

**КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА**

**ФАКУЛЬТЕТ РАДІОФІЗИКИ, ЕЛЕКТРОНІКИ ТА КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ**

Кафедра радіотехніки та радіоелектронних систем

«На правах рукопису»

Робота допущена до захисту в ЕК  
рішенням кафедри радіотехніки та радіоелектронних систем  
від \_\_\_\_\_ 2024 року, протокол № \_\_\_\_\_.  
Завідувач кафедри доктор фіз.-мат. наук, професор  
\_\_\_\_\_ Ігор АНІСІМОВ

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА БАКАЛАВРА**

на тему:

**« СИСТЕМА КОНТРОЛЮ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЇ УСТАНОВКИ З  
ДОСЛІДЖЕННЯ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНОЇ ПЛАЗМИ »**

**Виконав:**

студент 4-го курсу  
денної форми навчання  
спеціальності 172 - Телекомунікації та радіотехніка  
ОПП «Інформаційна безпека телекомунікаційних систем і мереж»  
Гуменюк Олександр Ярославович \_\_\_\_\_

**Науковий керівник:**

канд. фіз.-мат. наук, асистент  
Фесенко Сергій Олександрович \_\_\_\_\_

**Рецензент:**

канд. фіз.-мат. наук, доцент  
Загороднюк Сергій Петрович \_\_\_\_\_

Засвідчую, що у цій бакалаврській роботі  
немає запозичень з праць інших авторів без  
відповідних посилань

Студент \_\_\_\_\_ Олександр ГУМЕНЮК

Київ 2024

## РЕФЕРАТ

Дипломна робота: 30 с., 17 рис., 1 дод. (2с.), 10 джерел.

НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНА ПЛАЗМА, STM32, СИСТЕМА КОНТРОЛЮ, ФУР'Є ПЕРЕТВОРЕННЯ.

Об'єкт розроблення – система контролю експериментальної установки з дослідження низькотемпературної плазми.

Мета роботи – розробка системи контролю експериментальної установки з дослідження низькотемпературної плазми.

Розроблено систему контролю експериментальної установки з дослідження низькотемпературної плазми, яка дозволяє вимірювати вольт-амперні параметри розряду, напруженість електричного поля позитивного стовпа та може керувати електроклапаном подачі газу. Для комунікації з іншими системами керування передбачено шину RS-485.

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	5
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ВИКОРИСТАНОЇ В РОБОТІ КОМПОНЕНТНОЇ БАЗИ ТА ОСОБЛИВОСТІ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЇ УСТАНОВКИ .....	7
1.1 Мікроконтролер STM32F103C8T6 .....	7
1.2 Перетворювач інтерфейсу USB-B – RS485 TTL.....	10
1.3 Модель джерела розривної дуги .....	12
1.4 Особливості електродугового розряду .....	14
РОЗДІЛ 2. ЦИФРОВЕ ОБРОБЛЕННЯ СИГНАЛІВ НА КОНТРОЛЕРІ STM32F103C8T6 .....	17
2.1 Основні методи обробки сигналу .....	17
2.2 Дискретне перетворення Фур'є (DFT) та швидке перетворення Фур'є (FFT) .....	18
РОЗДІЛ 3. СИСТЕМА КОНТРОЛЮ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЮ УСТАНОВКОЮ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОДУГОВОЇ ПЛАЗМИ .....	20
3.1 Опис схеми системи контролю .....	20
3.2 Конфігурація інтерфейсів STM32F103C8T6 .....	24
3.3 Опис роботи програми в середовищі .....	26
ВИСНОВКИ .....	27
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ .....	28
ДОДАТОК А .....	29

## **ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ**

АЧХ – амплітудно-частотна характеристика;

ФЧХ – фазо-частотна характеристика;

FFT – fast fourier transform ;

DFT – discrete fourier transform ;

FIR – finite impulse response;

IIR – infinite impulse response;

ADC – analog-to-digital converter;

GPIO – general purpose input/output;

## ВСТУП

В сучасну епоху технологічного розвитку дослідження низькотемпературної плазми набуває неабиякого значення завдяки дуже широкому застосуванню в різних галузях науки. Дослідження цього аспекту використовується в багатьох сферах, таких як екологія, медицина, космічні дослідження, а також промислові процеси. Для ефективного дослідження в цьому напрямі необхідний точний контроль певних параметрів спеціальних експериментальних установок, що зможе забезпечити стабільність і можливість повторення експериментів з мінімальними розходженнями в результатах для досягнення високої точності результатів. Основна інновація полягає в використанні мікроконтролерів STM32, що зможе забезпечити достатню функціональність і компактність.

Низькотемпературна плазма має широке застосування в таких галузях як зварка, плавка металів, освітлення, медичні застосування, космічна галузь. Використання сучасних мікроконтролерів дозволить створити високоефективні та надійні системи контролю, що зможуть підтримувати якісний рівень автоматизації процесів. Широкий набір периферії дозволить реалізувати складні алгоритми для цифрової обробки сигналів, такі як фільтрація та спектральний аналіз.

Завданням цієї дипломної роботи є розробка системи контролю експериментальної установки з дослідження низькотемпературної плазми на мікроконтролері STM32. В цій роботі описується компонентна база електроніки для раніше зазначеного приладу, а саме мікроконтролер STM32F103C8T6, перетворювач інтерфейсу USB-B – RS485 TTL FT232RL, їх загальні характеристики та особливості роботи з ними. Також буде описана модель джерела розривної дуги. Буде зазначене та описане цифрове оброблення сигналів на контролері STM32F103C8T6, а саме базові методи обробки сигналу на ранішезазначеному мікроконтролері, такі як аналогово-цифрове перетворення (ADC), фільтри низької та високої частоти, смугові фільтри, швидке перетворення Фур'є (FFT). Також буде зазначено написання програми для приладу, а саме загальний алгоритм роботи програми, її особливості і умови роботи, пояснення цих

процесів зі сторони кодування, обробка отриманих даних за допомогою написаної програми та розгляд у програмному забезпеченні.

Метою цієї дипломної роботи є розробка та дослідження системи контролю експериментальної установки для дослідження низькотемпературної плазми на базі мікроконтролера STM32. У роботі розглянута компонентна база для створення вищезазначеної системи контролю, обрана модель джерела розривної дуги, основні методи обробки сигналів на мікроконтролері. Особлива увага буде приділена реалізації цих методів у контролері STM32, що забезпечить достатню точність і надійність контролю параметрів експериментальної установки.

# 1. ОГЛЯД ВИКОРИСТАНОЇ В РОБОТІ КОМПОНЕНТНОЇ БАЗИ ТА ОСОБЛИВОСТІ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЇ УСТАНОВКИ

## 1.1 Мікроконтролер STM32F103C8T6

Мікроконтролер STM32 належить до сімейства високоефективних 32-бітних мікроконтролерів, що вироблені компанією STMicroelectronics. Їх чіпи груповані у серії, в кожній з яких використовуються однакові 32-бітні ядра.

Коли йде мова про STM32, це

- Процесор, ядро.
- Вбудована пам'ять для збереження коду і ОЗУ для виконання програм.
- Вмонтована периферійна частина: декілька інтерфейсів(GPIO - general purpose input/output для керування сигналами входу і виходів, I2S, SPI, UART і т.п.), лічильники, таймери і т.д.
- Велика кількість серій мікроконтролерів.

У даній роботі використовується мікроконтролер STM32F103C8T6. В лінійці STM32F103xx включене ARM Cortex-M3 32-розрядне RISC ядро, що працює на частоті 72 МГц, вбудована високошвидкісна пам'ять(флеш-пам'ять до 128 кбайт і SRAM до 20 кбайт) і широкий діапазон розширених вводів та виводів і периферійних пристроїв, що підключаються до двох шин APB. Ця лінійка пристроїв пропонує два 12-розрядні АЦП, три 16-розрядних таймера загального призначення і один PWM-таймер, стандартні і прогресивні комунікаційні інтерфейси: до двох I2C і SPI, три USART, USB і CAN. Продукти вищезазначеної лінійки працюють при температурі від -40 до 105 °С, діапазон живлення від 2,0 до 3,6 В.

Як заявляє виробник, сімейство мікроконтролерів STM32F103xx підходить для широкого спектру використання:

- привід для моторів та контроль застосування;
- медичне та портативне обладнання;

- ігрові периферійні пристрої для персонального комп'ютеру і платформи GPS;
- промислове застосування: PLC, інвертори, принтери та сканери;
- системи сигналізації відеодомофон та HVAC(Heating, Ventilation, & Air Conditioning - Отоплення, Вентиляція та Кондиціонування)

На рисунку 1.1 зображено його розпіновка в програмному середовищі STM32CubeIDE.

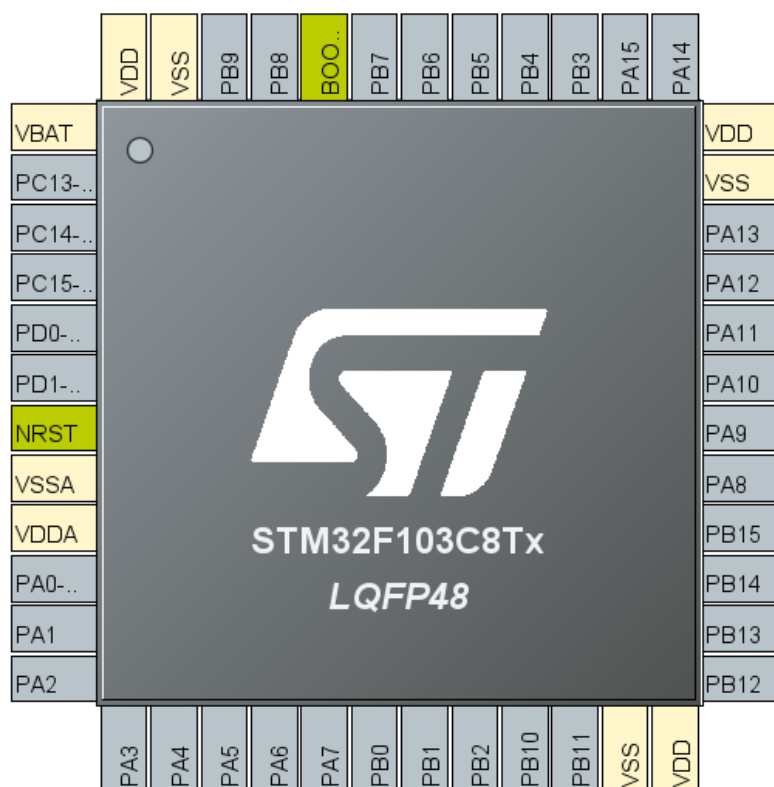


Рисунок 1.1. Розпіновка мікроконтролера STM32F103C8T6

На рисунку 1.2 зображені його загальні характеристики.

Peripheral		STM32F103Cx		STM32F103Rx			STM32F103Vx	
Flash - Kbytes		32	64	32	64	128	64	128
SRAM - Kbytes		10	20	10	20		20	
Timers	General purpose	2	3	2	3		3	
	Advanced Control	1		1			1	
Communication	SPI	1	2	1	2		2	
	I <sup>2</sup> C	1	2	1	2		2	
	USART	2	3	2	3		3	
	USB	1	1	1	1		1	
	CAN	1	1	1	1		1	
GPIOs		32		49			80	
12-bit synchronized ADC Number of channels		2 10 channels		2 16 channels				
CPU frequency		72 MHz						
Operating voltage		2.0 to 3.6 V						
Operating temperature		-40 to +85 °C / -40 to +105 °C						
Packages		LQFP48		LQFP64			LQFP100, BGA100	

Рисунок 1.2. Загальні характеристики мікроконтролера STM32F103C8T6 [1].

Отже, на борту мікроконтролера STM32F103C8T6 наявні наступні інтерфейси - SPI, I2C, USART, USB, CAN.

На рис. 1.3 зображена розпіновка (pinout) макетної плати з мікроконтролером STM32F103C8T6.

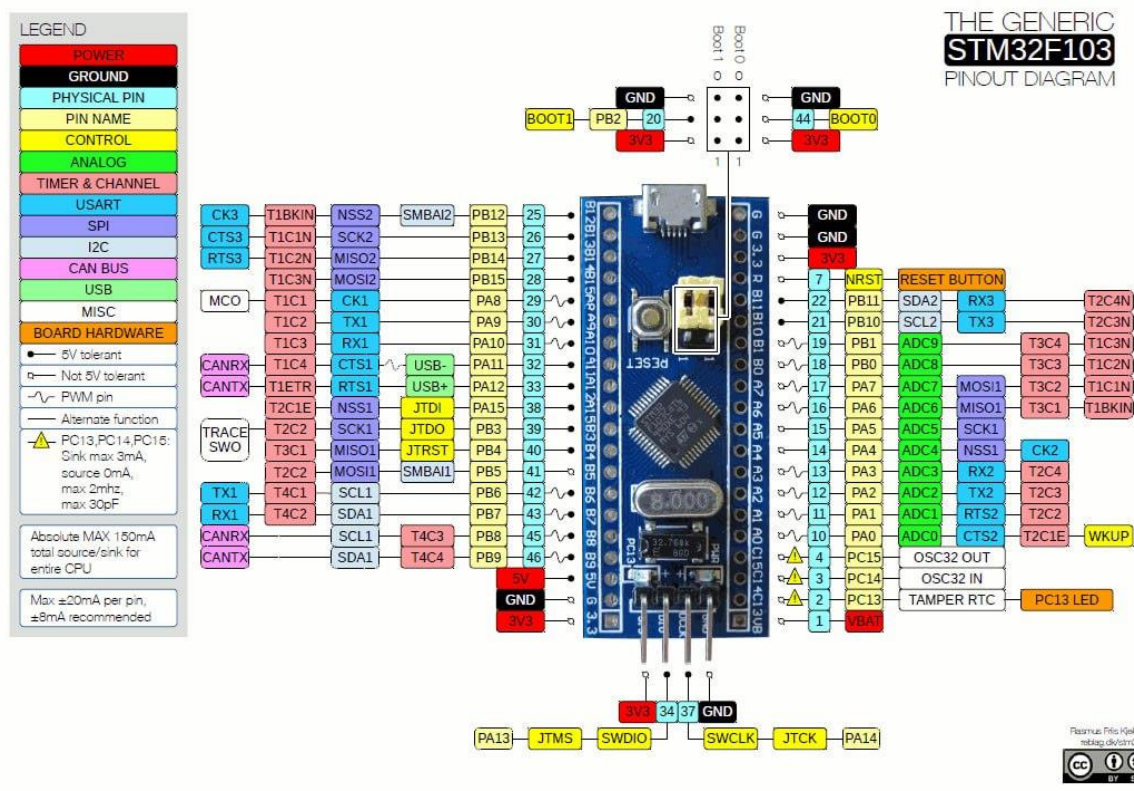


Рис. 1.3. Розпіновка (pinout) макетної плати з мікроконтролером STM32F103C8T6

## 1.2. Перетворювач інтерфейсу USB-B – RS485 TTL

З приводу перетворювача інтерфейсу USB-B – RS485 TTL, створений на платі FT232, має 2 інтерфейси - вхідний USB-B 2.0 Female та вихідний RS485. Має автоматичний вибір напрямку передачі даних, автоматична ідентифікація. Має сумісність з багатьма версіями Windows, а також з Linux і Mac. Як заявляє виробник, наявна підтримка пристроїв з інтерфейсом RS485, такими як: пристрої захоплення відео, камери спостереження, пристрої для зчитування відбитків пальців, PBX, CNC верстати, SCM. На рис. 1.4 зображений вигляд перетворювача.

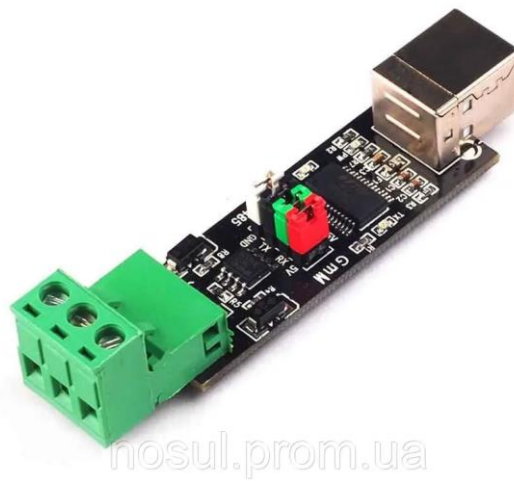


Рис. 1.4. Загальний вигляд перетворювача інтерфейсу USB-B – RS485 [2].

На рис. 1.5 зображена розпіновка перетворювача FT232RL.

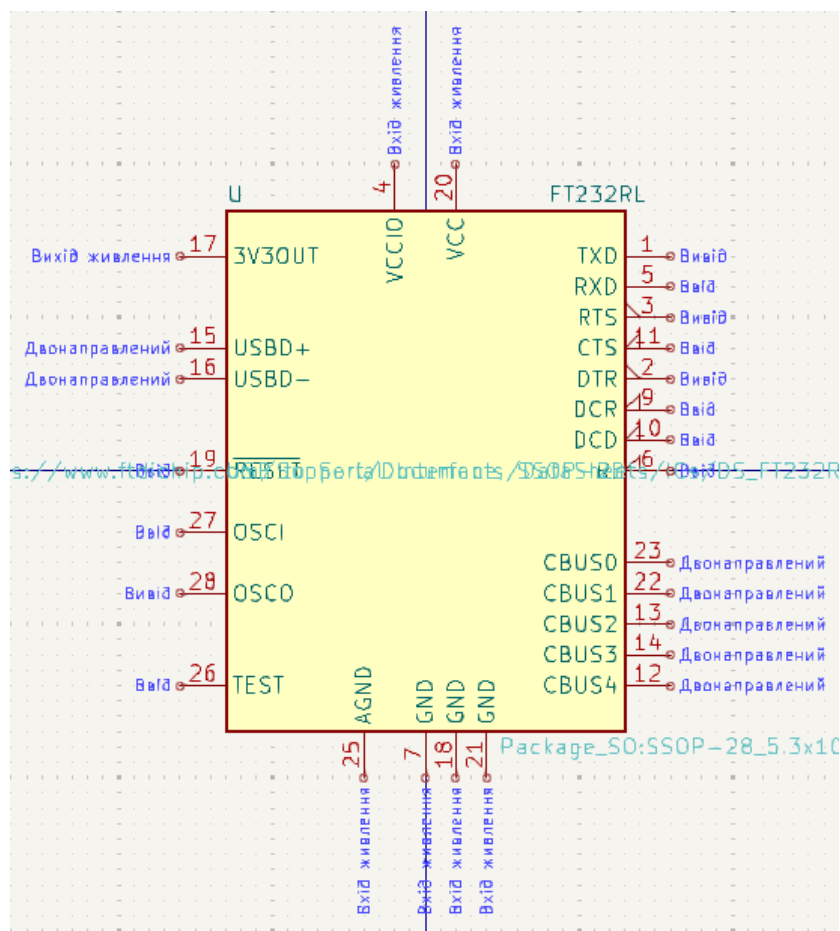
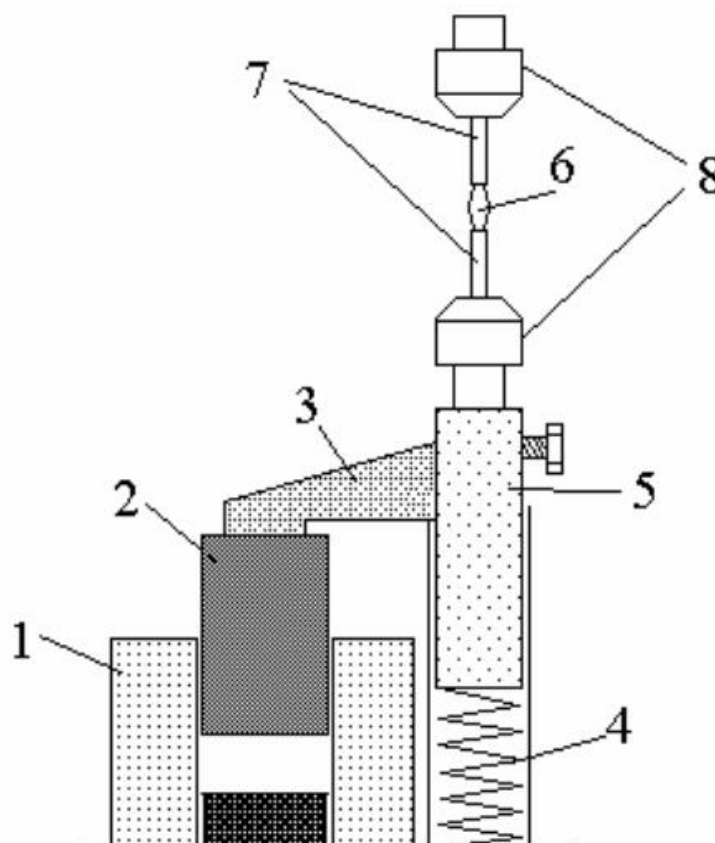


Рис. 1.5. Загальний вигляд перетворювача інтерфейсу USB-B – RS485

### 1.3. Модель джерела розривної дуги

Для реалізації системи контролю експериментальної установки з дослідження низькотемпературної плазми було обрано модель джерела розривної дуги. Схема такої моделі зображена на рис 1.6.



*Fig. 1. Scheme of the electrode unit. 1 – coil electro-magnet; 2 – anchor; 3 – arm; 4 – spring; 5 – mandrel holder electrode; 6 – electric arc; 7 – electrodes; 8 – electrodes mandrels collet clamps*

Рис. 1.6. Схема моделі джерела розривної дуги [9].

Плазма дуги запалюється між торцевими поверхнями електродів, що не охолоджуються. Щоб імітувати розрив дуги та пряму синхронізацію з вимірювальними схемами використовується електромагніт з контрольованою схемою. На рис 1.7 зображена електронна схема, що була розроблена для роботи електромагніту і контролю джерела живлення електричної дуги.

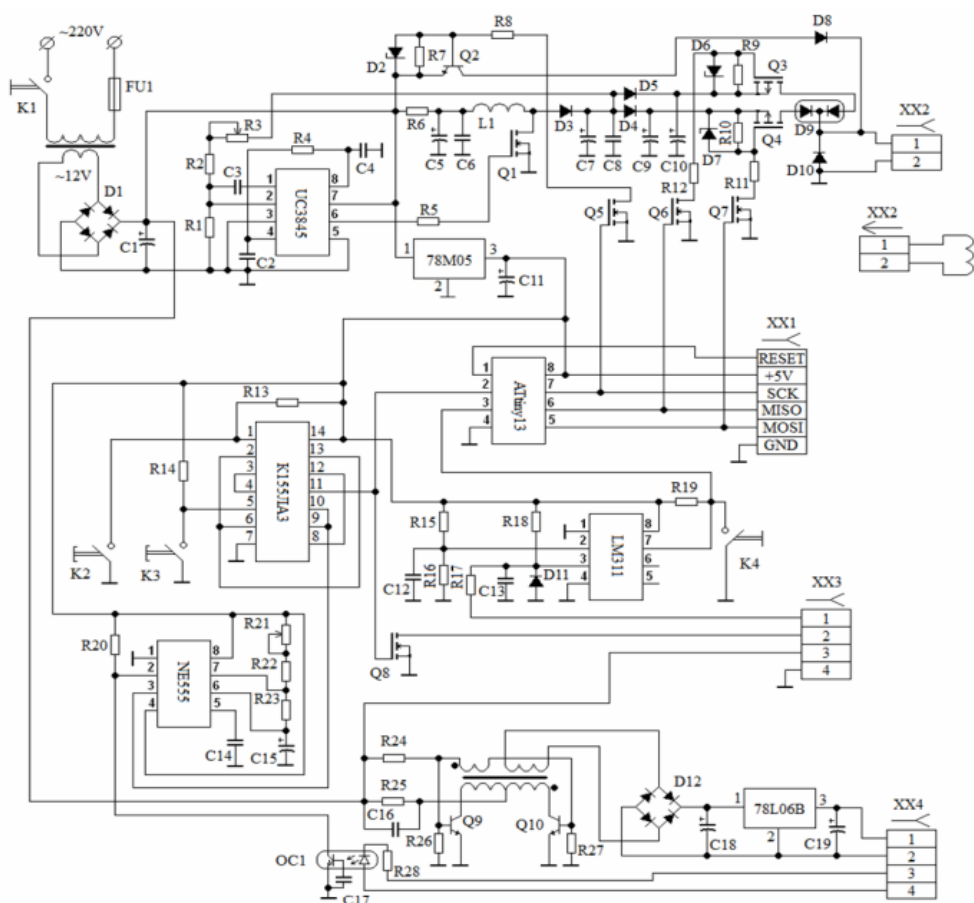


Fig. 2. The electric circuit of the electromagnet control. XX1 – internal connector for the microcontroller programming, XX2 – electromagnet connector, XX3 – connector to the power supply of electric arc, XX4 – input synchronization

Рис. 1.7. Схема для роботи електромагніту і контролю джерела живлення електричної дуги [9].

Для того, щоб втягувати якір електромагніту, потребується значно вища напруга, якщо порівнювати з напругою, якої вистачає для нормального втримання якоря. Ця напруга створюється за допомогою зворотного інвертора і зберігається в конденсаторі С9. Регулювання напруги утримання відбувається за допомогою широтно-імпульсної модуляції. Нижній електрод може вдарити верхній під час вивільнення якоря електромагніту. Для уникнення цього “ефекту”, напруга від конденсатора С10 подається на котушку електромагніту від час руху нижнього електрода вгору. Ця напруга також регулюється широтно-імпульсною модуляцією для максимального ефекту демпфування.

## 1.4. Особливості електродугового розряду

Плазма низькотемпературного дугового розряду є об'єктом досліджень завдяки своїм унікальним фізично-хімічним властивостям та потенціальному застосуванню в різних галузях. Під час досліджень дуже важливим є точне вимірювання і контроль параметрів плазми, і, зокрема, напруженості електричного поля. Оскільки для вимірювання одного значення напруженості електричного поля потрібно здійснювати декілька вимірювань напруги дуги при різних міжелектродних відстанях, визначити напруженість поля в режимі реального часу неможливо. Саме тому була розроблена альтернатива, базуватись на модуляції міжелектродної відстані з постійною частотою і амплітудою. Тому катод фіксується, а анод встановлюється на електромеханічний модулятор. На рис. 1.8 зображено схему електродного вузла та електромеханічного модулятора з індикатором.

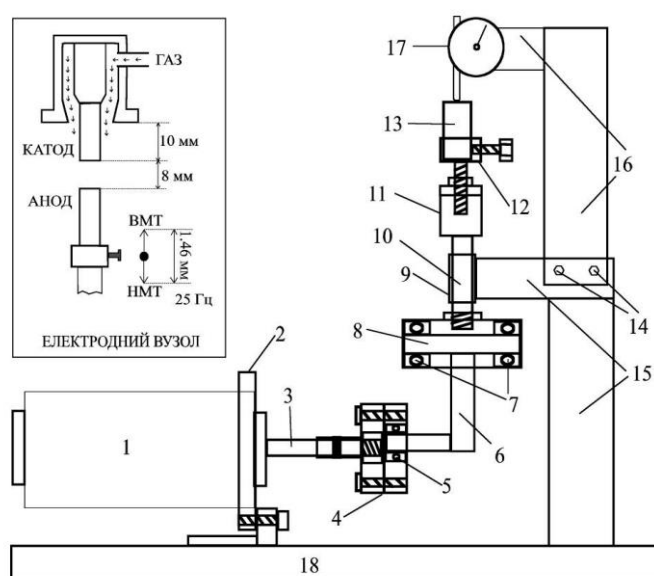


Рис. 1.8. Схема електродного вузла та електромеханічного модулятора зі встановленим індикатором годинникового типу для вимірювання амплітуди коливань: 1 – двигун, 2 – фланець, 3 – вал двигуна, 4 – муфта, 5 – вальниця кочення, 6 – шатун, 7 – вальниця кочення, 8 – вісь, 9 – напрямна втулка штока, 10 – шток, 11 – гайка для регулювання висоти електрода, 12 – тримач електрода, 13 – електрод, 14 – кріплення кронштейна, 15 – стійка, 16 – кронштейн, 17 – індикатор годинникового типу, 18 – основа.

Рис. 1.8. Схема електродного вузла та електромеханічного модулятора з індикатором годинникового типу для вимірювання амплітуди коливань [10].

Цей модулятор використовується для періодичної зміни міжелектродної відстані за гармонічним законом. Обертальний рух валу двигуна перетворюється на зворотно-поступальний рух завдяки кривошипно-шатунному механізму. Компонентами цього механізму є муфта, що з'єднана з валом двигуна і шатун, що передає рух штоку. Шток тримається у вертикальному положенні втулкою. Тримач електрода з'єднується зі штоком, який дозволяє регулювати висоту нижнього електрода. Для вимірювання амплітуди коливань використовується індикатор годинникового типу, який дозволяє точно вимірювати відстань між нижньою і верхньою мертвою точкою.

Напруженість електричного поля в плазмі дугового розряду можна визначити шляхом аналізу гармонік в спектрі напруги дуги, що виникають через зміщення електродів через механічні коливання. Як раз амплітуда цих гармонік є пропорційною напруженості поля і амплітуді механічних коливань. Саме тому аналіз гармонік дозволить визначити напруженість електричного поля. Виділення гармоніки напруги дуги здійснюється в два етапи. Сигнал проходить через смуговий фільтр II порядку, АЧХ якого зображений на рис. 1.9.

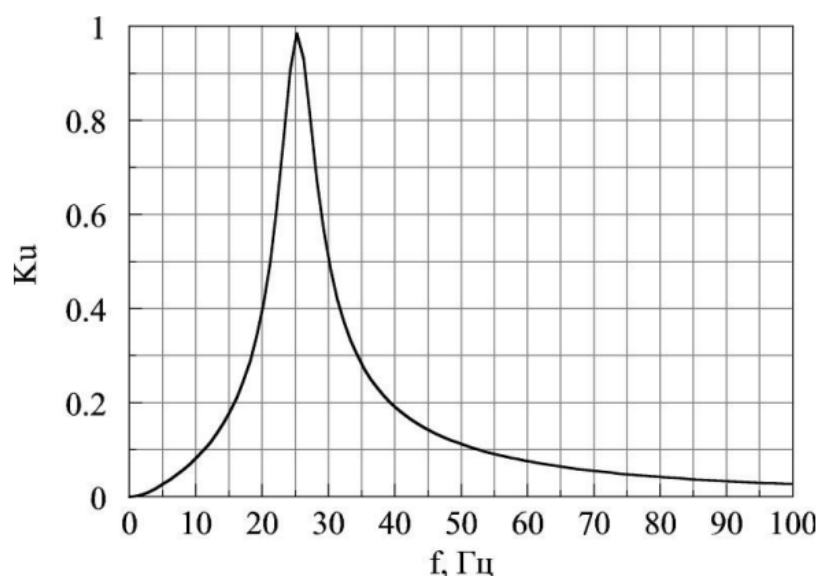


Рис. 2 АЧХ смугового фільтра, який використовується для попереднього виділення гармоніки 25 Гц з напруги дуги.

Рис. 1.9. АЧХ смугового фільтра II порядку [10].

Напруга на виході цього фільтра подається на один з входів двоканального USB осцилографа. Другий вхід використовується для отримання напруги від дуги з ослабленням. Оцифроване значення напруги передається на персональний комп'ютер. На другому етапі з виходу смугового фільтра з напруги виділяється основна гармоніка за допомогою дискретного перетворення Фур'є, це дозволить точно визначити напруженість електричного поля. Це також відбувається на персональному комп'ютері, де здійснюється комплексний аналіз сигналу та розрахунок параметрів.

## **2. ЦИФРОВЕ ОБРОБЛЕННЯ СИГНАЛІВ НА КОНТРОЛЕРІ STM32F103C8T6**

Мікроконтролер STM32F103C8T6 дозволяє здійснювати цифрове оброблення сигналів (Digital Signal Processing) завдяки значній обчислювальній потужності ядра ARM Cortex-M3 (що працює на частоті до 72 МГц та підтримує апаратні інструкції для DSP). Зокрема, архітектура контролера дозволяє ефективно реалізовувати цифрові фільтри зі скінченною та нескінченною імпульсними характеристиками. Окрім того, мікроконтролер має розширену периферію: два багатоканальних аналого-цифрових перетворювача які можуть працювати з прямим доступом до пам'яті; інтерфейси UART, SPI, I2C для передачі і прийому даних; таймери, які підтримують генерацію ШІМ сигналів.

Для обробки сигналу на контролері STM32F103C8T6, були обрані наступні методи - фільтр низьких частот (Low-Pass Filter), фільтр високих частот (High-Pass Filter), швидке перетворення Фур'є (FFT), як різновид дискретного перетворення Фур'є (DFT).

## 2.1. Основні методи обробки сигналу

Фільтр низьких частот - один з початкових методів обробки сигналу, а використовується для видалення високочастотних складових сигналу, залишаючи лише низькочастотні компоненти. Low-pass filter реалізується у формі аналогового або цифрового фільтра. На рис.2.1 зображені АЧХ та ФЧХ для аналогового фільтра низьких частот.

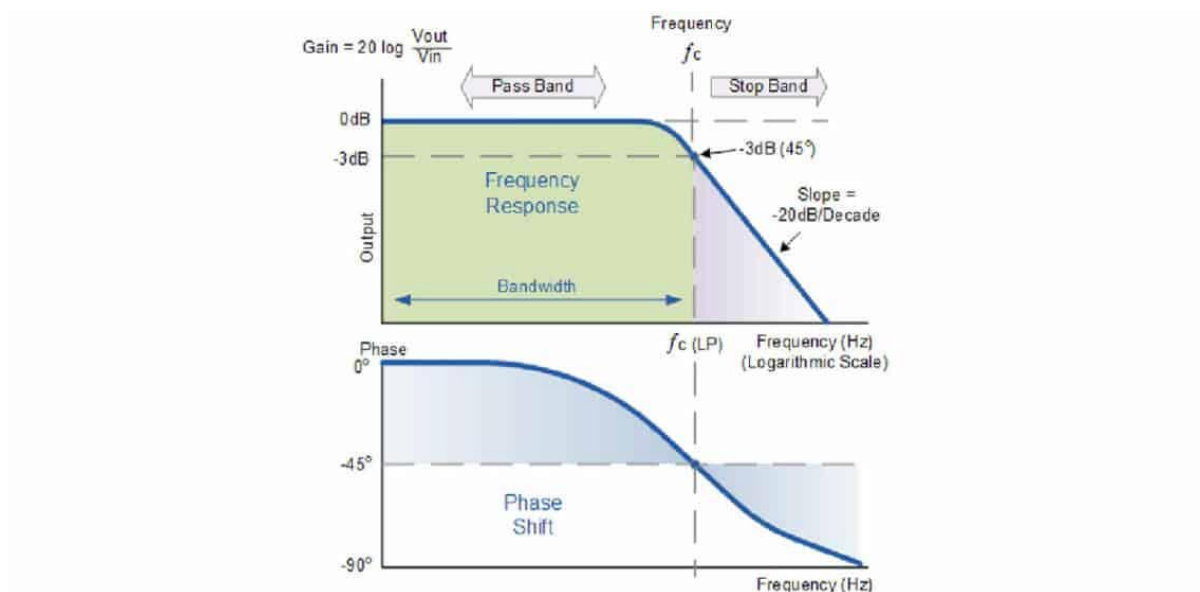


Рис.2.1. Графіки АЧХ і ФЧХ для методу Low-pass filter

Загальна його ідея в тому, щоб пропускати сигнали з низькою частотою та пригнічувати сигнали з високою частотою. Основні характеристики фільтра низьких частот включають частоту відсічення та порядок фільтра. Достатньо популярними фільтрами низьких частот є наступні фільтри – RC-фільтр, фільтр Баттерворта, фільтр Кайзера і експоненційно-зважений фільтр(EWMA) [3].

Фільтр високих частот працює рівно навпаки – пропускає сигнали з частотами вище за певний поріг та пригнічує сигнал з нижчою частотою. High-Pass Filter використовується для видалення таких низькочастотних компонентів як дрейф [4].

## 2.2. Дискретне перетворення Фур'є (DFT) та швидке перетворення Фур'є (FFT)

Дискретне перетворення Фур'є (DFT) – це алгоритм, що дозволяє визначити гармонічний або частотний склад досліджуваного дискретного сигналу. Цей метод дозволить проаналізувати, перетворити і навіть синтезувати сигнал таким чином, як це неможливо зробити при аналоговій обробці. Інакше кажучи, DFT обчислює амплітуду і фазу різних компонентів у досліджуваному сигналі, що дозволить проаналізувати його частотний спектр [6].

Швидке перетворення Фур'є (FFT) - це алгоритм для обчислення дискретного перетворення Фур'є завчасно означених послідовностей [7]. Основна перевага полягає в тому, що він може ефективно обчислити результат за менший час, ніж звичайний алгоритм з прямим обчисленням за допомогою означення. Алгоритм FFT часто використовується в цифровій обробці сигналів для перетворення дискретних даних з часового у частотний діапазон [5].

Основні ідеї FFT наступні:

- розділення і побудова (вихідна послідовність розбивається на дві підпослідовності, а потім до кожної з них застосовується FFT)
- об'єднання (після того як FFT застосовується до кожної підпослідовності, результати об'єднуються)
- використання властивостей з коренем
- бітова інверсія (особливий порядок бітів у вхідній послідовності сприяє швидкому виконанню FFT)

В цифровій обробці сигналів швидко обробляти сигнал в реальному часі іноді є необхідністю. Це і є найбільша перевага FFT.

В цьому проекті, швидке перетворення Фур'є(FFT) використовує апаратні можливості мікроконтролеру STM32F103C8T6 для покращення роботи цього методу обробки цифрових сигналів. STM32 має бібліотеку “CMSIS-DSP” (ARM Cortex Microcontroller Software Interface Standard), яка містить оптимізовані функції

для обробки сигналів. В цій бібліотеці наявні FIR та IIR фільтри, FFT та DFT, які будуть використовуватись в програмній реалізації цього проекту [8].

### 3. СИСТЕМА КОНТРОЛЮ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЮ УСТАНОВКОЮ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОДУГОВОЇ ПЛАЗМИ

#### 3.1. Опис принципової схеми системи контролю

Експериментальна установка дослідження електродугової плазми використовується для вивчення фізичних процесів, які протікають у низькотемпературній плазмі. Повторюваність отриманих фізичних результатів залежить від стабільності електричних параметрів розряду, що в свою чергу має контролювати розроблена у даній роботі система. На рисунку 3.1 показана принципова електрична схема контролера експериментальної установки.

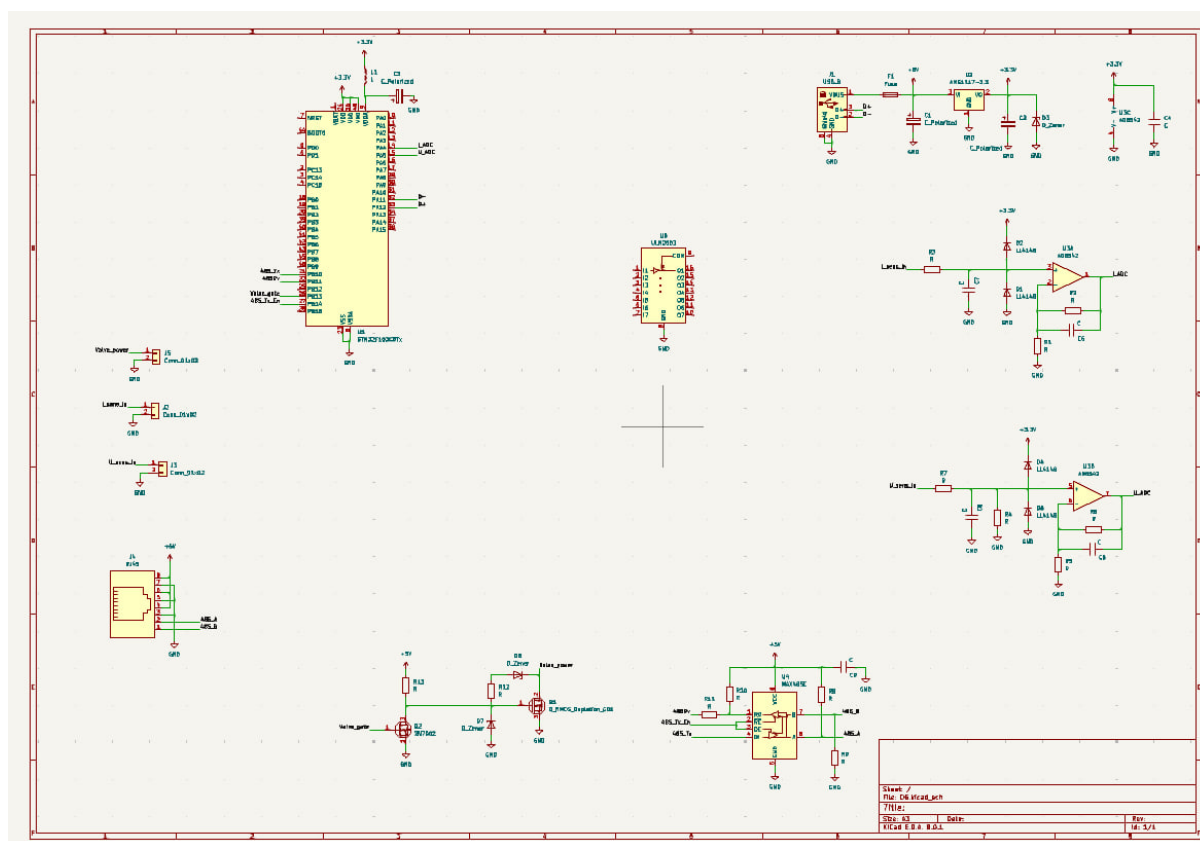


Рисунок 3.1. Принципова електрична схема контролера експериментальної установки.

Оснoву схеми складає мікроконтролер STM32F103C8T6, який вимірює значення струму і напруги дугового розряду, а також вихідну напругу смугового фільтра, що використовується для визначення напруженості електричного поля позитивного стовпа плазми (рисунок 3.2).

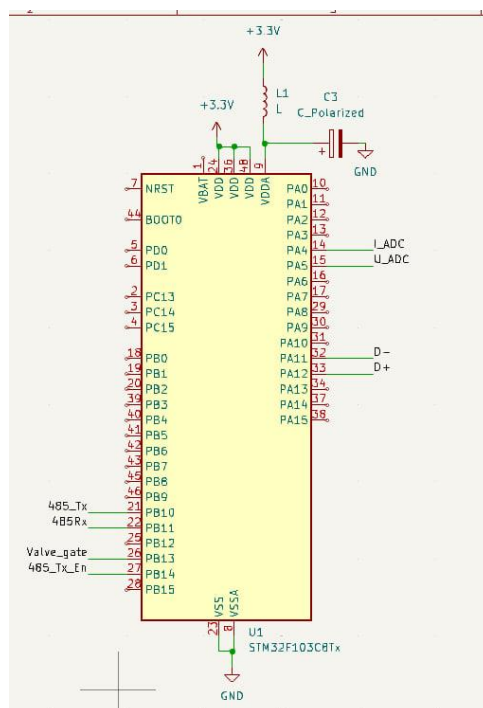


Рисунок 3.2. Мікроконтролер STM32F103C8T6 з вхідними та вихідними сигналами.

Живлення схема отримує від шини USB напругою 5В. Для живлення мікроконтролера напругою 3.3В використовується лінійний стабілізатор U2 (рисунок 3.3) з блокувальними конденсаторами C1 та C2. Для захисту від можливого короткого замикання використовується самовідновлювальний запобіжник F1.

Для вимірювання струму дугового розряду використовується підсилювач побудований на ОП U3A за схемою неінвертуючого увімкнення з коефіцієнтом підсилення 40, що разом із зовнішнім шунтом 100A\_75мВ дозволяє працювати у діапазоні розрядних струмів до 100А (рисунок 3.3). Для захисту підсилювача від самозбудження установлений конденсатор C5. Захист підсилювача від високої вхідної напруги реалізований резистором R3 та діодами D2 і D1. Конденсатор C7 разом із опором R3 утворює фільтр низьких частот для пригнічення високочастотної складової у складі сигналу струму. Частота зрізу даного фільтра нижча за частоту вибірки у понад 10 разів, що дозволяє уникнути негативного впливу періодичності спектру дискретного сигналу.

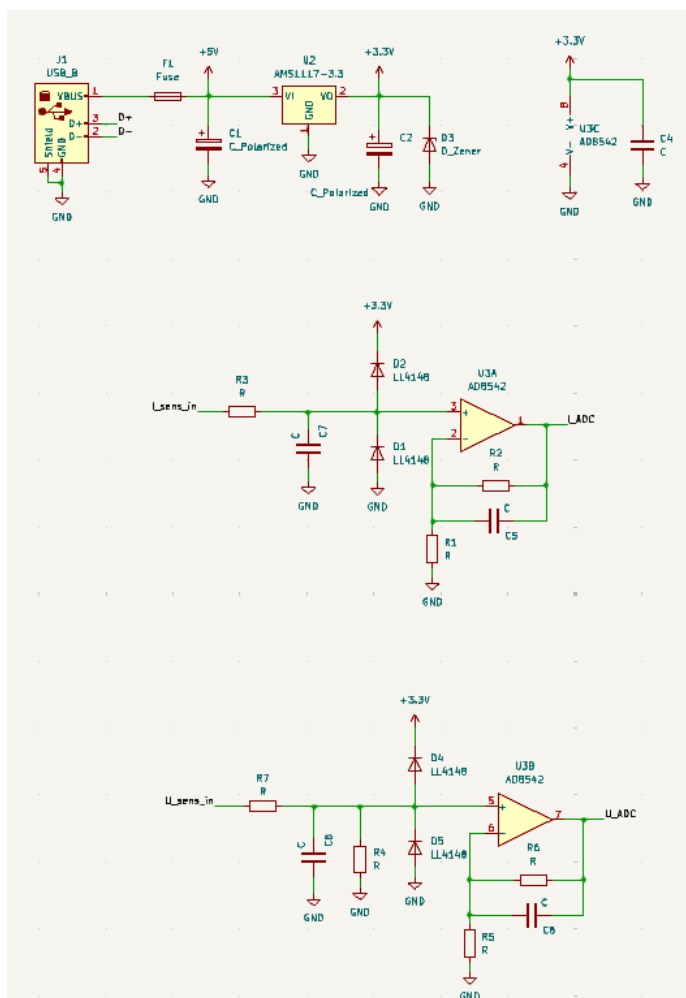


Рисунок 3.3. Принципова електрична схема.

Аналогічною до підсилювача струму є схема підсилювача напруги побудована на ОП U3B (рисунок 3.3) за однією відмінністю — там доданий резистор R4, який утворює подільник напруги дугового розряду разом з опором R7. Використаний операційний підсилювач типу rail-to-rail дозволив використати однополярне і живлення напругою 3.3В. Паралельно шинам живлення ОП встановлений блокувальний конденсатор C4.

На рисунку 3.4 показано схему підключення електроклапана керування газовим потоком, який використовується для дослідження розрядів у атмосфері різних газів. Керування виконане на транзисторах Q1 та Q2. Стабілітрони D6 та D7 використовуються для захисту транзистора Q1 від пробую напругою самоіндукції обмотки електроклапана.

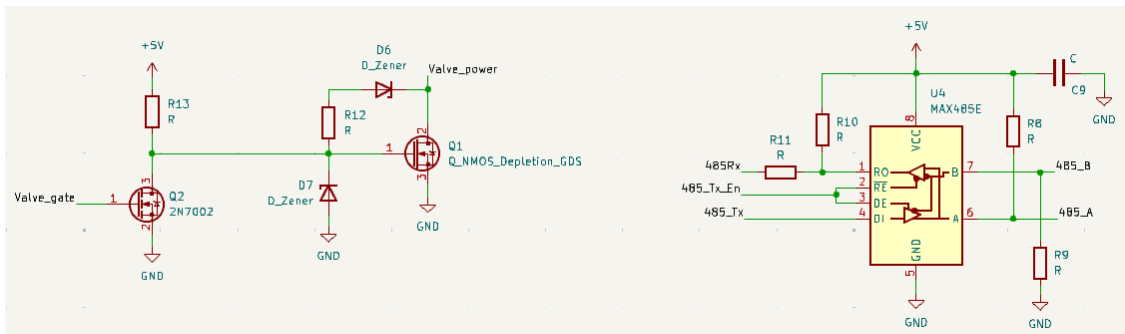


Рисунок 3.4. Принципова електрична схема керування електроклапаном і шиною RS-485

Окрім того, на рисунку 3.4 показано схему підключення драйвера шини RS-485 до UART мікроконтролера, що дозволяє включати дану розробку у загальну мережу (за допомогою 485 шини) керування експериментальною установкою.

Піни PA11 та PA12 підключені до USB-B конектора для можливості обміну даними з ПК.

Для вимірювання напруженості електричного поля позитивного стовпа дугового розряду використовується смуговий фільтр, схема якого показана на рисунку 3.5.

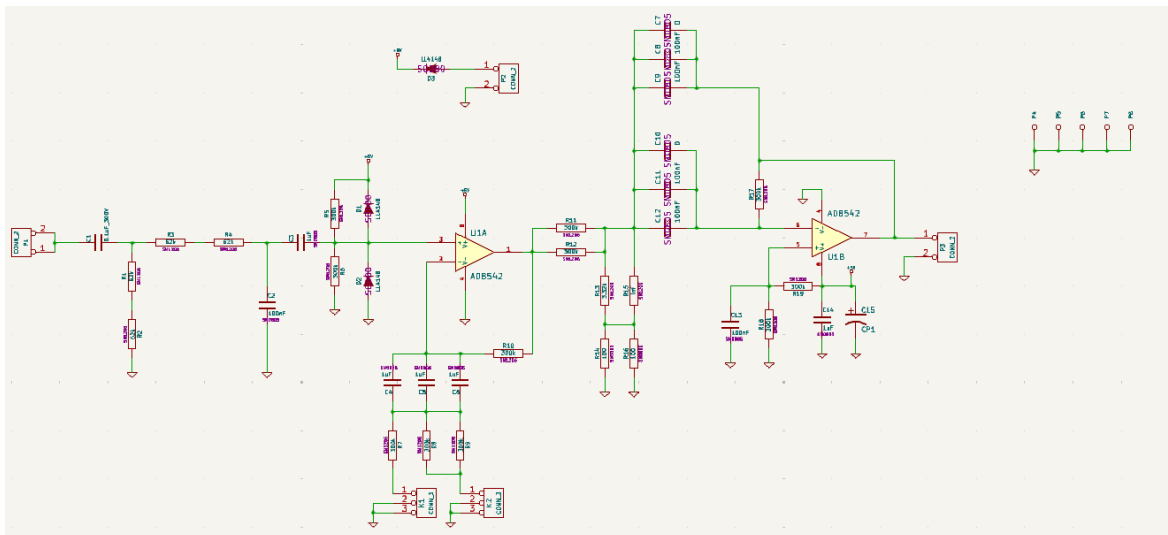


Рисунок 3.5. Схема смугового фільтра для вимірювання напруженості поля

Центральна частота фільтра становить 25Гц, що відповідає частоті коливань міжелектродного проміжку, який у свою чергу призводить до коливань напруги на

дузі. Ось саме цю модульовану частину напруги і виділяє показаний фільтр. Сигнал з виходу фільтра подається на вхід АЦП мікроконтролера, де оцифровується і додатково фільтрується за допомогою швидкого перетворення Фур'є.

Для створення програмного забезпечення бази мікроконтролера STM32F103C8T6, використовується IDE STM32CubeIDE і бібліотеки HAL та CMSIS-DSP для обробки сигналів.

### 3.2. Конфігурація інтерфейсів STM32F103C8T6

Перед початком роботи з мікроконтролером STM32F103C8T6, необхідно налаштувати такі параметри, як порти вводу/виходу, запущені інтерфейси та певні апаратні можливості для цифрової обробки сигналів. Для цього будемо використовувати STM32CubeIDE – інтегроване середовище розробки з дуже широким функціоналом.

У вкладці Analog обираємо ADC1, ставимо галочку біля параметру IN0, Data alignment – Right, Scan Conversion Mode – Disabled, Continuous Conversion Mode – Enabled. Вищезазначені параметри показані на рис. 3.6. Програма автоматично запропонувала обрати в якості піна PA0.

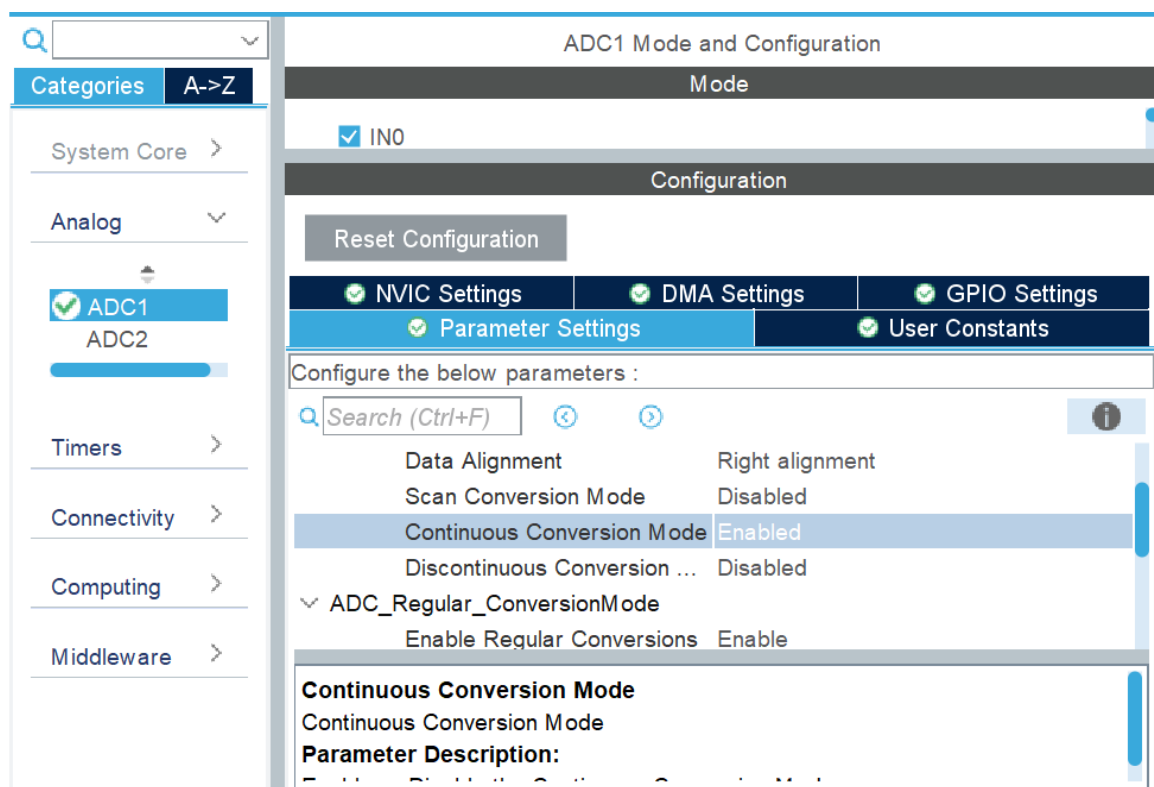


Рис.3.6. Налаштування ADC1

У вкладці Connectivity обираємо USART2. Для параметру Mode обираємо Synchronous. В конфігураціях для Baud Rate – 115200 Bits/s, Word Length – 8 Bits, Parity – None, Stop Bits – None. Ці налаштування зображені на рис. 3.7. Програмою було запропоновано обрати піни PA2, PA3, PA4. Також обираються піни для GPIO (General purpose input/output).

Після вищезазначених налаштувань конфігурація інтерфейсів завершена, і можна приступити до опису коду в середовищі.

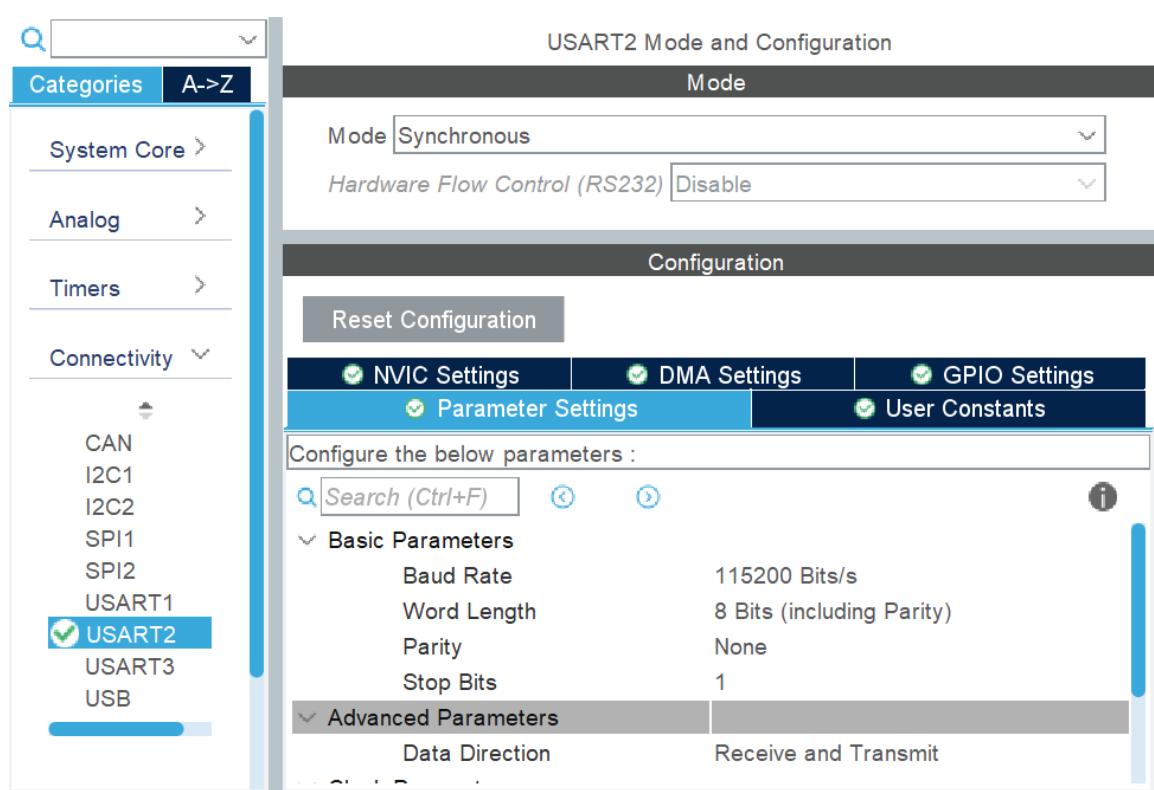


Рис.3.7. Налаштування USART2.

### 3.3. Опис роботи програми в середовищі

Спочатку виконується ініціалізація HAL-бібліотек та глобальних змінних. В блоці setup() відбувається налаштування тактового генератора, ініціалізація GPIO (інтерфейс вводу/виводу), ADC1 для зчитування аналогових сигналів та UART2 для передачі даних. Також відбувається ініціалізація FFT та фільтру. В основному

циклі `loop()` відбувається збір даних з ADC шляхом зациклення, отримані дані записуються в масив `inputSignal[]`. Потім сигнал обробляється фільтром низьких частот за допомогою функції `arm_fir_f32` та виконується FFT функцією `arm_rfft_fast_f32()`. На кінець отримані результати передаються за допомогою UART (за це відповідає функція `HAL_UART_Transmit()`).

## ВИСНОВКИ

Розроблено систему контролю експериментальної установки з дослідження низькотемпературної плазми на мікроконтролері STM32, яка дозволяє вимірювати вольт-амперні параметри дугового розряду та напруженість електричного поля позитивного стовпа. Остання, вимірюється шляхом зміни міжелектродної відстані з частотою 25 Гц та визначенням амплітуди відповідної гармоніки напруги дуги. Для визначення цієї амплітуди використовується смуговий фільтр та алгоритм швидкого перетворення Фур'є.

Розроблена система дозволяє за допомогою шини RS-485 взаємодіяти з іншими пристроями експериментальної установки.

На жаль, у системі не передбачено вхід і вихід синхронізації зі спектральними приладами, а також, можливість зміни полярності дугового розряду. Однак, вказаний недолік не є критичним і розроблена система може бути рекомендована до застосування з відповідною експериментальною установкою.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. URL <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32f103c8.pdf> (дата звернення: 20.06.2024).
2. URL <https://prom.ua/p1199925432-adapter-usb-ttl.html> (дата звернення: 20.06.2024).
3. URL <https://www.analog.com/en/resources/glossary/low-pass-filter.html#:~:text=A%20low%20pass%20filter%20> (дата звернення: 20.06.2024).
4. A. V. Oppenheim, R.W. Schaffer, J.R. Buck Discrete-Time Signal Processing 1999
5. URL <http://www.librow.com/articles/article-10> (дата звернення: 20.06.2024).
6. URL <https://jackschaedler.github.io/circles-sines-signals/> (дата звернення: 20.06.2024).
7. URL <https://www.ece.ucdavis.edu/~bbaas/281/notes/Handout.fft1.pdf> (дата звернення: 20.06.2024).
8. URL <https://github.com/ARM-software/CMSIS-DSP> (дата звернення: 20.06.2024).
9. Veklich A.N. Investigations of electric arc plasma between composite Cu–C electrodes / A.N. Veklich, V.F. Boretskij, A.I. Ivanisik, A.V. Lebid, S.A. Fesenko // Problems of Atomic Science and Technology. Series: Plasma Electronics and New Methods of Acceleration. – 2013. – Vol. 86, № 4. – P. 204–208.
10. Веклич А.М. Особливості електродугового розряду між композитними Cu—C електродами / А.М. Веклич, С.О. Фесенко, Л.О. Крячко, В. Ф. Борецький, М.М. Клешич, М.Є. Головка // Збірник праць інституту проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України. Серія: "Композиційні, шаруваті і градієнтні матеріали та покриття. Електричні контакти і електроди.". – 2016. – С. 36–60.

**ДОДАТОК А**

```
#include "main.h"
#include "arm_math.h" //підключення бібліотек

#define SAMPLES 256 // кількість точок у вхідному сигналі

float32_t inputSignal[SAMPLES];
float32_t fftOutput[SAMPLES];
float32_t lpfOutput[SAMPLES];

arm_rfft_fast_instance_f32 fftInstance;
arm_fir_instance_f32 lpfInstance;

extern ADC_HandleTypeDef hadc1;
extern UART_HandleTypeDef huart2;

void SystemClock_Config(void);
static void MX_GPIO_Init(void);
static void MX_ADC1_Init(void);
static void MX_USART2_UART_Init(void);

void setup() {
    HAL_Init();
    SystemClock_Config();
    MX_GPIO_Init();
    MX_ADC1_Init();
    MX_USART2_UART_Init(); //загальна ініціація

    arm_rfft_fast_init_f32(&fftInstance, SAMPLES);
```

```
    arm_fir_init_f32(&lpfInstance, NUM_TAPS, lpfCoeffs, lpfState, SAMPLES); //  
налаштування коефіцієнтів фільтру  
}  
  
void loop() {  
    for (int i = 0; i < SAMPLES; i++) {  
        HAL_ADC_Start(&hadc1);  
        HAL_ADC_PollForConversion(&hadc1, HAL_MAX_DELAY);  
        inputSignal[i] = HAL_ADC_GetValue(&hadc1);  
    } //заціклення процесу збору даних з ADC  
  
    arm_fir_f32(&lpfInstance, inputSignal, lpfOutput, SAMPLES); // обробка сигналу  
фільтром низьких частот  
    arm_rfft_fast_f32(&fftInstance, lpfOutput, fftOutput, 0); // виконання FFT  
  
    HAL_UART_Transmit(&huart2, (uint8_t*)fftOutput, sizeof(fftOutput),  
HAL_MAX_DELAY);  
} //передача інформації через UART  
  
int main(void) {  
    setup();  
  
    while (1) {  
        loop();  
    }  
}
```