www.st.com/en/evaluation-tools/stm32f4discovery.html#documentation>
8. STM32F4DISCOVERY – STMicroelectronic. [Електронний ресурс] – режим доступу до ресурсу: <https://www.st.com/en/evaluation-tools/stm32f4discovery.html>
9. Current–voltage characteristic - Wikipedia. [Електронний ресурс] – режим доступу до ресурсу:  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Current%E2%80%93voltage\\_characteristic](https://en.wikipedia.org/wiki/Current%E2%80%93voltage_characteristic)
10. Early effect – Wikipedia. [Електронний ресурс] – режим доступу до ресурсу:  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Early\\_effect](https://en.wikipedia.org/wiki/Early_effect)
11. Bipolar junction transistor - Wikipedia. [Електронний ресурс] – режим доступу до ресурсу: [https://en.wikipedia.org/wiki/Bipolar\\_junction\\_transistor](https://en.wikipedia.org/wiki/Bipolar_junction_transistor)

12. PCB Design Software & Tools | Altium. [Електронний ресурс] – режим доступу до ресурсу: <https://www.altium.com/>
13. Autodesk AutoCAD 2024 | Get Prices & Subscribe To AutoCAD Software. [Електронний ресурс] – режим доступу до ресурсу: <https://www.autodesk.com/products/autocad/overview?term=1-YEAR&tab=subscription>
14. ChatGPT. [Електронний ресурс] – режим доступу до ресурсу: <https://chat.openai.com/>
15. EEVblog – No Script, No Fear, All Opinion. [Електронний ресурс] – режим доступу до ресурсу: <https://www.eevblog.com/>

|     |      |          |        |      |                     |      |
|-----|------|----------|--------|------|---------------------|------|
|     |      |          |        |      | ДК91.4 11711.001 ПЗ | Лист |
| Зм. | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                     | 89   |



# ДОДАТОК А – Технічне завдання на проектування

## Технічне завдання на проектування

### 1. Найменування та галузь використання

Вимірювач вольт-амперних характеристик біполярних транзисторів малої та середньої потужності (далі: трансивер) призначається для вимірювання характеристик біполярних n-p-n транзисторів та передачі результатів на інші пристрої.

### 2. Підстава для розробки

Підставою для розробки є завдання на дипломний проект.

### 3. Мета і призначення розробки

Метою даної роботи є проектування пристрою на основі мікроконтролера, що вимірює вольт-амперні характеристики біполярних n-p-n транзисторів та надсилає результати на інші пристрої через UART інтерфейс.

### 4. Джерело розробки

Дана розробка є повністю авторською, тому ніяких джерел розробки використано не було.

### 5. Технічні вимоги

#### 5.1. Склад виробу й вимоги до пристрою, що розробляється

Пристрій являє собою моноблочну конструкцію, з найпростішими роз'ємами для підключення живлення, підключення компоненту, що тестується, для конфігурування та налаштування схеми. Живлення пристрою

складається з 20В, 3,3В, «Земля», -20В відхилення для кожної лінії повинно складати не більше 5%. .

## 5.2. Показники призначення

Пристрій повинен забезпечувати:

- Можливість тестувати біполярні p-p-n транзистори малої;
- Можливість передати виміри на сторонній пристрій;
- Можливість змінювати програмне забезпечення, для побудови користувацьких характеристик;

## 5.3. Вимоги до надійності

Середній час напрацювання на відмову повинен бути не менше 10000 год.

## 5.4. Вимоги до технологічності

Орієнтовані на передові прийоми виготовлення деталей і складання.

## 5.5. Вимоги до рівня уніфікації й стандартизації

Для виготовлення пристрою передбачається максимальне застосування стандартних, уніфікованих деталей та виробів.

## 5.6. Вимоги безпеки обслуговування

Керуватися загальними вимогами безпеки до апаратури класу II за ГОСТ 12.2.007-75.

#### 5.7. Вимоги до складових частин виробу, сировини, вихідних та експлуатаційних матеріалів

Для виробництва пристрою використовують матеріали імпортного та вітчизняного виробництва.

#### 5.8. Умови експлуатації

Прилад призначений для застосування в опалювальних будівлях.  
Кліматичне виконання УХЛ 4.2 по ГОСТ 15150-69.

#### 5.9. Вимоги до транспортування і зберігання

Умови зберігання за ГОСТ 15150-69. Зберігати в зачинених, опалювальних та вентильованих приміщеннях, в яких забезпечуються наступні умови: температура повітря  $+18...+30^{\circ}\text{C}$ , відносна вологість повітря 65% при  $20^{\circ}\text{C}$  (середньорічне значення), атмосферний тиск  $84...106\text{ кПа}$ .  
Транспортувати автомобільним, залізничним або авіаційним видами транспорту в спеціальній транспортній тарі.

#### 5.10. Додаткові технічні вимоги

|  |                    |
|--|--------------------|
| Швидкість передачі по замовчуванні через UART, біт/с | 9600               |
| Максимальний струм для колектора, мА                 | 250                |
| Габаритні розміри, мм                                | не більше 70x60x20 |
| Маса, г  | не більше 300      |

## 6. Результати роботи

6.1. Результати даної роботи можуть бути використані як вихідна документація по створенню прототипу пристрою, його налагодження й подальшого впровадження в серійне виробництво.

6.2. Дана робота (звітна документація) після виконання надається на кафедру КЕОА для подальшого захисту й зберігання як навчальної документації.

## 7. Робота повинна містити в собі документи

- Пояснювальну записку (формату А4)
- Схему електричну структурну (формату А1)
- Схему електричну принципову та перелік елементів (формату А1, А4 відповідно)
- Складальне креслення та специфікацію (формату А0, А4 відповідно)
- Креслення друкованої плати (формату А1)
- Додатки (формату А4)

## 8. Порядок розгляду й приймання роботи

Порядок розгляду й приймання роботи на загальних умовах, прийнятих на кафедрі КЕОА. Рецензування й прийняття роботи комісією на загальних умовах.

## 9. Економічні показники

Собівартість виготовлення пристрою на етапі початку серійного виробництва має складати до 100 доларів США.

## 10. Етапи розробки

| №  | Назва етапів виконання дипломного проекту | Термін виконання етапів проекту | Примітка |
|----|---|---------------------------------|----------|
| 1  | Аналіз технічного завдання                | 03.04.23-04.04.23               | Виконано |
| 2  | Вибір елементної бази для проекту         | 05.04.23-07.04.23               | Виконано |
| 3  | Схемотехнічне проектування                | 08.04.23-11.04.23               | Виконано |
| 4  | Виконання схеми електричної принципової   | 12.04.23-17.04.23               | Виконано |
| 5  | Проектування друкованого вузла            | 18.04.23-21.04.23               | Виконано |
| 6  | Конструкторсько-технологічні розрахунки   | 22.04.23-28.04.23               | Виконано |
| 7  | Розрахунки надійності друкованої плати    | 02.05.23-04.05.23               | Виконано |
| 8  | Проектування програмного забезпечення     | 05.05.23-21.05.23               | Виконано |
| 9  | Виконання супроводжуючих креслень         | 21.05.23-28.05.23               | Виконано |
| 10 | Оформлення пояснювальної записки          | 28.05.23-9.06.2023              | Виконано |

## ДОДАТОК Б – Програмне забезпечення мікроконтролера

Файл start\_up.s:

```
; Initialize Stack Size
; Equ 400 hex (1024) bytes
Stack_Size    EQU    0x00000400
; Area STACK (NOINIT and READ/WRITE)
                AREA    STACK, NOINIT, READWRITE, ALIGN=3
; Initialize memory equals Stack_Size
Stack_Mem     SPACE    Stack_Size
__initial_sp

; Vector Table Mapped to Address 0 at Reset
                AREA    RESET, DATA, READONLY
                EXPORT  __Vectors
                EXPORT  Reset_Handler    [WEAK]
__Vectors
                DCD     __initial_sp      ; Top of Stack
                DCD     Reset_Handler     ; Reset Handler
__Vectors_End
                AREA    |.text|, CODE, READONLY

Reset_Handler  PROC
                EXPORT  Reset_Handler    [WEAK]
                IMPORT  main

                LDR     R0, = main
                BX      R0
                ENDP
```

Файл main.c:

```
#include "inc.h"
```

```
int main(void)
```

```
{
    clock_conf();
```

```

init_UART2();
init_DAC();
init_ADC();

UART_send_string("\n\nSTART:\n\r(V1:V2) U1|U2|U3|U4\n\r");

for(unsigned int i = 0; i < 4095; i += 100)
{
    *(unsigned int*)(DAC_base + DAC_DHR12R2_reg) = i;
    for(unsigned int j = 0; j < 4095; j += 100)
    {
        *(unsigned int*)(DAC_base + DAC_DHR12R1_reg) = j;

        UART_send_string("(");
        UART_send_adc(*(int*)(DAC_base + DAC_DHR12R2_reg));
        UART_send_string(":");
        UART_send_adc(*(int*)(DAC_base + DAC_DHR12R1_reg));
        UART_send_string(" ");

        ADC_conv();
    }
}

UART_send_string("STOP\n\r");

while(1);
}
Файл src.c:
#include "inc.h"

// *** ** CLOCK functions *** ** ** -----
void clock_conf(void)
{
    *(unsigned int*)(RCC_base + RCC_CFGR_reg) &= ~(3U << 0);

```

```

*(unsigned int*)(RCC_base + RCC_CFGR_reg) &= ~(7U << 12);
*(unsigned int*)(RCC_base + RCC_CFGR_reg) &= ~(15U << 7);
}

// *** ** UART functions *** ** -----
void init_UART2(void)
{
    *(unsigned int*)(RCC_base + APB1ENR_reg) |= 1 << 17; // USART2 clock
    *(unsigned int*)(RCC_base + AHB1ENR_reg) |= 1 << 0; // GPIOA clock

    // PA2 TX config
    *(unsigned int*)(GPIOA_base + MODER_reg) |= (1U << ((2 * 2) + 1));
    *(unsigned int*)(GPIOA_base + MODER_reg) &= ~(1U << (2 * 2));
    *(unsigned int*)(GPIOA_base + OSPEEDR_reg) |= (1U << ((5 * 5) + 1));
    *(unsigned int*)(GPIOA_base + OSPEEDR_reg) &= ~(1U << (5 * 5));
    *(unsigned int*)(GPIOA_base + AFRL_reg) |= 7 << (4 * 2);

    // PA3 RX config
    *(unsigned int*)(GPIOA_base + MODER_reg) |= (1U << ((3 * 2) + 1));
    *(unsigned int*)(GPIOA_base + MODER_reg) &= ~(1U << (3 * 2));
    *(unsigned int*)(GPIOA_base + OSPEEDR_reg) |= (1U << ((3 * 2) + 1));
    *(unsigned int*)(GPIOA_base + OSPEEDR_reg) &= ~(1U << (3 * 2));
    *(unsigned int*)(GPIOA_base + AFRL_reg) |= 7 << (4 * 3);

    // USART1 config
    *(unsigned int*)(USART2_base + USART_BRR_reg) = (0x68 << 4) + 0x2;
    *(unsigned int*)(USART2_base + USART_CR1_reg) |= 1 << 3; // Увімкнення передавача
    *(unsigned int*)(USART2_base + USART_CR1_reg) &= ~(1U << 10); // Parity disabled
    *(unsigned int*)(USART2_base + USART_CR1_reg) |= 1 << 13; // Увімкнення UART
    *(unsigned int*)(USART2_base + USART_CR1_reg) &= ~(1U << 15); // OVER8 disabled
}

void UART_send_adc(int num)
{

```



```

        #ifdef Volt
            int buf = (num * Vref_mV / 4095) / 1000;
            UART_send_int(buf);
            UART_send_string(".");
            buf = (num * Vref_mV / 4095) - (buf * 1000);
            UART_send_int(buf);
            return;
        #endif
        UART_send_int(num);
    }

void UART_send_char(char ch)
{
    while (!(*((unsigned int*)(USART2_base + USART_SR_reg) & (1 << 7)))); // Очікування, доки передавач не буде
    ГОТОВИМ
    *((unsigned int*)(USART2_base + USART_DR_reg) = ch; // Відправка символу
}

void UART_send_string(char* message)
{
    for(unsigned int i = 0; message[i] != '\0'; i++)
    {
        UART_send_char(message[i]);
    }
}

void UART_send_int(int i)
{
    if(i < 0)
    {
        UART_send_char('-');
        i = -i;
    }
    int length = num_of_dec(i); // num of dec
    for(int j = length; j > 0; j--)

```

```

    {
        UART_send_char(48 + (char)get_dec(i, j));
    }
    //UART_send_string("\n\r");
}

```

```
int get_dec(int num, int dec)
```

```

{
    return (num % power(10, dec) - num % power(10, dec - 1)) / power(10, dec - 1);
}

```

```
int num_of_dec(int num)
```

```

{
    if(num < 0) num = -num;
    for(int i = 1; i < 9; i++)
    {
        if(power(10, i) > num) return i;
    }
    UART_send_string("Error num_of_dec\n\r");
    return NULL;
}

```

```
int power(int num, int s)
```

```

{
    if(s < 0 || s > 10 || num < 0)
    {
        UART_send_string("Error pow\n\r");
        return NULL;
    }
    int ans = 1;
    for(int i = 0; i < s; i++)
    {
        ans *= num;
    }
    return ans;
}

```

```
}
```

```
// *** ** GPIO functions *** ** -----
```

```
void init_GPIOA_out(int bit)
```

```
{
```

```
    if(bit > 15 || bit < 0)
```

```
    {
```

```
        UART_send_string("Error init_GPIOA_in\n\r");
```

```
        return;
```

```
    }
```

```
    *(unsigned int*)(RCC_base + AHB1ENR_reg) |= (1 << 3);
```

```
    *(unsigned int*)(GPIOA_base + MODER_reg) |= (1U << (bit * 2));
```

```
    *(unsigned int*)(GPIOA_base + MODER_reg) &= ~(1U << ((bit * 2) + 1));
```

```
    *(unsigned int*)(GPIOA_base + BSRR_reg) |= (1 << bit);
```

```
}
```

```
void init_GPIOD_out(int bit)
```

```
{
```

```
    if(bit > 15 || bit < 0)
```

```
    {
```

```
        UART_send_string("Error init_GPIOA_in\n\r");
```

```
        return;
```

```
    }
```

```
    *(unsigned int*)(RCC_base + AHB1ENR_reg) |= (1 << 3);
```

```
    *(unsigned int*)(GPIOD_base + MODER_reg) |= (1U << (bit * 2));
```

```
    *(unsigned int*)(GPIOD_base + MODER_reg) &= ~(1U << ((bit * 2) + 1));
```

```
    *(unsigned int*)(GPIOD_base + BSRR_reg) |= (1 << bit);
```

```
}
```

```
void switch_GPIOD_out(int bit)
```

```
{
```

```
    if(bit > 15 || bit < 0)
```

```

    {
        UART_send_string("Error init_GPIOA_in\n\r");
        return;
    }
    if(*(unsigned int*)(GPIOD_base + IDR_reg) & (1 << bit))
        *(unsigned int*)(GPIOD_base + BSRR_reg) = (1 << (bit + 16));
    else
        *(unsigned int*)(GPIOD_base + BSRR_reg) = (1 << bit);
}

void init_GPIOA_in(int bit)
{
    if(bit > 15 || bit < 0)
    {
        UART_send_string("Error init_GPIOA_in\n\r");
        return;
    }
    *(unsigned int*)(RCC_base + AHB1ENR_reg) |= (1 << 3);
    *(unsigned int*)(GPIOA_base + MODER_reg) &= ~(1U << (bit * 2));
    *(unsigned int*)(GPIOA_base + MODER_reg) &= ~(1U << ((bit * 2) + 1));
}

```

// \*\*\* \*\*\* Delay functions \*\*\* \*\*\* \*\*\* -----

```

void delay(unsigned int i)
{
    for(volatile unsigned int time = 0; time <= i; time++);
}

```

// \*\*\* \*\*\* DAC functions \*\*\* \*\*\* \*\*\* -----

```

void init_DAC(void)
{
    *(unsigned int*)(RCC_base + AHB1ENR_reg) |= 1;
    GPIOA
    // clock

```

```

*(unsigned int*)(GPIOA_base + MODER_reg) |= (3U << (4 * 2));    // PA4 - analog mode
*(unsigned int*)(GPIOA_base + MODER_reg) |= (3U << (5 * 2));    // PA5 - analog mode

*(unsigned int*)(RCC_base + APB1ENR_reg) |= 1 << 29;    // clock DAC

*(unsigned int*)(DAC_base + DAC_CR_reg) |= (1U << 0);    // enable chanel 1
*(unsigned int*)(DAC_base + DAC_CR_reg) |= (1U << 16);    // enable chanel 2

*(unsigned int*)(DAC_base + DAC_DHR12R1_reg) = (unsigned int)(4095 * 0 / Vref_V);    // PA4
*(unsigned int*)(DAC_base + DAC_DHR12R2_reg) = (unsigned int)(4096 * 0 / Vref_V);    // PA5
}

void init_ADC(void)
{
    // clear CR
    *(unsigned int*)(ADC1_base + ADC_CR1_reg) = 0;
    *(unsigned int*)(ADC1_base + ADC_CR2_reg) = 0;

    // clock
    /*(unsigned int*)(RCC_base + AHB1ENR_reg) |= 1 << 0; // PA
    *(unsigned int*)(RCC_base + AHB1ENR_reg) |= 1 << 2; // PC
    *(unsigned int*)(RCC_base + APB2ENR_reg) |= 1 << 8; // ADC1

    // gpio analog mode
    *(unsigned int*)(GPIOA_base + MODER_reg) |= (3U << (6 * 2)); //pa6 = ch6
    *(unsigned int*)(GPIOA_base + MODER_reg) |= (3U << (7 * 2)); //pa7 = ch7
    *(unsigned int*)(GPIOC_base + MODER_reg) |= (3U << (1 * 2)); //pc1 = ch11
    *(unsigned int*)(GPIOC_base + MODER_reg) |= (3U << (2 * 2)); //pc2 = ch12

    // sample for ch 11 is max(480)
    *(unsigned int*)(ADC1_base + ADC_SMPR1_reg) = 7 << (3 * 1);
    *(unsigned int*)(ADC1_base + ADC_SMPR1_reg) = 7 << (3 * 2);
    *(unsigned int*)(ADC1_base + ADC_SMPR2_reg) = 7 << (3 * 6);
    *(unsigned int*)(ADC1_base + ADC_SMPR2_reg) = 7 << (3 * 7);

    // injected sequence conf ch11 only

```

```

*(unsigned int*)(ADC1_base + ADC_JSQR_reg) = 0;
*(unsigned int*)(ADC1_base + ADC_JSQR_reg) |= 3 << 20;
*(unsigned int*)(ADC1_base + ADC_JSQR_reg) |= 12 << 15;
*(unsigned int*)(ADC1_base + ADC_JSQR_reg) |= 11 << 10;
*(unsigned int*)(ADC1_base + ADC_JSQR_reg) |= 7 << 5;
*(unsigned int*)(ADC1_base + ADC_JSQR_reg) |= 6 << 0;

// JEXTEN
*(unsigned int*)(ADC1_base + ADC_CR2_reg) |= 1 << 20;
*(unsigned int*)(ADC1_base + ADC_CR2_reg) &= ~(1U << 21);

// JEXTSEL
*(unsigned int*)(ADC1_base + ADC_CR2_reg) = 15 << 16;

// CONT
*(unsigned int*)(ADC1_base + ADC_CR2_reg) &= ~(1U << 1);

// SCAN
*(unsigned int*)(ADC1_base + ADC_CR1_reg) |= (1U << 8);

// ADON
*(unsigned int*)(ADC1_base + ADC_CR2_reg) |= 1 << 0;
}

void ADC_conv(void)
{
    // JSWSTART
    *(unsigned int*)(ADC1_base + ADC_CR2_reg) |= 1 << 22;

    // wait EOC
    while(!(*(unsigned int*)(ADC1_base + ADC_SR_reg) & (1 << 2)));

    UART_send_adc(*(int*)(ADC1_base + ADC_JDR1_reg));
    UART_send_string("|");
    UART_send_adc(*(int*)(ADC1_base + ADC_JDR2_reg));

```

```

    UART_send_string("|");
    UART_send_adc(*(int*)(ADC1_base + ADC_JDR3_reg));
    UART_send_string("|");
    UART_send_adc(*(int*)(ADC1_base + ADC_JDR4_reg));
    UART_send_string("\n\r");

    *(unsigned int*)(ADC1_base + ADC_SR_reg) &= ~(1U << 2);
}

```

Файл inc.h:

```
#include <stdio.h>
```

```
#include <stdlib.h>
```

```
#define Vref_V 2.935
```

```
#define Vref_mV 2935
```

```
#define Volt
```

```
// *** ** Functions List *** **
```

```
// *** ** CLOCK functions *** **
```

```
void clock_conf(void);
```

```
// *** ** UART functions *** **
```

```
void init_UART2(void);
```

```
void UART_send_char(char ch);
```

```
void UART_send_string(char* s);
```

```
void UART_send_int(int i);
```

```
// *** ** LED functions *** **
```

```
void init_GPIOA_out(int bit);
```

```
void init_GPIOD_out(int bit);
```

```
void switch_GPIOD_out(int bit);
```

```
void init_GPIOA_in(int bit);
```

```
// *** *** *** Delay functions *** *** ***
```

```
void delay(unsigned int i);
```

```
int num_of_dec(int num);
```

```
int power(int num, int s);
```

```
int get_dec(int num, int dec);
```

```
int float_to_int(float f);
```

```
void UART_send_adc(int num);
```

```
// *** *** *** DAC functions *** *** ***
```

```
void init_DAC(void);
```

```
// *** *** *** ADC functions *** *** ***
```

```
void init_ADC(void);
```

```
void ADC_conv(void);
```

```
// *** *** *** *** *** *** *** *** *** Registers List *** *** *** *** *** *** ***
```

```
// *** *** *** RCC
```

```
#define RCC_base 0x40023800
```

```
#define RCC_CFGR_reg 0x08
```

```
#define AHB1ENR_reg 0x30
```

```
#define APB1ENR_reg 0x40
```

```
#define APB2ENR_reg 0x44
```

```
// *** *** *** GPIO
```

```
#define GPIOA_base 0x40020000
```



```
#define GPIOB_base 0x40020400
#define GPIOC_base 0x40020800
#define GPIOD_base 0x40020C00
#define MODER_reg 0x00
#define OSPEEDR_reg 0x08
#define IDR_reg 0x10
#define ODR_reg 0x14
#define BSRR_reg 0x18
#define AFRL_reg 0x20
#define AFRH_reg 0x24
```

```
// *** *** *** DAC
```

```
#define DAC_base 0x40007400
#define DAC_CR_reg 0x00
#define DAC_DHR12R1_reg 0x08
#define DAC_DHR12R2_reg 0x14
```

```
// *** *** *** USART2
```

```
#define USART2_base 0x40004400
#define USART_SR_reg 0x00
#define USART_DR_reg 0x04
#define USART_BRR_reg 0x08
#define USART_CR1_reg 0x0C
```

```
// *** *** *** ADC
```

```
#define ADC1_base 0x40012000
#define ADC_SR_reg 0x00
#define ADC_CR1_reg 0x04
#define ADC_CR2_reg 0x08
#define ADC_SMPR1_reg 0x0C
#define ADC_SMPR2_reg 0x10
```

```
#define ADC_SQR1_reg 0x2C
```

```
#define ADC_SQR2_reg 0x30
```

```
#define ADC_SQR3_reg 0x34
```

```
#define ADC_JSQR_reg 0x38
```

```
#define ADC_JDR1_reg 0x3C
```

```
#define ADC_JDR2_reg 0x40
```

```
#define ADC_JDR3_reg 0x44
```

```
#define ADC_JDR4_reg 0x48
```

```
#define ADC_DR_reg 0x4C
```