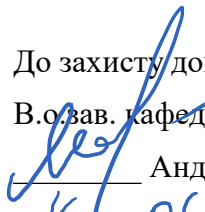


**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
РАДІОТЕХНІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ
КАФЕДРА ПРИКЛАДНОЇ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ**

До захисту допущено:

В.о.зав. кафедри

 Андрій МОВЧАНЮК

« 16 » 06 2023 р.

**Дипломний проєкт
на здобуття ступеня бакалавра
за освітньою програмою «Інтелектуальні технології мікросистемної
радіoeлектронної техніки»
спеціальності 172 Телекомунікації та радіотехніка»
на тему: Цифровий частотомір конвеєрного типу**

Виконав (-ла):

студент (-ка) IV курсу, групи PI-91

Соломко Віктор Олександрович

Прізвище, ім'я та по батькові



підпис

Керівник:

Доц. к.т.н., Перегудов Сергій Миколайович

Посада, науковий ступінь, вчене звання, Прізвище, ім'я та по батькові



підпис

Рецензент:

Ст. викладач Турєєва Ольга Василівна

Посада, науковий ступінь, вчене звання, Прізвище, ім'я та по батькові

підпис

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

Студент (-ка)



Київ – 2023

ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЄКТУ

№ з/П	Формат	Позначення	Найменування	Кількість листів	Примітка
1	A4	PI91.411711.001.ТЗ	Завдання на дипломний проєкт	5	
2	A4	PI91.411711.001 ПЗ	Пояснювальна записка	63	
3	A4	PI91.411711.001	Специфікація на пристрій	1	
4	A4	PI91.411711.001 Е1	Схема структурна	1	
5	A3	PI91.411711.001 Е3	Схема електрична принципова	1	
6	A4	PI91.411711.001 ПЕ	Перелік елементів	2	
7	A3	PI91.411711.002 СК	Складальний кресленик пристрою	1	
8	A3	PI91.411711.001 СК	Складальний кресленик друкованого вузла	1	
9	A4	PI91.411711.001	Специфікація на друкований вузол	2	
10	A3	PI91.758725.001	Друкована плата	1	

				PI91.411711.001		
	ПІБ	Підп.	Дата	Цифровий частотомір конвеєрного типу		
Розробн.	Соломко В.О.					
Керівн.	Перебудов С.М.					
Консульт.						
Н/контр.						
Зав.каф.	Мовчанюк А.В.					
					Лист	Листів
					1	1
					КПІ ім. Ігоря Сікорського Каф.ПРЕ, Гр. PI-91	

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

Радіотехнічний факультет

Кафедра прикладної радіоелектроніки

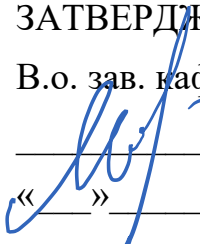
Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 172 Телекомунікації та радіотехніка

Освітньою програмою «Інтелектуальні технології мікросистемної радіоелектронної техніки»

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. зав. кафедри

 Андрій МОВЧАНЮК

«__» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проєкт студенту

Соломко Віктору Олександровичу

1. Тема проєкту «Цифровий частотомір конвеєрного типу», керівник проєкту Перегудов Сергій Миколайович, к.т.н., доцент, затверджені наказом по університету від «30» травня 2023 р. №2061.
2. Термін подання студентом проєкту 12 червня 2023 року
3. Вихідні дані до проєкту: напруга живлення пристрою $5 \pm 0,25$ В від USB або від акумулятора – $3,7 \pm 0,25$ В; вимірювані частоти до 100 МГц; сумісність з логікою TTL/CMOS 3,3 В; виведення графічного зображення.
4. Зміст пояснювальної записки: вступ; аналіз технічного завдання; огляд існуючих рішень; обґрунтування схемотехнічного рішення; вибір елементної бази; розробка електронного модуля; розробка корпусу.
5. Перелік графічного матеріалу: схема структурна, схема електрична принципова, кресленик друкованої плати, кресленик електронного модуля, складальний кресленик.

6. Дата видачі завдання 17 квітня 2023 року

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту	Термін виконання етапів проєкту	Примітка
1	Узгодження ТЗ з керівником	17.04	виконано
2	Дослідження існуючих рішень	18.04 – 24.04	виконано
3	Аналіз схеми структурної та схеми принципової	25.04 – 30.04	виконано
4	Вибір елементної бази	01.05	виконано
5	Розробка електронного модуля	02.05 – 11.05	виконано
6	Розробка корпусу і аналіз працездатності	11.05 – 17.05	виконано
7	Розробка графічного матеріалу та документації	17.05 – 21.05	виконано
8	Здача проєкту на перевірку	08.06.2023	виконано

Студент



Віктор СОЛОМКО

Керівник



Сергій ПЕРЕГУДОВ

АНОТАЦІЯ

Дипломний проєкт складається з пояснювальної записки обсягом 63 сторінки, включає 46 рисунків, 5 таблиць, 27 посилань, 5 додатків.

Ключові слова: вимірювач частоти, конвеєризація, вимірювальні засоби, мікроконтролер, цифрова електроніка.

В дипломному проєкті розглянуто методи та засоби вимірювання частоти сигналів, розроблено схему принципову, електронний модуль, корпус пристрою. Розглянуто засоби програмної реалізації конвеєрного вимірювання частоти на базі мікроконтролера. Виконано вибір сучасної необхідної елементної бази, на основі якої розроблено та спроектовано електронний модуль. Проведено розрахунки працездатності.

ANNOTATION

The Graduation Project consists of the explanatory note with the quantity of 63 pages., includes 46 figures, 5 tables, 27 references, 5 appendices.

Key words: frequency meter, pipelining, measurement instruments, microcontroller, digital electronics.

The Graduation Project examines methods and ways of signals frequency measurement, developing of the electrical circuit diagram, the printed circuit module assembly and the case. The means of software implementation of frequency measurement with pipelining are considered. The selection of required modern element basis is done, bringing the creation and design of the printed circuit module assembly. Efficiency calculations are carried out.

Пояснювальна записка
до дипломного проєкту
на тему: «Цифровий частотомір конвеєрного типу»

Київ — 2023

ЗМІСТ

Перелік скорочень.....	12
Вступ.....	13
1 Аналіз та розробка технічного завдання	15
1.1 Аналіз технічного завдання	15
1.2 Децимальний номер	16
2 Огляд існуючих рішень	17
2.1 Безпосередні методи та засоби вимірювання.....	17
2.1.1 Електромеханічне вимірювання.....	17
2.1.2 Конденсаторні частотоміри	19
2.2 Методи та засоби порівняння	19
2.2.1 Гетеродинний частотомір.....	20
2.2.2 Вібраційний частотомір	22
2.3 Цифрові методи вимірювання частоти	23
2.3.1 Обчислювальний метод вимірювання	24
2.3.2 Конвеєрний метод вимірювання	25
2.4 Вимірювання частоти радіоелектронної продукції на масовому виробництві.....	28
3 Обґрунтування схемотехнічного рішення.....	31
3.1 Схема структурна пристрою	31

					PI91.411711.001 ПЗ						
Змн.	Лист	№ докум	Підпис	Дата	Цифровий частотомір конвеєрного типу	Літ		Арк	Аркушів		
Розроб.	Соломко							2	30		
Перев.	Перебудов										
Реценз.											
Н. Контр.											
Затвердив	Перебудов					КПІ ім. Ігоря Сікорського РТФ					

3.2	Опис схеми електричної принципової.....	32
3.2.1	Опис живлення мікроконтролера.....	32
3.2.2	Опис подачі вхідного сигналу	34
3.2.3	Опис ліній виведення та керування вихідною інформацією.....	35
3.3	Програмна частина.....	37
3.3.1	Блок схема програми	37
3.3.2	Реалізація програмного коду	38
3.4	Особливості експлуатації розроблюваного приладу.....	39
3.4.1	Інформація на дисплеї	39
3.4.2	Керування	39
4	Вибір елементної бази	40
4.1	Вибір мікроконтролера.....	40
4.2	Елементи живлення пристрою.....	41
4.2.1	Акумулятор.....	41
4.2.2	Елементи керування напругою.....	42
4.2.3	Діод.....	43
4.3	Індикаторно-інформаційні елементи	43
4.3.1	Дисплей	43
4.3.2	Світлодіоди	44
4.4	Пасивні компоненти	45
4.4.1	Резистори	45
4.4.2	Конденсатори	46

4.5	Елементи керування.....	47
4.5.1	Кнопки.....	47
4.5.2	Перемикачі.....	47
4.6	Роз'єми	48
5	Розробка електронного модуля	50
5.1	Аналіз з точки зору конструктора.....	50
5.1.1	Визначення особливостей конструкції електронного модуля	50
5.1.2	Визначення способу кріплення ЕМ в корпус.....	50
5.1.3	Визначення способу підключення елементів живлення.....	51
5.2	Аналіз з точки зору технолога	51
5.2.1	Обґрунтування рішень щодо виготовлення ДП	51
5.2.2	Вибір матеріалу	52
5.2.3	Вибір класу точності ДП.....	52
5.2.4	Розрахунок ширини друкованих провідників.....	52
5.2.5	Розрахунок розмірів контактних майданчиків та монтажних отворів	54
5.2.6	Трасування провідників	55
6	Розробка корпусу та аналіз працездатності	58
6.1	Розробка корпусу ЕМ	58
6.2	Розрахунок працездатності пристрою	60
6.2.1	Розрахунок ЕМВ мікросхем.....	61
6.2.2	Розрахунок ЕМВ резисторів:	62
6.2.3	Розрахунок ЕМВ керамічних конденсаторів	62

6.2.4 Розрахунок ЕМВ світлодіодів:	63
6.2.5 Розрахунок ЕМВ діодної збірки:	64
Висновки	65
Перелік джерел посилань	66
5.1 Показники призначення	71
5.2 Вимоги до життєздатності та стійкості до зовнішніх впливів і чинників	72
5.3 Вимоги надійності.....	72
5.4 Вимоги до конструкції.....	72
5.5 Вимоги до технологічності	72
5.6 Вимоги до уніфікації та стандартизації	72
5.7 Вимоги до дизайну та ергономіки.....	72
5.8 Вимоги до експлуатації, зручності технологічного обслуговування та ремонту	73
5.9 Вимоги безпеки життя, здоров'я майна громадян та охорони довкілля	73
5.10 Вимоги до транспортування і зберігання.....	73
Додаток Б	75
Додаток В Перелік елементів.....	82
Додаток Г Специфікація друкованого вузла.....	84
Додаток Д Специфікація пристрою	86

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

АБС — акрилонітрилбутадієнстирол.

ГОСТ — «государственный стандарт» — державний стандарт.

ДП — друкована плата.

ДСТУ — державний стандарт України.

ЕМ — електронний модуль.

ЕМВ — експлуатаційна можливість відмов.

ЕРЕ — електрорадіоелементи.

ЛІА — літій-іонний акумулятор.

РЧ — радіочастотний.

ТЗ — технічне завдання.

CISC — «Complex Instruction Set Computing або Complex Instruction Set Computer» — комп'ютер/обчислення зі складним набором команд.

CMOS — «Complementary metal-oxide-semiconductor» — комплементарний метал-оксид-напівпровідник.

GND — «Ground» — земля (як правило, нульовий потенціал).

ISO — International Organization for Standardization — міжнародна організація стандартизації.

RISC «Reduced Instruction Set Computer» — обчислення зі скороченим набором команд.

SPI — «Serial Peripheral Interface» — послідовний периферійний інтерфейс.

TTL — «Transistor-transistor logic» — транзисторно-транзисторна логіка.

USB — «Universal Serial Bus» — універсальна послідовна шина.

ВСТУП

Вимірювачі частот використовуються в різних додатках, таких як системи зв'язку, радіочастотні (РЧ) схеми та цифрова обробка сигналів. Вони також застосовуються для тестування та обслуговування цифрових систем, а також для оцінки якості сигналу в цифровому зв'язку. Більш того, частотоміри корисні для регулювання, обслуговування та діагностики електронного та радіообладнання, налаштувань технологічних процесів, контролю електромереж і низькочастотної апаратури, налагоджування приймально-передавальних пристроїв тощо.

Цифрові частотоміри є особливо популярними і універсальними. Вони працюють на основі підрахунку кількості імпульсів, що виділяються з вхідного періодичного сигналу. Це забезпечує високу точність вимірювань і зручність в експлуатації. Цифрові частотоміри зазвичай використовуються для вимірювання частоти від декількох герц до кількох гігагерц. Одним з основних елементів частотоміра є еталонний генератор, який забезпечує точність вимірювань. В залежності від характеристик еталонного генератора вимірювача частоти, таких як стабільність частоти, низький рівень шуму, висока точність і довготривала стабільність може відрізнятись надійність і точність результатів вимірювань.

Одним з головних переваг цифрових частотомірів є їх можливість працювати з різними видами сигналів. Вони здатні вимірювати як сталу, так і змінну частоту, а також частоту змінних сигналів різної форми, включаючи сигнали з шумами та спектральними складовими. Це дозволяє використовувати частотоміри для аналізу складних сигналів, однак в таких системах може знадобитися вузол обробки і перетворення вхідного сигналу на сумісний з обчислювальними цифровими елементами.

В обчислювальній техніці існує велика кількість принципів оптимізації її роботи за рахунок апаратної або програмної модернізації. Досягти більшої продуктивності можна наприклад за допомогою зменшення розмірів

					<i>PI91.411711.001 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		7

мікропроцесорів, оскільки тоді фізичні явища, що в них відбуваються, займають менше часу, а отже і обчислювальні операції виконуються швидше. Однак, існують фізичні обмеження до розмірів транзисторів і на сьогоднішній день технологічні процеси до них поступово наближаються [1]. Інший підхід до прискорення обчислень – це паралельне виконання. За наявності більше як одного обчислювального ядра можливо одночасно застосувати декілька ідентичних алгоритмів до різних даних. Зворотній метод – виконувати одну інструкцію до великої кількості даних в одному потоці, на чому базується робота векторних процесорів [2]. До одного з методів реалізації паралелізму відносять і конвеєризацію, коли над одним набором даних виконується декілька більш простих обчислень, на які розбито основну інструкцію. Завдяки такому способу оптимізації RISC (Reduced Instruction Set Computer) процесори на початку свого існування значно випереджали в продуктивності аналоги на CISC (Complex Instruction Set Computing або Complex Instruction Set Computer) архітектурі [3].

В контексті частотоміра принцип конвеєризації вимірювань полягає у початку нового вимірювання ще до завершення попереднього на одному часовому проміжку, тоді коли при послідовному вимірюванні інтервали вимірювання послідовні, що знижує кількість фіксацій значень частоти в одиницю часу, а отже і вихідну точність за той самий час.

Цікаво, що таким чином ефективність та точність роботи частотоміра можуть бути значною мірою підвищені завдяки конвеєризації обчислень. Внаслідок отримуємо більше інформації про досліджувані сигнали.

1 АНАЛІЗ ТА РОЗРОБКА ТЕХНІЧНОГО ЗАВДАННЯ

1.1 Аналіз технічного завдання

В дипломному проєкті описано розробку та проектування цифрового вимірювача частоти на базі мікроконтролера STM32F103C8T6 з конвеєризацією вимірюваних значень частоти для сумісних з TTL (transistor-transistor logic) та CMOS (complementary metal-oxide-semiconductor) рівня 3,3 В електричних сигналів в діапазоні 100 Гц – 30 МГц. Досліджуваний сигнал надходить на вхід внутрішнього таймера мікроконтролера, порівнюється з еталонною тактовою частотою, після чого відбувається обчислення періоду сигналу програмою. Результати обчислень виводяться на графічний дисплей. Живлення вимірювача здійснюється зовнішнім джерелом через USB (Universal Serial Bus) роз'єм або з внутрішнього акумулятора.

Основні вимоги до пристрою наводяться згідно з ДСТУ (державний стандарт України), ISO (International Organization for Standardization) та ГОСТ (государственный стандарт).

Експлуатація пристрою передбачена для роботи в приміщеннях, наприклад радіолабораторії. Відповідно до технічного завдання (ТЗ) кліматичне виконання за УХЛ 4.2 ГОСТ 15150:69 [4].

Пристрій є компактним та зручним для переносу в кишені, чохлах тощо, тому умови експлуатації визначаються згідно з ГОСТ 16019-2001.Р6 [5].

При проектуванні забезпечити вимоги до технологічності за ДСТУ-Н 7916:2015 [6].

Конструкція пристрою не повинна займати зайвий простір. Дизайн передбачається цілісним, мінімалістичним, раціональним згідно з ДСТУ 3943:2000 [7] та ДСТУ 3944:2000 [8]. Забезпечується доступ до електронного модуля частотоміра і акумулятора, які можна в разі необхідності демонтувати, замінити або ремонтувати.

					PI91.411711.001 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		9

Відповідність всім нормам безпеки виконати за ГОС ДСТУ ISO 14001:2015 [9] та ДСТУ ISO 14004:2016 [10]. Утилізація відбувається за ДСТУ 2195:99 [11].

Технічне завдання до розробки та проектування частотоміра наведено в додатку А.

1.2 Децимальний номер

41 — засоби вимірювань електричних і магнітних величин, іонізуючих випромінювань, засобів інтроскопії, виявлення складу і фізико-хімічних властивостей речовин;

411— засоби вимірювань електричних і магнітних величин;

4117 — системи інформаційно-вимірювальні, установки і комплекси вимірювально-обчислювальні;

41171 — системи інформаційно-вимірювальні;

411711 — аналогові цифрові з використанням засобів обчислювальної техніки.

Децимальний номер — PI91.411711.001.

					PI91.411711.001 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		10

2 ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ

Існує безліч засобів аналізу сигналів. Поширеними технічними вимірювальними засобами, що можуть бути використані для заміру частоти є:

- осцилограф (візуальне відображення сигналу);
- спектроаналізатор (детальний аналіз гармонічних складових сигналу);
- мультиметр (за наявності такої технічної можливості пристрою).

Однак, наведені приклади є багатофункціональними засобами вимірювання декількох величин, де частота сигналу є лише однією з широкого ряду опцій. Якщо розглядати частотоміри, спеціальним призначенням яких є точне вимірювання частоти сигналу, за елементною базою їх можна поділити на аналогові та цифрові. Однак, за методом вимірювання частотоміри класифікують як засоби безпосередньої оцінки сигналу або як засоби порівняння з мірою.

Далі наведені приклади з міркувань опису найбільш поширених методів вимірювання частоти.

2.1 Безпосередні методи та засоби вимірювання

Безпосереднє вимірювання частоти означає збереження інформації про неперервні зміни параметрів сигналу, коли має місце пряме перетворення (зміна сигналу прямо впливає на реактивний опір або заряд ємності) [12].

2.1.1 Електромеханічне вимірювання

Одним з аналогових методів безпосереднього вимірювання частоти є електромеханічне вимірювання. Такий метод підходить лише для вимірювання сигналів низької частоти вузького діапазону. Електродинамічні й електромагнітні частотоміри мають досить низьку порівняно з сучасними частотомірами точність, однак можуть представляти інтерес з точки зору реалізації.

					PI91.411711.001 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		11

В таких пристроях використовують логометричний вимірювальний механізм, який складається з двох рухомих котушок, закріплених на одній осі під деяким кутом одна до одної, яка може вільно обертатися у магнітному полі нерухомої котушки (рис. 1). Параметри рухомої котушки та елементів R_2 , L_2 , C_2 добирають так, щоб резонансна частота припадала на середину вимірюваного діапазону частот.

$$f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_2 C_2}}, \quad (2.1)$$

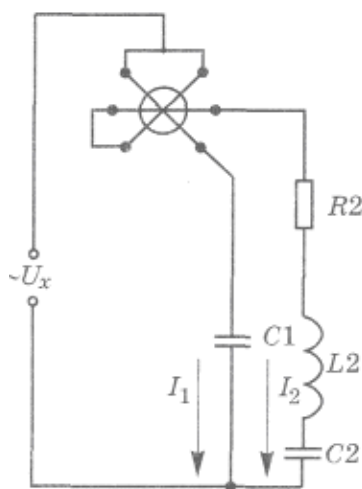


Рисунок 2.1 — Структурна схема вимірювача частоти електричного сигналу

У разі відхилення вимірюваної частоти від середини діапазону змінюються опори реактивних елементів

$$X_{C2} = \frac{1}{2\pi f_x C_2}, \quad (2.2)$$

$$X_{L2} = 2\pi f_x L_2, \quad (2.3)$$

і співвідношення між струмами в котушках, унаслідок чого стрілка відхиляється на кут, пропорційний вимірювальній частоті f_x . Аналогічно працює і електромагнітний частотомір [13].

2.1.2 Конденсаторні частотоміри

В вимірювачах частоти такого типу фронт вхідного сигналу викликає заряд або розряд конденсатора, під час чого вимірюють його струм [14].

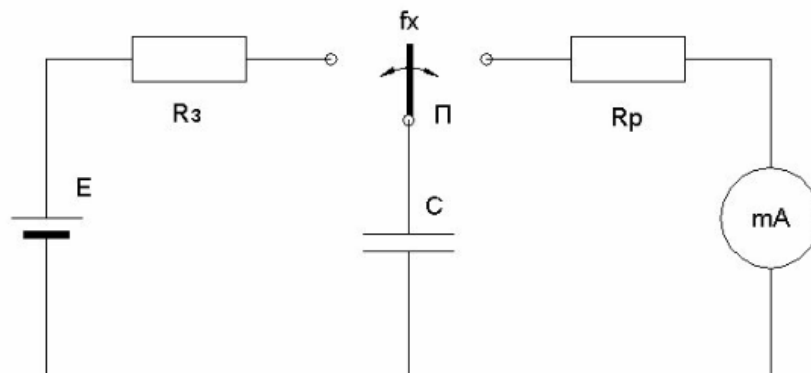


Рисунок 2.2 — Схема конденсаторного частотоміра

Таким чином, можна фіксувати неперервну зміну величини заряду в часі.

Наведені приклади безпосереднього вимірювання частоти часто поширені в науково-технічній літературі з метрології. Однак, проаналізувавши ринок, можна зробити висновок, що такі прилади не виготовляються масово з комерційною метою з причини низького попиту. Це і не дивно, оскільки такі прилади або можуть розроблюватись та використовуватись в спеціальних лабораторіях для конкретних досліджень, коли аналогічних засобів вимірювання немає, або вже не можуть конкурувати з сучасними частотомірами, що мають значно вищу точність та не містять механічних елементів, працездатність яких завжди досить сильно обмежена в часі у порівнянні з електрорадіоелементами (ЕРЕ).

2.2 Методи та засоби порівняння

Як засоби порівняння частотоміри вже передбачають обробку параметрів сигналу на вході системи, а саме обчислення кількості періодів за певний час, порівнюючи її з еталонним високостабільним сигналом [12]. Зазвичай це виконується шляхом зіставлення фази або періоду вхідного сигналу з внутрішнім

або зовнішнім відомим джерелом сигналу. Такі методи можуть бути реалізовані в аналоговій і цифровій техніці.

Серед частотомірів, в основі роботи яких лежить принцип порівняння, виділяють гетеродинні, резонансні, вібраційні, зворотного рахунку (абсолютний) [14].

2.2.1 Гетеродинний частотомір

В основі гетеродинного частотоміру лежить порівняння вхідної частоти та частоти підстроюваного гетеродина. На вхід порівнювача подається в однаковий час вхідний сигнал з частотою f_x і вихідний сигнал гетеродина частотою f_z (рис 2.2).

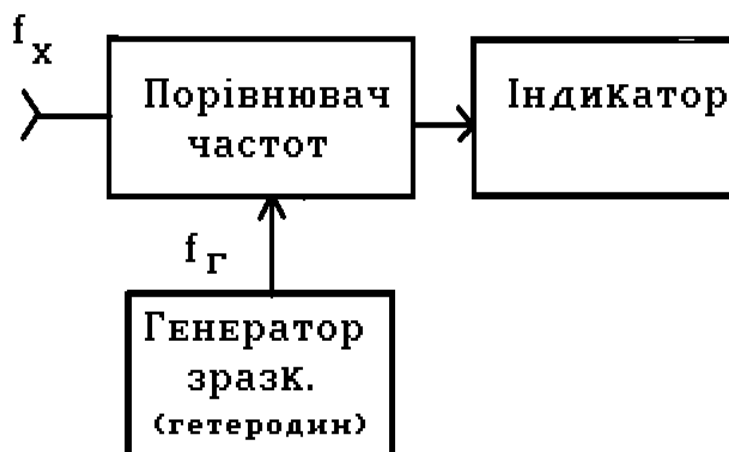


Рисунок 2.2 — Схема структурна гетеродинного вимірювача частоти

За калібрування частоти генератора на виході порівнювача отримують сигнал низької частоти. Змішувачем частот є нелінійний елемент, що дозволяє отримувати комбіновану частоту:

$$f_k = m f_x + n f_z, \quad (2.4)$$

де m і n – номери гармонік сигналу на вході системи і виході гетеродина відповідно.

Для отримання результату добиваються отримання вихідної частоти гетеродина рівною вимірюваній частоті. Часто вимірювання проводяться на перших гармоніках, тоді

$$f_x = f_z, \quad (2.5)$$

за умови $m = 1, n = 1$. Такий метод гетеродинного вимірювання називається методом нульового відбиття [15].

Гетеродинні частотоміри у свій час були досить ефективними, високоточними і підходящими для вимірювань високих частот, про що свідчить їх застосування у військовій сфері. Наприклад, гетеродинний частотомір AN/URM-80 (рис. 2.3) розроблений у 1955р. для повітряних сил армії США дозволяв вимірювати в радіочастотному діапазоні від 10 МГц до 100 МГц [16].

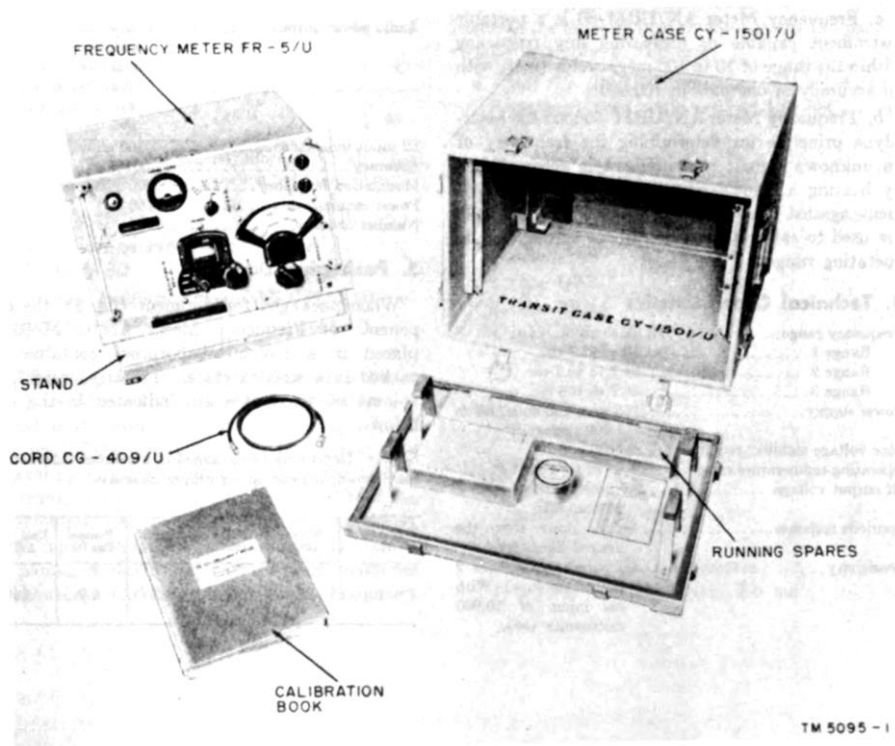


Рисунок 2.3 — Комплект гетеродинного вимірювача частоти AN/URM-80

2.2.2 Вібраційний частотомір

В основі роботи вібраційного частотоміра лежить резонанс механічних коливань пружних пластин, збуджуваних електромагнітом зі змінним струмом джерела котушки. Метою є вимірювання частоти цього струму (рис. 2.4) [17].

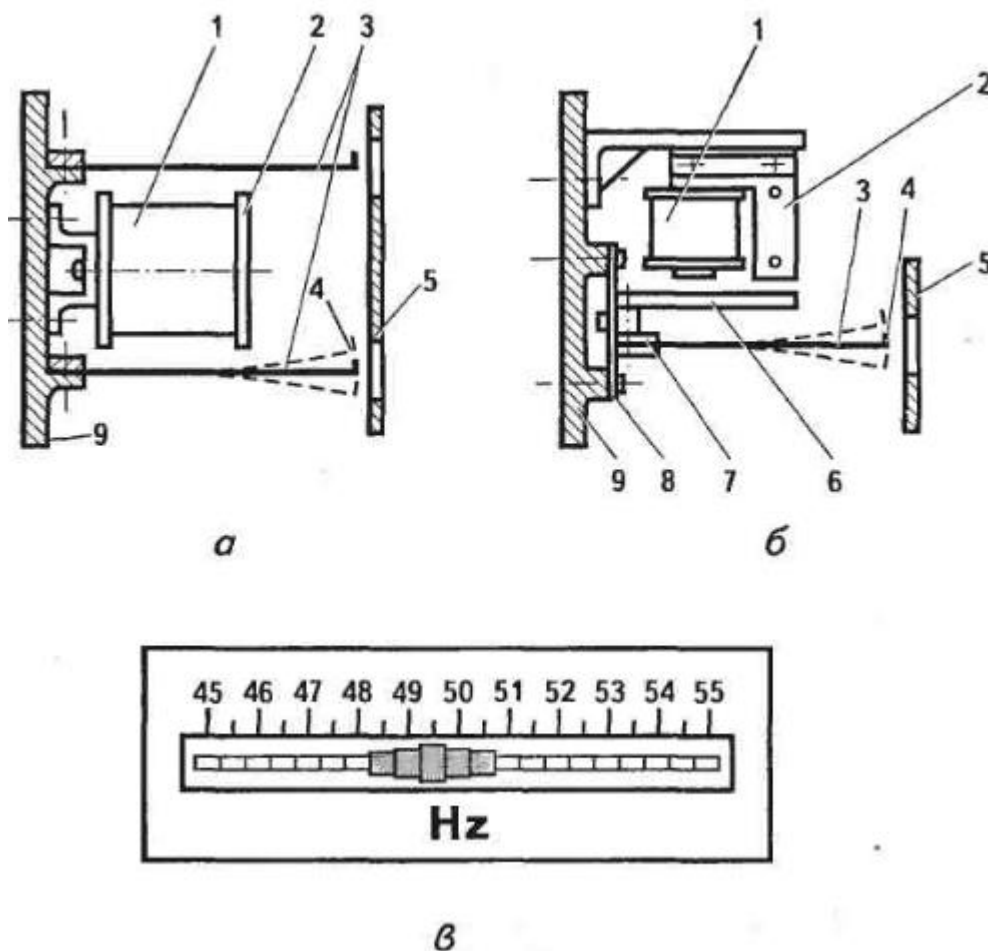


Рисунок 2.4 — Будова вібраційного частотоміра

Всі наведені вище методи вимірювання можна віднести до аналогових. На сьогодні аналогові частотоміри витісняються цифровими, оскільки останні мають значні переваги, такі як вища точність за рахунок впровадження високостабільних мір частоти і часу на основі кварцевих резонаторів і обчислювальною технікою з дискретною логікою.

2.3 Цифрові методи вимірювання частоти

Цифровий частотомір базується на використанні лічильників і таймерів, які вимірюють кількість періодів або імпульсів сигналу протягом певного періоду часу. З періодом відомого внутрішнього джерела сигналу порівнюють вхідний сигнал і обчислюють його частоту. Цифрові частотоміри також можуть мати додаткові функції, такі як відображення, збереження результатів вимірювання, підтримка різних інтерфейсів і можливість підключення до комп'ютера для подальшого аналізу даних тощо. Вони зазвичай мають високу точність та широкий діапазон вимірювання. Таким чином, цифрові вимірювачі частот, зазвичай, є більш універсальними, але вимагають використання цифрових елементів і обробки сигналу, що може збільшити їх вартість.

В залежності від вимог до вимірювання сигналу принцип роботи частотоміра може відрізнятись. Наприклад, за необхідності автоматичного вибору межі вимірювання обчислювальний елемент має підбирати потрібний діапазон вимірювання, що дозволяє досягти застосування дільника частоти, коефіцієнт якого і виступає головним змінним параметром для визначення частотного діапазону. Схема структурна наведена на рисунку 2.5 [18].



Рисунок 2.5 — Структурна схема вимірювача частоти електричного сигналу

Надалі розглянемо найбільш поширений принцип роботи цифрових частотомірів.

2.3.1 Обчислювальний метод вимірювання

Найкраще принцип порівняння якісно демонструє обчислювальний (також відомий як зворотний або абсолютний) метод вимірювання. З урахуванням сучасної елементної бази з доступними на ринку мікроконтролерами, на його основі можна реалізувати точні засоби вимірювання з похибкою порядку $10^{-3} \%$ за досить невисоку вартість, навіть не зважаючи на кризу напівпровідників. Такий метод також можна зустріти серед саморобних або недорогих вимірювачів частоти. Даний метод надалі буде взятий за основу для побудови частотоміра.

Відповідно до рис. 2.6 вхідна напруга U_f з частотою f_x нормується масштабуючим пристроєм МП до номінальної, сумісної з обчислювальною системою. У формувачі інтервалів ФІ задається строб-імпульс тривалості $T_{вим}$ (рис. 2.7, а), що визначає час усередненого вимірювання.

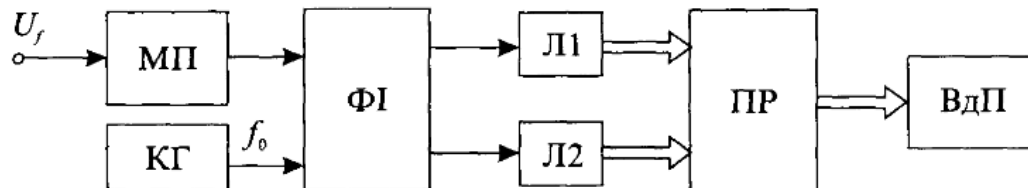


Рисунок 2.6 — Спрощена структурна схема обчислювального частотоміра

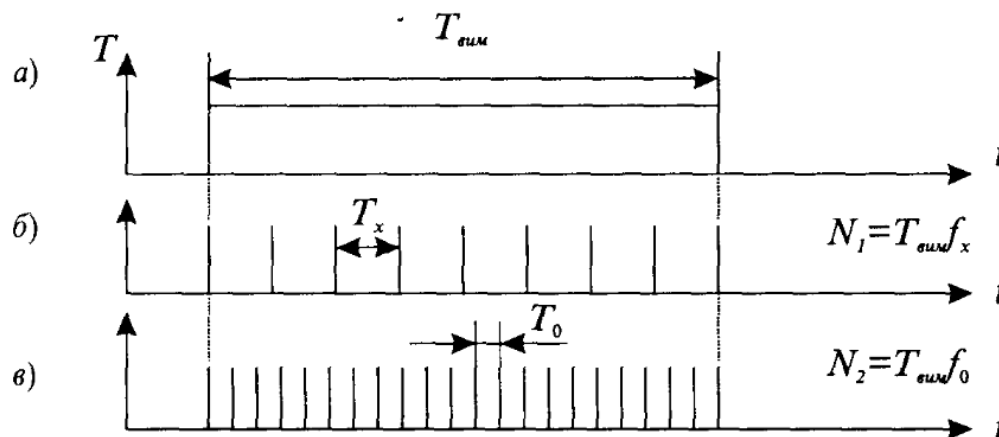


Рисунок 2.7 — Часові діаграми обчислювального частотоміра

На лічильник Л1 надходить послідовність імпульсів кількістю N_1 вхідного сигналу, синхронизованого з переднім та заднім фронтами строб-імпульса $T_{вим}$ (рис. 2.7, б) так, що:

$$N_1 = T_{вим} f_x \quad (2.6)$$

Одночасно, починаючи з переднього фронту $T_{вим}$, лічильником Л2 визначається кількість імпульсів N_2 кварцевого генератора КГ (рис. 1.7, в)

$$N_2 = T_{вим} f_0 \quad (2.7)$$

Таким чином, процесором ПР обчислюється усереднене за строб-імпульс $T_{вим}$ співвідношення частот:

$$N = \frac{N_1}{N_2} = \frac{T_{вим} f_x}{T_{вим} f_0} = \frac{f_x}{f_0}, \quad (2.8)$$

результат якого фіксується відліковим пристроєм (наприклад виводиться на графічний дисплей).

Відносну похибку δ виміру можна визначити як обернено пропорційну величину до добутку еталонної частоти f_0 та строб-імпульсу (часу виміру) $T_{вим}$:

$$\delta = \frac{1}{f_0 T_{вим}} \quad (2.9)$$

З цього випливає, що отримати низьку похибку δ можна, збільшивши час вимірювання або підвищивши частоту f_0 [19]. За рахунок збільшення частоти еталонного генератора можна отримати високу точність навіть за малих інтервалів вимірювання. Таким чином, метод є точним і швидким при побудові частотомірів на сучасних мікроконтролерах, тактова частота яких вимірюється десятками мегагерц.

2.3.2 Конвеєрний метод вимірювання

Обчислювальний (зворотного рахунку) метод передбачає вимірювання протягом обмеженого часового інтервалу. Коли цей інтервал закінчується,

					PI91.411711.001 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		19

обчислювальній системі потрібен деякий час для виконання обробки даних і розрахунків. Це призводить до того, що частина сигналу і інформації про нього втрачається перед тим, як почнеться нове вимірювання після завершення попереднього. Для того, щоб запобігти цьому необхідно забезпечити вимірювання сигналу без зупинок системи на обчислення. Конвеєрний метод передбачає початок вимірювання частоти з нового інтервалу (строб-імпульса) такої ж довжини ще до того, як завершиться минулий, тобто зсунутого в часі.

На рисунку 2.8 якісно зображено принцип конвеєрного обчислення [20]. Інструкція 1 виконується в 5 тактів. Після завершення одного такту починається паралельне виконання наступної інструкції над тими самими даними незважаючи на те, що перша не закінчилася. В результаті за 9 відліків часу $t_0 \dots t_8$ виконується 5 інструкцій по 5 тактів. В порівнянні з послідовним обчисленням, що вимагало б 25 відліків в даному випадку, конвеєрний підхід продуктивніше майже втричі.

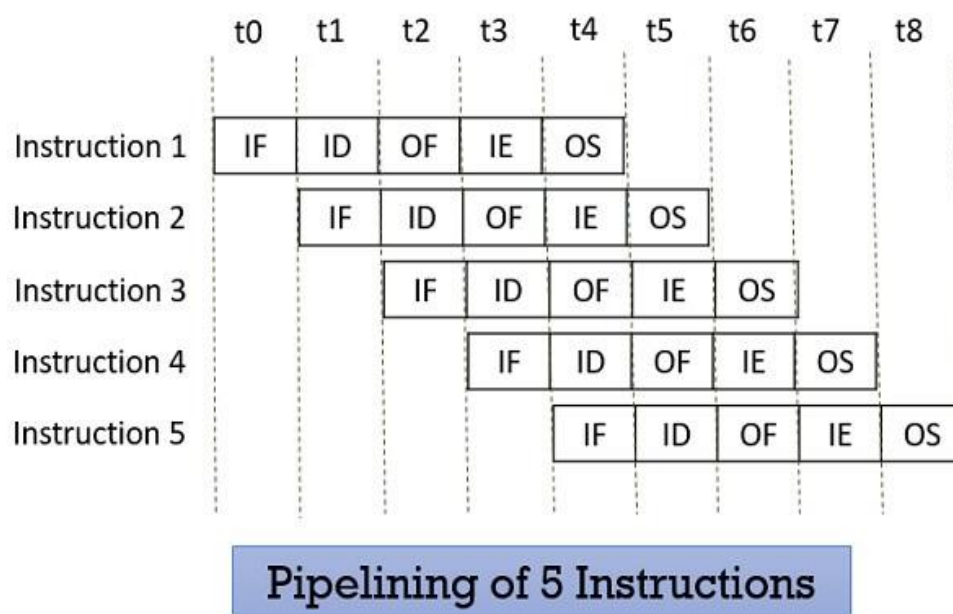


Рисунок 2.8 — Конвеєризація п'яти обчислювальних інструкцій

Таким чином, результати обробки передаються від одного обчислювального блока до іншого по ланцюгу, завдяки чому стає можливим добитись співпадіння вимірювальних операцій з паралельним фіксуванням значень частоти одного

сигналу, однак ці фіксації будуть зсунуті у часі одна відносно іншої на короткий інтервал [21].

Розглянемо аналогічний до рис. 2.8 приклад, де оброблюваними даними виступатиме сигнал. Одна й та ж інструкція (вимірювання частоти) буде виконуватись конвеєрно зі зсувом рівним t_i , $i = 0 \dots 8$ до одного сигналу (рис. 2.9)

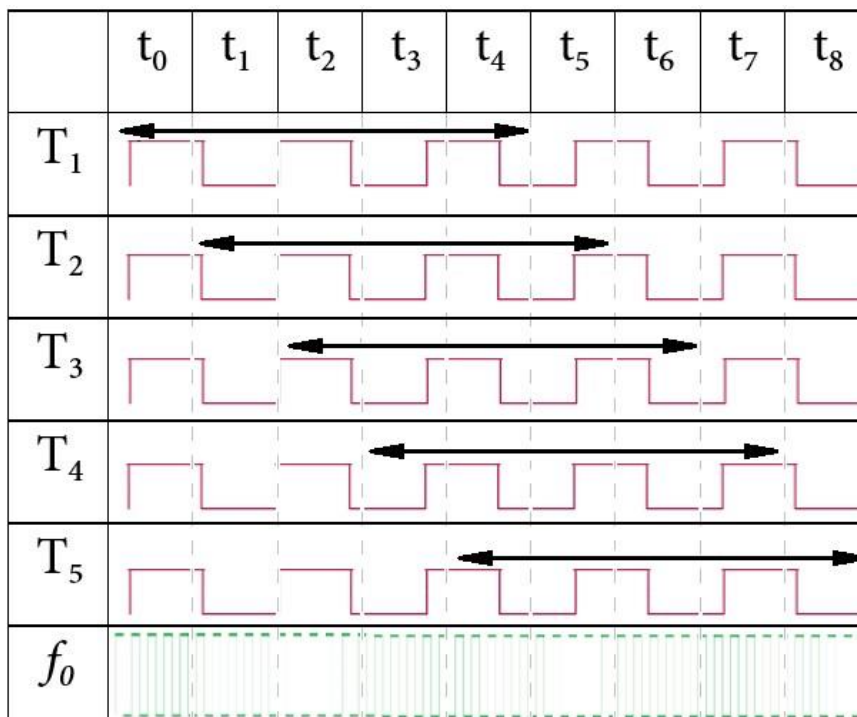


Рисунок 2.9 — Конвеєрне вимірювання частоти

$T_1 - T_5$ є однаковими інтервалами вимірювання. Незалежно від типу даних, принцип оптимізації обчислень залишається таким же ефективним, що дозволяє отримати частотомір, який не втрачає інформацію про досліджуваний сигнал, оскільки виконує вимірювання неперервно.

Реалізувати даний алгоритм можна на сучасних мікроконтролерах, що містять в своїй будові і тактовий генератор, що забезпечить стабільну еталонну частоту, і таймери, що виступатимуть лічильниками та рахуватимуть кількість періодів сигналу за обраний проміжок часу, а отже і частоту.

2.4 Вимірювання частоти радіоелектронної продукції на масовому виробництві

Виробництво радіоелектронної апаратури на підприємствах використовує автоматизовані методи та засоби вимірювання частоти. Основною метою цих методів і засобів є забезпечення високої точності та ефективності вимірювання частоти при виробництві.

Деякі автоматизовані методи вимірювання частоти включають в себе використання спеціалізованих приладів, таких як вимірювачі частоти, спектральні аналізатори та векторні мережеві аналізатори. Ці прилади здатні швидко та точно виміряти частоту сигналів, проводити аналіз спектра сигналу та перевіряти параметри електронних компонентів.

Крім того, в автоматизованому виробництві радіоелектронної апаратури можуть використовуватися програмні засоби для контролю і вимірювання частоти. Наприклад, спеціалізоване програмне забезпечення може бути використане для контролю і калібрування вимірювального обладнання, а також для автоматичного збору та аналізу даних вимірювання.

Під час проходження переддипломної практики було проведено роботу з тестування радіоелектронної продукції на основі трансивера RFM69CW (рис. 2.10), його аналогів. Він використовується для бездротового зв'язку на середніх дальностях і має велику популярність в галузі радіоелектроніки та IoT-проектах.

RFM69CW підтримує декілька режимів роботи, включаючи передачу, прийом та режим сну для збереження енергії. Він має досить широкий діапазон передачі даних – 868/915 МГц і може використовуватися для забезпечення бездротового зв'язку на відстані до декількох сотень метрів в залежності від умов і середовища.

Більш того, в продукції застосовуються інші прийнятно-передавальні модулі, такі як Johanson RF Balun 0850BM14E0016T (рис. 2.11), що є типовим

балансним трансформатором (балуном) в радіочастотному діапазоні 770 – 928 МГц. Він призначений для забезпечення сполучення між незбалансованими та балансними сигналами в радіоприймачах і передавачах.



Рисунок 2.10 — Трансивер RFM69CW



Рисунок 2.11 — Johanson RF Balun 0850BM14E0016T

Для перевірки на відповідність параметрів роботи радіомодулів застосовуються автоматизовані тестувальні блоки розроблені на підприємстві. Дане обладнання містить вбудований частотомір, що застосовується для аналізу відхилення робочої частоти трансиверу. Також, при тестуванні кожної одиниці продукції обов'язково вимірюється параметр RSSI (Received Signal Strength Indicator) для прийому та передачі радіосигналу, що представляє силу сигналу віддаленого передавача, який сприймається приймачем. Даний параметр дозволяє визначити інтенсивність робочого сигналу трансивера і вимірюється в децибелах (дБ). На дану величину відхилення робочої частоти радіомодуля більше за допустиме може вплинути негативно. Наприклад, невідповідність робочої частоти може призвести до спотворень прийнятого сигналу, що може бути наслідком інтерференції з іншими сигналами або неправильним налаштуванням передавача і, як наслідок, знизить його інтенсивність.

Застосування автоматизованих методів та засобів вимірювання частоти дозволяє забезпечити високу якість і надійність виробленої радіоелектронної апаратури, скоротити час налаштування та тестування продукції, а також забезпечити відповідність вимогам технічних специфікацій і стандартів. Однак, дане обладнання має високу вартість та доцільне лише для великих підприємств.

					<i>PI91.411711.001 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		24

3 ОБҐРУНТУВАННЯ СХЕМОТЕХНІЧНОГО РІШЕННЯ

3.1 Схема структурна пристрою

Для запропонованого методу вимірювання частоти пристрій реалізовано на основі обчислень мікроконтролера STM32F103C8T6. На схемі структурній (рис. 3.1) зображено основні складові.

Живлення пристрою здійснюється двома способами: через USB або внутрішній літій-іонний акумулятор (ЛІА), для якого використано контролер заряду. Для коректної роботи і виконання обчислень мікроконтролер вимагає стабілізованої напруги живлення, яка досягається регулятором напруги зі стабілізацією в 3,3 В на виході AP2112-3.3.

На вхід мікроконтролера через тригер Шміта подається сигнал, частота якого в результаті виконання програми виводиться на OLED дисплей, під'єднаний через шину SPI (Serial Peripheral Interface). Оскільки суть конвеєрного методу вимірювання частоти ґрунтується на безперервній роботі частотоміра, головна мета – досягти постійного виведення значень вимірюваної частоти сигналу в графічному вигляді з безперервним оновленням зображення на дисплеї.

Увімкнення, вимкнення пристрою, контроль графічного виведення інформації на дисплеї керується кнопками (RNG, T, HLD, ON/Off).

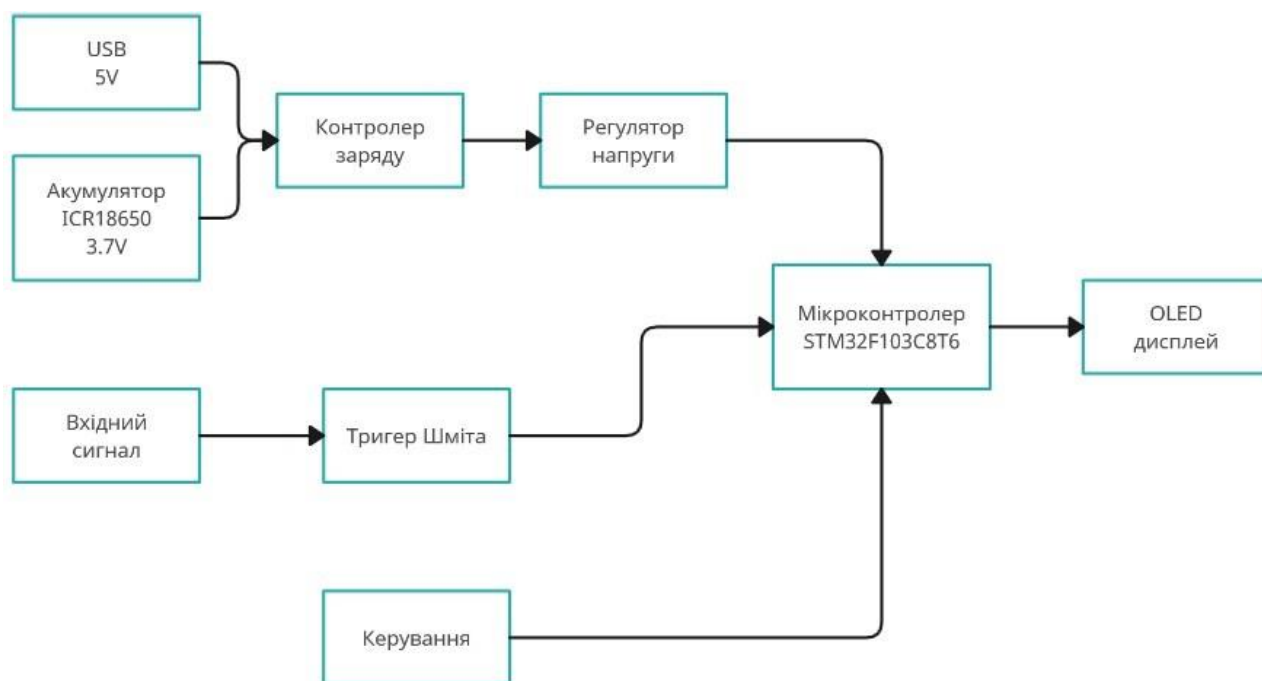


Рисунок 3.1 — Схема структурна вимірювача частоти

3.2 Опис схеми електричної принципової

3.2.1 Опис живлення мікроконтролера

Побудову схеми електричної принципової виконано в програмному середовищі Altium Designer [22].

Згідно з технічною документацією, мікроконтролер STM32F103C8T6 має робочу напругу в діапазоні 2...3,6 В, а використовуваний графічний дисплей – 2,8...5,5 В. Це головні цифрові елементи пристрою, тому бажано створити єдину лінію живлення з напругою, типовою для обох компонентів. Згідно з технічною документацією, найкраще підходить напруга 3,3 В.

В пристрої застосовано контролер заряду DA2 (рис. 3.2) для ЛІА. Струм заряду I_{BAT} задається резистором R8 опором 1,2 кОм. Згідно з документацією контролера, струм заряду батареї:

$$I_{BAT} = \frac{V_{prog}}{R8} \cdot 1200 = \frac{1B}{1,2k\Omega} \cdot 1200 = 1A \quad (3.1)$$

					PI91.411711.001 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		26

Шотткі VD1 з метою запобігання витоку струму акумулятора в схему під час живлення і заряду від USB та навпаки. Між контактами 1 (Input) і 3 (Enable) використано натискний перемикач (кнопку з факсацією) SW1 для увімкнення та вимкнення пристрою.

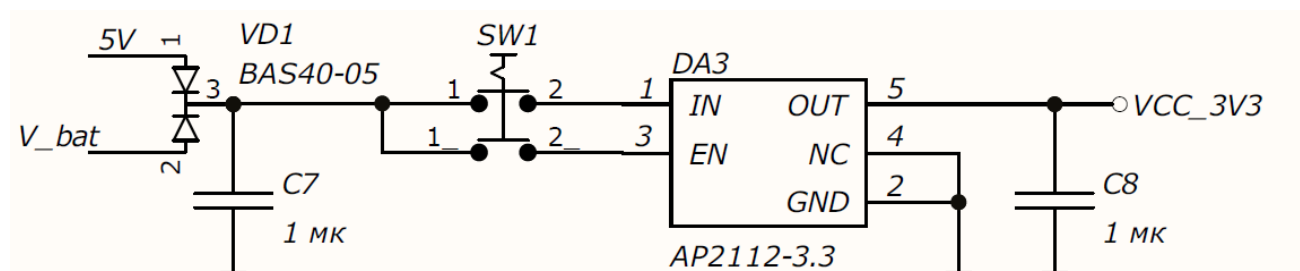


Рисунок 3.3 — Схема принципова включення регулятора напруги

3.2.2 Опис подачі вхідного сигналу

В якості вхідного сигналу буде використовуватися цифровий сигнал, що сумісний з TTL/CMOS 3,3В. Напруга оброблюваного сигналу має бути в межах робочої напруги мікроконтролера – 2...3,6В. З роз'єму зовнішній сигнал подається на вхід неінвертуючого тригера Шміта DA1 (рис. 3.4) для фільтрації та регулювання рівню напруги послідовності імпульсів (рис. 3.5) перед подачею на вхід мікроконтролера D1. Явище гістерезису в роботі тригера Шміта дозволяє отримувати на виході послідовність прямокутних імпульсів (або наближення до них) з сигналів іншої форми

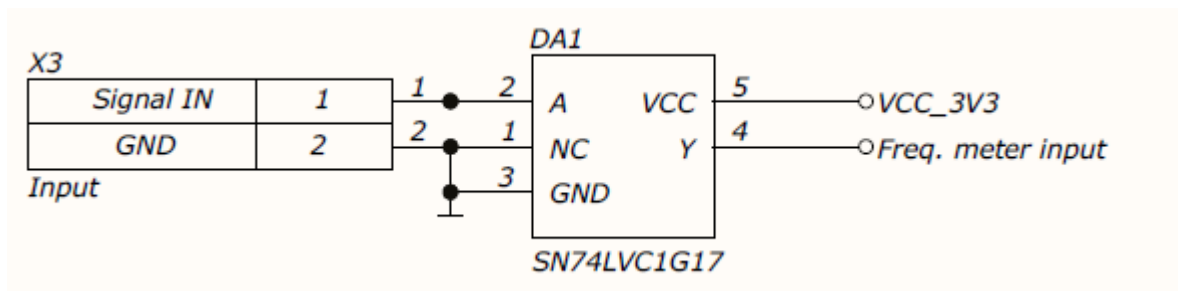


Рисунок 3.4 — Включення тригера Шміта SN74AUP1T14

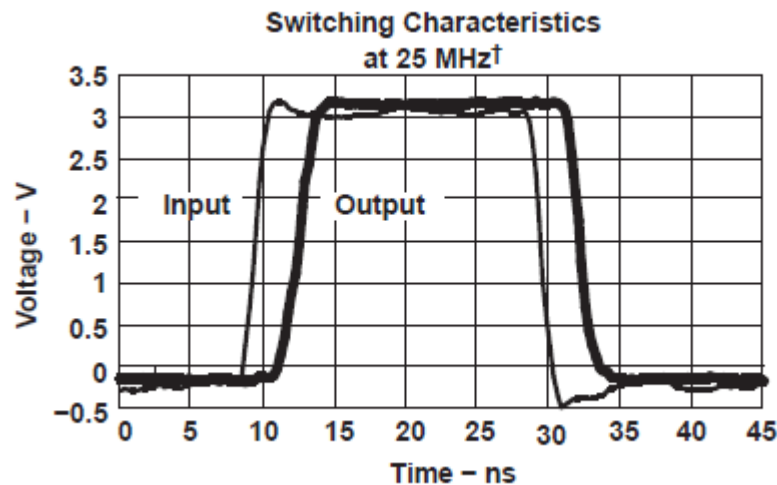


Рисунок 3.5 — Передавальна характеристика тригера Шміта SN74AUP1T14 на 25 МГц

Вхідний сигнал з DA1 буде подаватися на пін PA6 мікроконтролера, який є вхідним виводом і використовується для підключення зовнішнього сигналу до таймера. Опорним сигналом для частотоміра буде системний тактовий сигнал мікроконтролера.

3.2.3 Опис ліній виведення та керування вихідною інформацією

Для відображення інформації використовується OLED дисплей на контролері SSD1306, підключений через шину SPI для забезпечення якомога швидшої передачі інформації від мікроконтролера з метою забезпечення високої частоти оновлення зображення. На схемі також наявні чотири кнопки керування пристроєм (SW1 – ON/OFF, SW2 – T, SW3 – RNG, SW4 – HLD) (рис. 3.6).

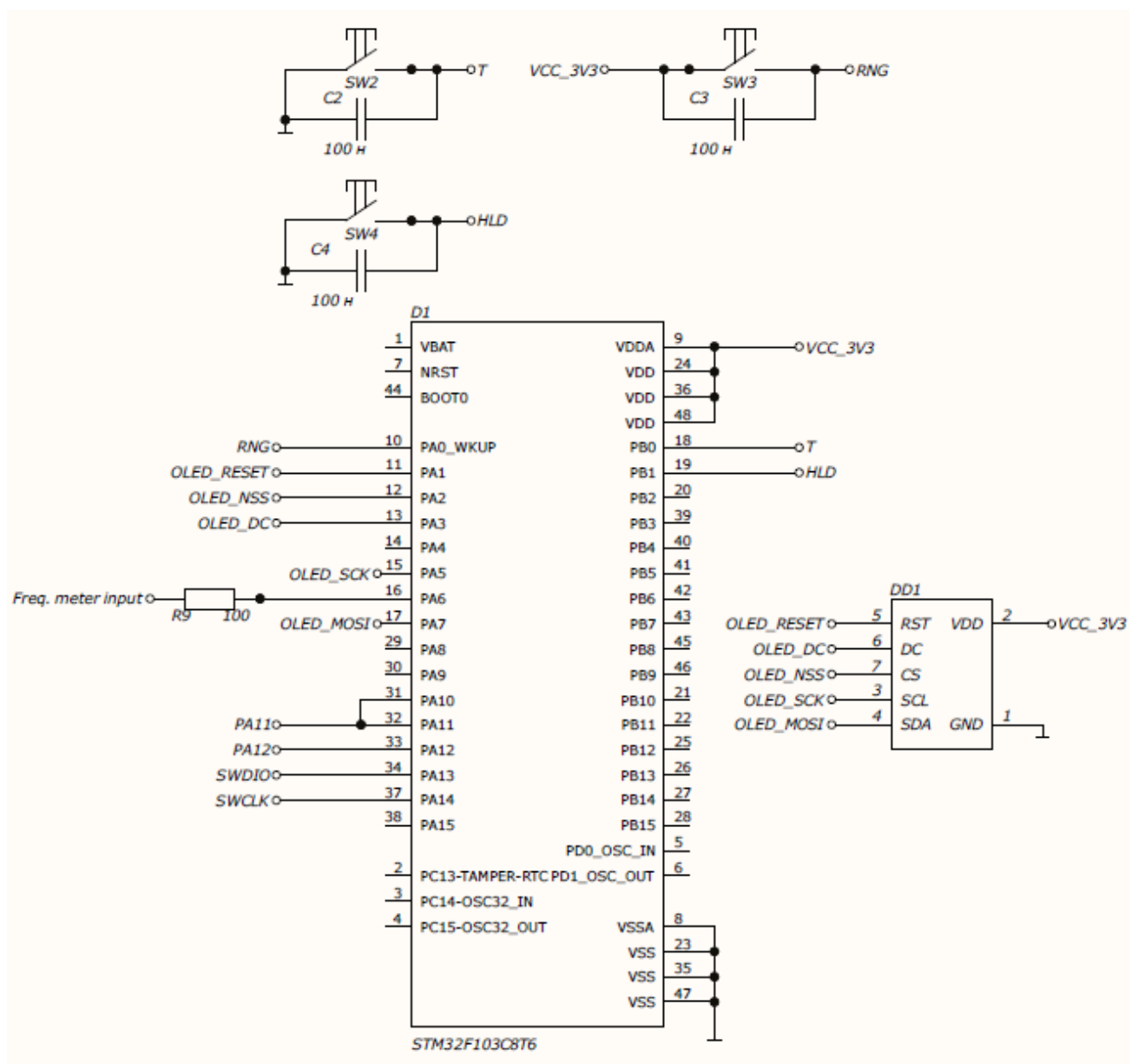


Рисунок 3.6 — Мікроконтролер та органи керування частотоміра.

3.3 Програмна частина

3.3.1 Блок схема програми



Рисунок 9 — Блок схема програми

3.3.2 Реалізація програмного коду

Код ініціалізує необхідні апаратні периферійні пристрої, такі як внутрішні таймери мікроконтролера для вимірювання частоти сигналу.

Функція StartMeas використовується для запуску процесу вимірювання частоти, що приймає три аргументи: timerDiv1, timerDiv2 і bufferSize, які визначають параметри синхронізації та розмір буфера даних. Якщо вхідні аргументи дійсні, починається процес вимірювання. Після початку вимірювання ініціалізуються глобальні змінні і скидається буфер даних, щоб підготуватися до зберігання даних частоти. Необхідні таймери налаштовуються за допомогою отриманих параметрів синхронізації.

Входи таймерів реагують на зовнішні переривання для подальшої фіксації вхідного сигналу. Функція ProcessMeasRes неодноразово викликається в основному циклі для обробки результатів вимірювань. Якщо доступні нові дані, вона отримує дані з буфера та виконує дії з обчисленими значеннями. Обробник переривань таймера TIM1 фіксує значення таймера TIM2 (що представляє значення «m») і додає його до буфера даних, після чого обробник переривань TIM3 фіксує значення лічильника TIM2 (що представляє значення "n") і додає його до буфера даних.

Приклад програмного коду наведено у додатку Б.

3.4 Особливості експлуатації розроблюваного приладу

3.4.1 Інформація на дисплеї

На дисплеї частотоміра відображаються такі дані:

- *F*: частота вхідного сигналу;
- *H*: утримування результату (останнє зафіксоване значення виміру буде залишатись на екрані);
- *T*: період вхідної частоти;
- *Int*: тривалість строб-імпульсу.

3.4.2 Керування

Керування пристроєм відбувається чотирма кнопками:

- *ON/OFF*: ввімкнення;
- *RNG*: вибір одиниць величини (Гц, кГц, МГц);
- *HLD*: відображення останнього значення перед натиском;
- *T*: вибір тривалості строб-імпульсу.

4 ВИБІР ЕЛЕМЕНТНОЇ БАЗИ

4.1 Вибір мікроконтролера

Для частотоміру, представленого в дипломному проєкті обрано мікроконтролер STM32F103C8T6. На сьогодні є дуже розповсюдженою плата розробника «Blue Pill», в якій використовується даний мікроконтролер. Вона вже має ряд виведених контактів, що дозволяє підключати до неї зовнішні пристрої, такі як сенсори, актуатори, дисплеї і т.д., через що є дуже зручною для прототипування. За умови використання STM32F103C8T6 як окремого компонента, він все одно задовольняє всі вимоги по характеристикам для даного проєкту і є дешевшим за інші мікроконтролери STM32 з ядром Cortex-M3 з 32-бітною архітектурою та робочою частотою 72 МГц. Корпус обрано типу LQFT-48 для поверхневого монтажу (рисунок 4.1). Необхідною для реалізації конвеєрного обрахунку є наявність вбудованих таймерів, які виступатимуть в ролі лічильників.

Таблиця 4.1 — Характеристики мікроконтролера STM32F103C8T6

Напруга живлення	2,0...3,6 В
Робоча частота	72 МГц
Постійна пам'ять	64 кБ
Оперативна пам'ять	20 кБ
Кількість ліній вводу/виводу	32
Таймери	4 по 16 біт
Інтерфейси	2xSPI, 2xI2C, 3xUSART, USB, CAN
Робоча температура	-40...+85°C

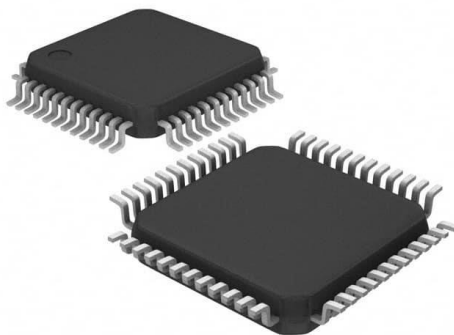


Рисунок 4.1 — Мікроконтролер в корпусі LQFT-48

4.2 Елементи живлення пристрою

4.2.1 Акумулятор

В якості внутрішнього акумулятора обрано ЛІА ICR18650 напруги 3,7 В, ємності 1800 мАг. В магазинах електроніки або радіоелементів такий тип акумуляторів є досить поширеним і нерідко можна знайти акумулятор з виведеними провідниками, зафіксованими в одному роз'ємі зі стандартним кроком 2,54 мм (рис. 4.2).

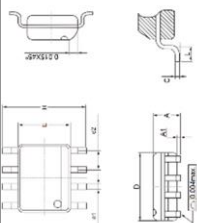
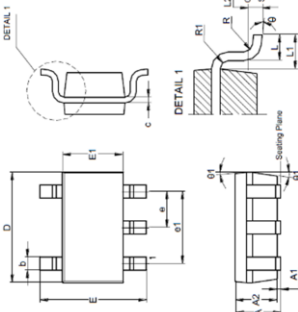
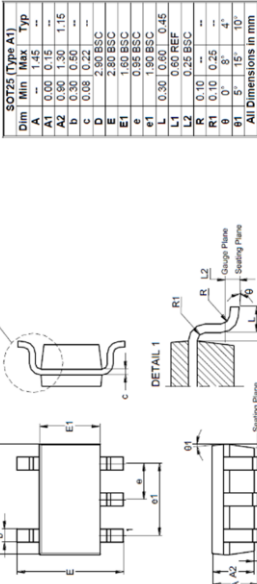


Рисунок 4.2 — Акумулятор ICR18650

4.2.2 Елементи керування напругою

Для зручності наступні елементи можна звести в таблицю (табл. 4.2)

Таблиця 4.2 — Елементи керування напругою

Назва компонента	Тип компонента	Тип корпусу	Кресленник корпусу																																																																																				
ТР4056	Лінійний контролер заряду ЛПА	SOP-8	<table><tr><th colspan="2">DIMENSIONS</th><th colspan="2">MIN.</th><th colspan="2">MAX.</th></tr><tr><th>UNIT</th><th>MILLIMETERS</th><th></th><th></th><th></th><th></th></tr><tr><td>A</td><td>1.75</td><td>1.75</td><td>1.75</td><td>2.093</td><td>0.001</td></tr><tr><td>A1</td><td>0.10</td><td>0.17</td><td>0.25</td><td>0.004</td><td>0.007</td></tr><tr><td>C</td><td>0.18</td><td>0.18</td><td>0.18</td><td>0.18</td><td>0.010</td></tr><tr><td>D</td><td>0.85</td><td>0.85</td><td>0.85</td><td>0.189</td><td>0.197</td></tr><tr><td>E</td><td>0.85</td><td>0.85</td><td>0.85</td><td>0.150</td><td>0.154</td></tr><tr><td>F</td><td>0.85</td><td>0.85</td><td>0.85</td><td>0.239</td><td>0.238</td></tr><tr><td>G</td><td>0.85</td><td>0.85</td><td>0.85</td><td>0.274</td><td>0.268</td></tr><tr><td>H</td><td>0.85</td><td>0.85</td><td>0.85</td><td>0.252</td><td>0.252</td></tr><tr><td>I</td><td>0.85</td><td>0.85</td><td>0.85</td><td>0.252</td><td>0.252</td></tr><tr><td>J</td><td>0.85</td><td>0.85</td><td>0.85</td><td>0.252</td><td>0.252</td></tr><tr><td>K</td><td>0.85</td><td>0.85</td><td>0.85</td><td>0.252</td><td>0.252</td></tr><tr><td>L</td><td>0.85</td><td>0.85</td><td>0.85</td><td>0.252</td><td>0.252</td></tr></table>	DIMENSIONS		MIN.		MAX.		UNIT	MILLIMETERS					A	1.75	1.75	1.75	2.093	0.001	A1	0.10	0.17	0.25	0.004	0.007	C	0.18	0.18	0.18	0.18	0.010	D	0.85	0.85	0.85	0.189	0.197	E	0.85	0.85	0.85	0.150	0.154	F	0.85	0.85	0.85	0.239	0.238	G	0.85	0.85	0.85	0.274	0.268	H	0.85	0.85	0.85	0.252	0.252	I	0.85	0.85	0.85	0.252	0.252	J	0.85	0.85	0.85	0.252	0.252	K	0.85	0.85	0.85	0.252	0.252	L	0.85	0.85	0.85	0.252	0.252
DIMENSIONS		MIN.		MAX.																																																																																			
UNIT	MILLIMETERS																																																																																						
A	1.75	1.75	1.75	2.093	0.001																																																																																		
A1	0.10	0.17	0.25	0.004	0.007																																																																																		
C	0.18	0.18	0.18	0.18	0.010																																																																																		
D	0.85	0.85	0.85	0.189	0.197																																																																																		
E	0.85	0.85	0.85	0.150	0.154																																																																																		
F	0.85	0.85	0.85	0.239	0.238																																																																																		
G	0.85	0.85	0.85	0.274	0.268																																																																																		
H	0.85	0.85	0.85	0.252	0.252																																																																																		
I	0.85	0.85	0.85	0.252	0.252																																																																																		
J	0.85	0.85	0.85	0.252	0.252																																																																																		
K	0.85	0.85	0.85	0.252	0.252																																																																																		
L	0.85	0.85	0.85	0.252	0.252																																																																																		
SN74LVC1G17	Неінвертуючий тригер Шміта	SOT-25	<table><tr><th colspan="2">DIMENSIONS</th><th colspan="2">MIN.</th><th colspan="2">MAX.</th></tr><tr><th>UNIT</th><th>MILLIMETERS</th><th></th><th></th><th></th><th></th></tr><tr><td>A</td><td>1.75</td><td>1.75</td><td>1.75</td><td>2.093</td><td>0.001</td></tr><tr><td>A1</td><td>0.10</td><td>0.17</td><td>0.25</td><td>0.004</td><td>0.007</td></tr><tr><td>C</td><td>0.18</td><td>0.18</td><td>0.18</td><td>0.18</td><td>0.010</td></tr><tr><td>D</td><td>0.85</td><td>0.85</td><td>0.85</td><td>0.189</td><td>0.197</td></tr><tr><td>E</td><td>0.85</td><td>0.85</td><td>0.85</td><td>0.150</td><td>0.154</td></tr><tr><td>F</td><td>0.85</td><td>0.85</td><td>0.85</td><td>0.239</td><td>0.238</td></tr><tr><td>G</td><td>0.85</td><td>0.85</td><td>0.85</td><td>0.274</td><td>0.268</td></tr><tr><td>H</td><td>0.85</td><td>0.85</td><td>0.85</td><td>0.252</td><td>0.252</td></tr><tr><td>I</td><td>0.85</td><td>0.85</td><td>0.85</td><td>0.252</td><td>0.252</td></tr><tr><td>J</td><td>0.85</td><td>0.85</td><td>0.85</td><td>0.252</td><td>0.252</td></tr><tr><td>K</td><td>0.85</td><td>0.85</td><td>0.85</td><td>0.252</td><td>0.252</td></tr><tr><td>L</td><td>0.85</td><td>0.85</td><td>0.85</td><td>0.252</td><td>0.252</td></tr></table>	DIMENSIONS		MIN.		MAX.		UNIT	MILLIMETERS					A	1.75	1.75	1.75	2.093	0.001	A1	0.10	0.17	0.25	0.004	0.007	C	0.18	0.18	0.18	0.18	0.010	D	0.85	0.85	0.85	0.189	0.197	E	0.85	0.85	0.85	0.150	0.154	F	0.85	0.85	0.85	0.239	0.238	G	0.85	0.85	0.85	0.274	0.268	H	0.85	0.85	0.85	0.252	0.252	I	0.85	0.85	0.85	0.252	0.252	J	0.85	0.85	0.85	0.252	0.252	K	0.85	0.85	0.85	0.252	0.252	L	0.85	0.85	0.85	0.252	0.252
DIMENSIONS		MIN.		MAX.																																																																																			
UNIT	MILLIMETERS																																																																																						
A	1.75	1.75	1.75	2.093	0.001																																																																																		
A1	0.10	0.17	0.25	0.004	0.007																																																																																		
C	0.18	0.18	0.18	0.18	0.010																																																																																		
D	0.85	0.85	0.85	0.189	0.197																																																																																		
E	0.85	0.85	0.85	0.150	0.154																																																																																		
F	0.85	0.85	0.85	0.239	0.238																																																																																		
G	0.85	0.85	0.85	0.274	0.268																																																																																		
H	0.85	0.85	0.85	0.252	0.252																																																																																		
I	0.85	0.85	0.85	0.252	0.252																																																																																		
J	0.85	0.85	0.85	0.252	0.252																																																																																		
K	0.85	0.85	0.85	0.252	0.252																																																																																		
L	0.85	0.85	0.85	0.252	0.252																																																																																		
AP2112-3.3	Лінійний регулятор напруги		<table><tr><th colspan="2">DIMENSIONS</th><th colspan="2">MIN.</th><th colspan="2">MAX.</th></tr><tr><th>UNIT</th><th>MILLIMETERS</th><th></th><th></th><th></th><th></th></tr><tr><td>A</td><td>1.75</td><td>1.75</td><td>1.75</td><td>2.093</td><td>0.001</td></tr><tr><td>A1</td><td>0.10</td><td>0.17</td><td>0.25</td><td>0.004</td><td>0.007</td></tr><tr><td>C</td><td>0.18</td><td>0.18</td><td>0.18</td><td>0.18</td><td>0.010</td></tr><tr><td>D</td><td>0.85</td><td>0.85</td><td>0.85</td><td>0.189</td><td>0.197</td></tr><tr><td>E</td><td>0.85</td><td>0.85</td><td>0.85</td><td>0.150</td><td>0.154</td></tr><tr><td>F</td><td>0.85</td><td>0.85</td><td>0.85</td><td>0.239</td><td>0.238</td></tr><tr><td>G</td><td>0.85</td><td>0.85</td><td>0.85</td><td>0.274</td><td>0.268</td></tr><tr><td>H</td><td>0.85</td><td>0.85</td><td>0.85</td><td>0.252</td><td>0.252</td></tr><tr><td>I</td><td>0.85</td><td>0.85</td><td>0.85</td><td>0.252</td><td>0.252</td></tr><tr><td>J</td><td>0.85</td><td>0.85</td><td>0.85</td><td>0.252</td><td>0.252</td></tr><tr><td>K</td><td>0.85</td><td>0.85</td><td>0.85</td><td>0.252</td><td>0.252</td></tr><tr><td>L</td><td>0.85</td><td>0.85</td><td>0.85</td><td>0.252</td><td>0.252</td></tr></table>	DIMENSIONS		MIN.		MAX.		UNIT	MILLIMETERS					A	1.75	1.75	1.75	2.093	0.001	A1	0.10	0.17	0.25	0.004	0.007	C	0.18	0.18	0.18	0.18	0.010	D	0.85	0.85	0.85	0.189	0.197	E	0.85	0.85	0.85	0.150	0.154	F	0.85	0.85	0.85	0.239	0.238	G	0.85	0.85	0.85	0.274	0.268	H	0.85	0.85	0.85	0.252	0.252	I	0.85	0.85	0.85	0.252	0.252	J	0.85	0.85	0.85	0.252	0.252	K	0.85	0.85	0.85	0.252	0.252	L	0.85	0.85	0.85	0.252	0.252
DIMENSIONS		MIN.		MAX.																																																																																			
UNIT	MILLIMETERS																																																																																						
A	1.75	1.75	1.75	2.093	0.001																																																																																		
A1	0.10	0.17	0.25	0.004	0.007																																																																																		
C	0.18	0.18	0.18	0.18	0.010																																																																																		
D	0.85	0.85	0.85	0.189	0.197																																																																																		
E	0.85	0.85	0.85	0.150	0.154																																																																																		
F	0.85	0.85	0.85	0.239	0.238																																																																																		
G	0.85	0.85	0.85	0.274	0.268																																																																																		
H	0.85	0.85	0.85	0.252	0.252																																																																																		
I	0.85	0.85	0.85	0.252	0.252																																																																																		
J	0.85	0.85	0.85	0.252	0.252																																																																																		
K	0.85	0.85	0.85	0.252	0.252																																																																																		
L	0.85	0.85	0.85	0.252	0.252																																																																																		

4.2.3 Діод

Для розв'язуючого лінії живлення діоду обрано BAS40-05 в малогабаритному корпусі SOT-23 (рис. 4.3).

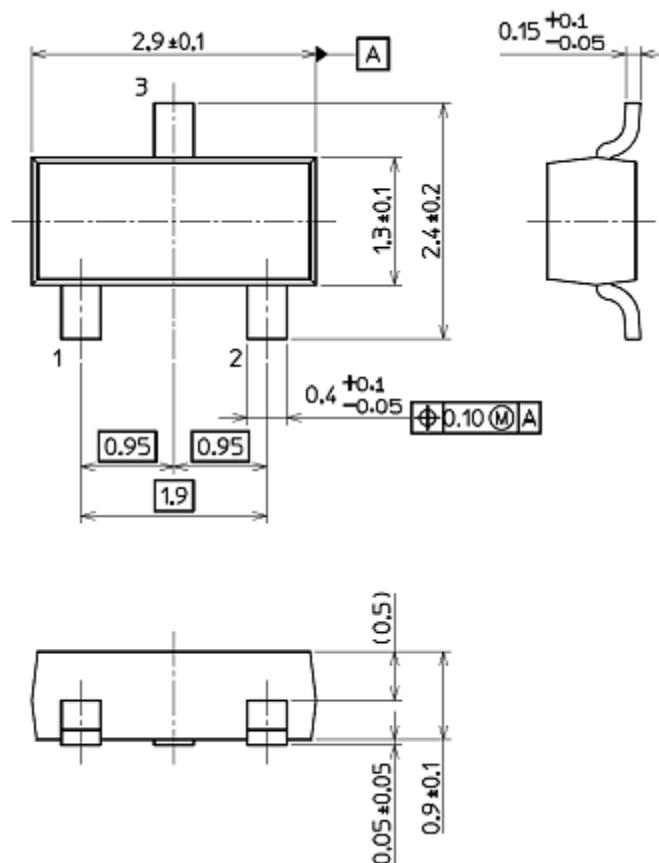
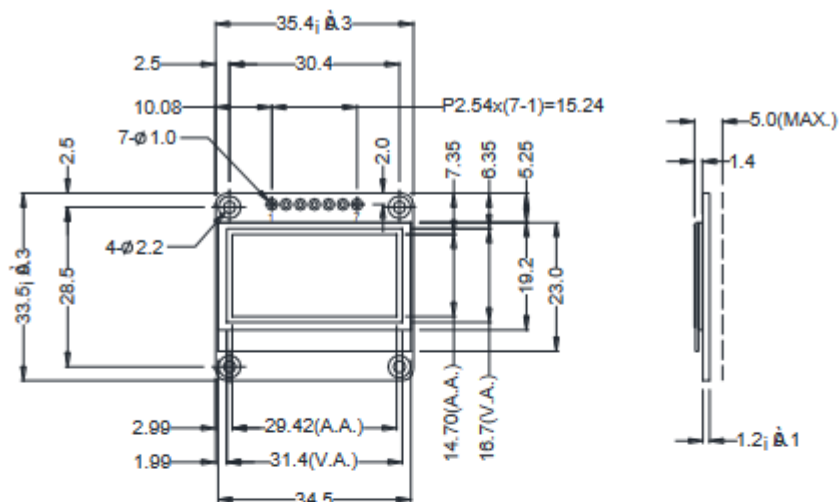


Рисунок 4.3 — Здвоєний діод Шотткі BAS40-05

4.3 Індикаторно-інформаційні елементи

4.3.1 Дисплей

В даному випадку компактний дисплей розширення 128x64 задовольнить вимоги з виведення інформації. Для проекту обрано графічний OLED дисплей на контролері SSD1306 (рисунок 4.4), що підтримує монохромне відображення і використовує шину SPI.



*SSD1306/SH1106 or equivalent
White, Blue available

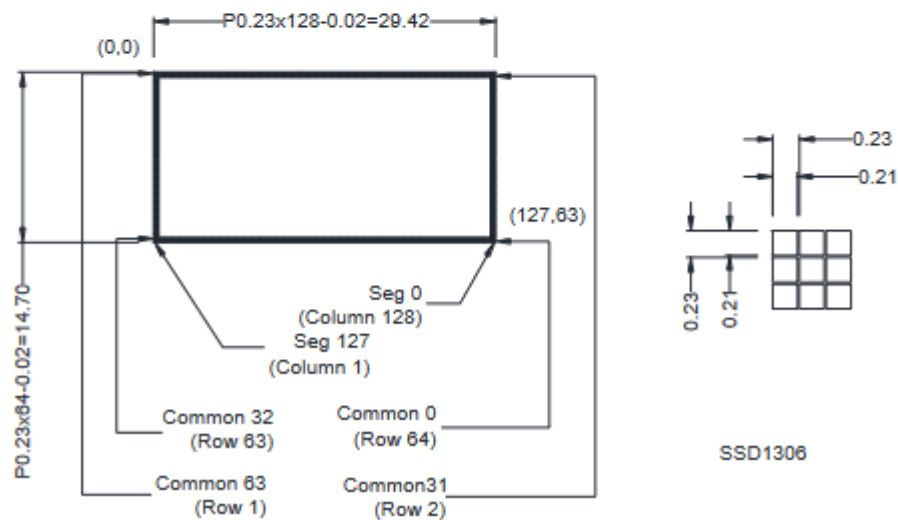


Рисунок 4.4 — Модуль OLED дисплея SSD1306

4.3.2 Світлодіоди

Для індикації заряду ЛІА використано два світлодіоди в корпусі виду 0603 (рис. 4.5) зеленого та червоного кольорів.

Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата

PI91.411711.001 ПЗ

Арк.

38

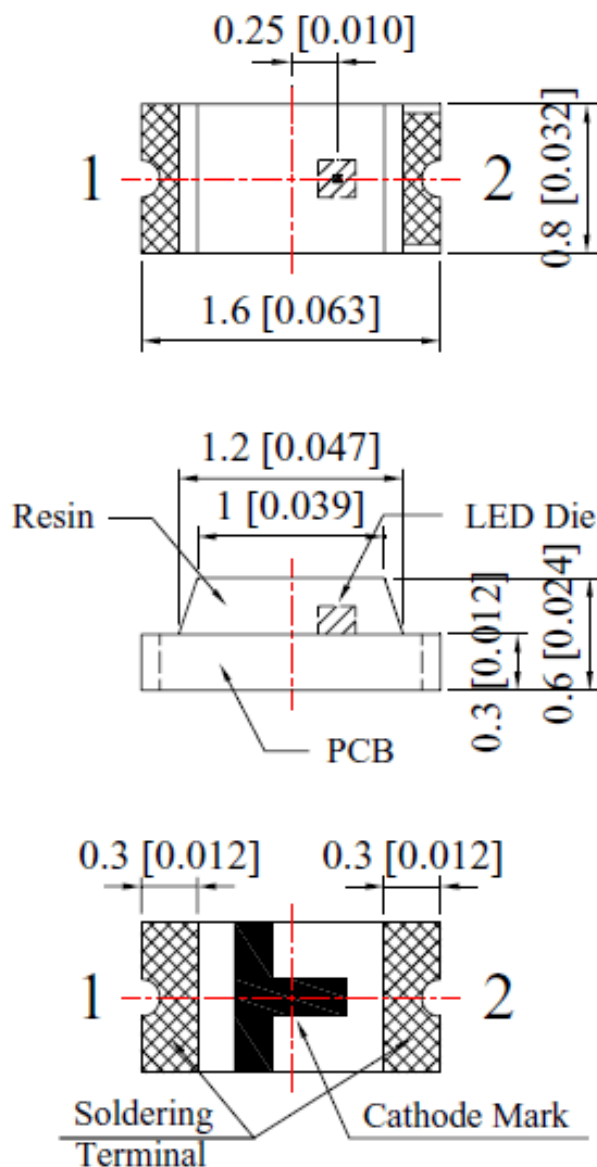


Рисунок 4.5 — Світлодіод в корпусі 0603

4.4 Пасивні компоненти

4.4.1 Резистори

Піни мікроконтролера підтримують струм до 25мА. Оскільки максимальна напруга схеми 5 В, порахуємо потужність для подальшого вибору резисторів:

$$P = IU = 25mA \cdot 5V = 0,125Wm \quad (4.1)$$

Отримана потужність величиною 0,125 Вт є номінально типовою для резисторів. Незважаючи на те, що струм споживання в 25 мА малоймовірний для даного вимірювача частоти, краще обрати резистори з запасом потужності – 0,25 Вт з метою підвищення значення надійності. Дешевим та компактним варіантом буде корпус 0402 для поверхневого монтажу (рисунок 4.6).

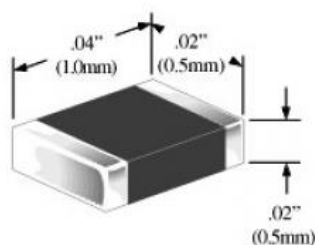


Рисунок 4.6 — SMD резистор типу 0402

4.4.2 Конденсатори

Хоч живлення пристрою є досить стабільним, однак перехідні процеси, шуми і паразитні явища часто складно передбачити. Конденсатори з підтримкою напруги в 25В цілком підходять для лінії живлення. Дешевим та компактним варіантом буде корпус 0402 (рис. 4.8) та 0603 (рис. 4.9) для 10мкФ для поверхневого монтажу (рис. 4.7).



Рисунок 4.7 — SMD конденсатор

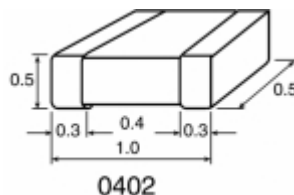


Рисунок 4.7 — SMD конденсатор типу 0402

					PI91.411711.001 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		40

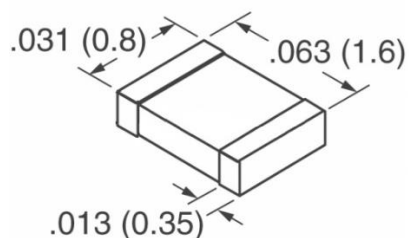


Рисунок 4.9 — SMD конденсатор типу 0603

4.5 Елементи керування

4.5.1 Кнопки

Оскільки в пристрої не протікають високі струми, достатньо буде обрати компактні та дешеві кнопки без спеціальних характеристик. Для проєкту обрано тактові кнопки поверхневого монтажу KLS7-TS6611-1.5-180 (рис. 4.10).



Рисунок 4.10 — SMD кнопка KLS7-TS6611-1.5-180

4.5.2 Перемикачі

З метою увімкнення і вимкнення пристрою по живленню мікроконтролера використовується натискна кнопка з фіксацією KLS7-P розмірами 12,5x7x7 мм для монтажу через отвори (рис. 4.11).

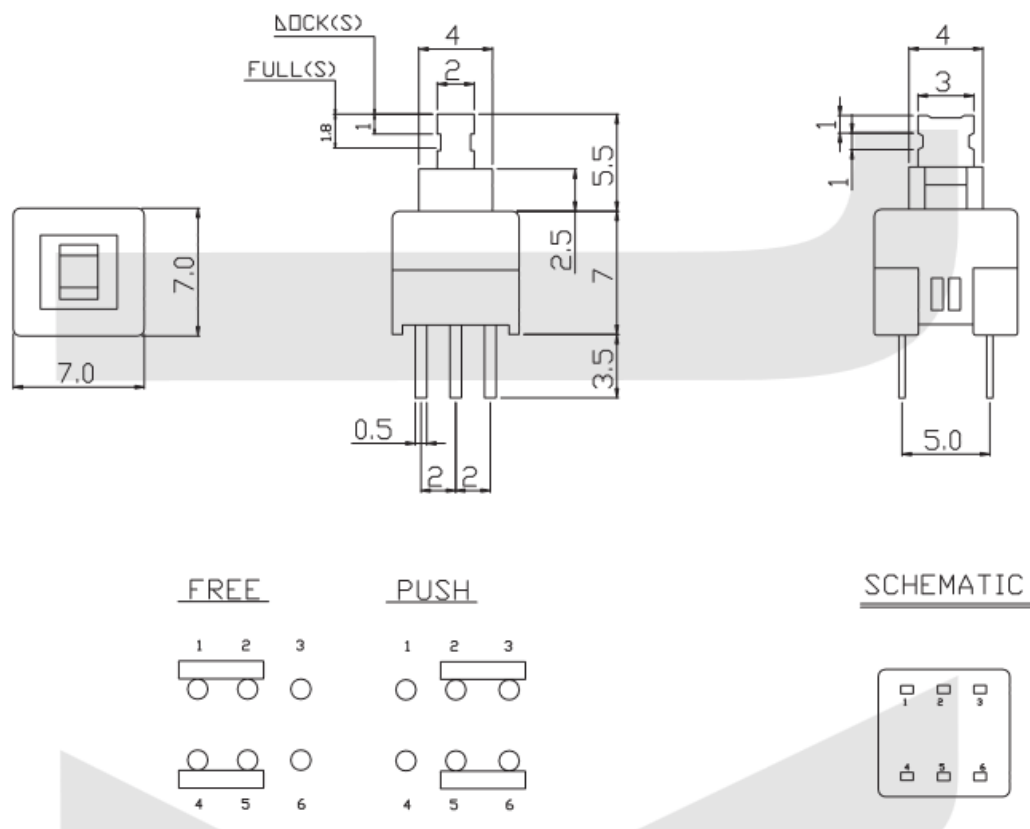


Рисунок 4.11 — Натискна кнопка KLS7-P

4.6 Роз'єми

Для живлення від USB обрано роз'єм KLS1-233-1-0-0-T-KLS для поверхневого монтажу (рис. 4.12).

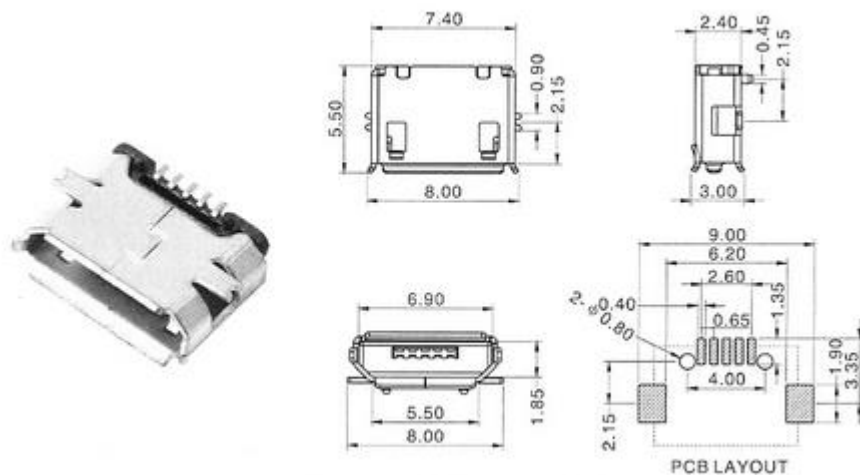


Рисунок 4.12 — USB-micro KLS1-233-1-0-0-T-KLS

Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата

PI91.411711.001 ПЗ

Арк.

42

Вхідний сигнал подається на пристрій через типовий боковий роз'єм з двома штирями JST_S2B-PH-K-S (рис. 4.13). Оскільки пристрій сумісний лише з сигналами 3,3 В і не містить блоку обробки складних аналогових сигналів, немає необхідності застосовувати для сигнального входу спеціальні дорогі роз'єми типу коаксіальних.

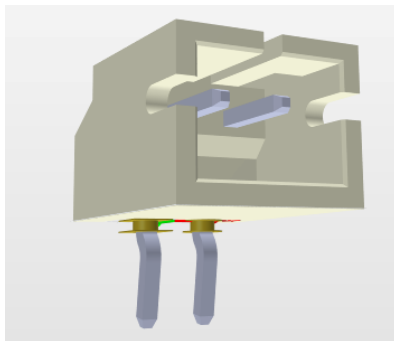


Рисунок 4.13 — USB-micro KLS1-233-1-0-0-T-KLS

5 РОЗРОБКА ЕЛЕКТРОННОГО МОДУЛЯ

5.1 Аналіз з точки зору конструктора

5.1.1 Визначення особливостей конструкції електронного модуля

Оскільки вимірювач частоти сумісний з TTL/CMOS 3,3 В, його можна розглядати як дискретний вимірювальний прилад, так і, наприклад, складовою частиною деякої радіоелектронної системи з необхідністю слідкувати за значенням частоти. Згідно з ТЗ (додаток А), пристрій призначений для використання в нормальних умовах, наприклад в лабораторії, і специфічних вимог до конструкції не висувається. Виходячи з ТЗ і обраної елементної бази, необхідно спроектувати максимально компактний електронний модуль (ЕМ) з міркувань економії витратних матеріалів та простору.

Очевидна сильна відмінність габаритних розмірів модуля графічного дисплею. Для економії корисної площі прийнято рішення розміщувати дисплей паралельно головній ДП над іншими компонентами і підключати його через 7-контактний штиревий роз'єм.

5.1.2 Визначення способу кріплення ЕМ в корпус

Оскільки для виведення графічного зображення використано готовий модуль з дисплеєм, який вже має отвори діаметром 2,2 мм і розміщується над платою пристрою, це буде використано для монтажу ЕМ в корпус. Розташовані по діагоналі відносно дисплею два отвори будуть використані для кріплення ЕМ частотоміра до основи корпусу гвинтами М2.2. Тому в ДП виконано отвори під фіксацію ЕМ в корпусі циліндричними стовпцями з передбаченим посадочним місцем.

					PI91.411711.001 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		44

5.1.3 Визначення способу підключення елементів живлення

ЛПА підключається до штиревого роз'єму, встановленого на ДП через два провідники. Рекомендується використовувати готову збірку акумулятора з виведеними провідниками (рис. 4.2). В корпусі передбачено готовий пластиковий тримач, що клеїться до основи корпусу, а його розміщення в конструкції визначене двома готовими виступами для фіксації. Даний тримач підходить як для ЛПА з провідниками, так і без. В останньому випадку від тримача до штиревого роз'єму на ДП приєднуються провідники вхідним роз'ємом або припаюються. В разі застосування терморезистора для аварійної зупинки заряду ЛПА, він розміщується між тримачем і акумулятором, впритул до поверхні останнього.

5.2 Аналіз з точки зору технолога

5.2.1 Обґрунтування рішень щодо виготовлення ДП

Згідно зі схемою електричною принциповою та обраною елементною базою, на ДП розміщено здебільшого компоненти поверхневого монтажу, однак присутні й компоненти з виводами. ДП матиме односторонній монтаж та два шари металізації, що згідно з J-STD-013 [23] і National Technology Roadmap for Electronic Interconnections [24] визначає тип монтажу 1 — компоненти встановлені тільки на одну сторону та клас С — компоненти, монтовані в отвори і поверхнево монтовані компоненти(рис. 5.1).

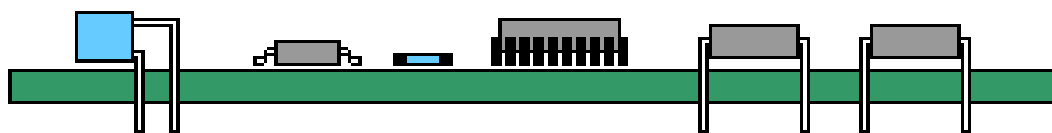


Рисунок 5.1 — Умовний вигляд з боку ДП

Для виготовлення ДП потрібно витравити провідники, просверлити отвори, нанести захисні покриття, шовкографію та лак.

					PI91.411711.001 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		45

5.2.2 Вибір матеріалу

Для виготовлення ДП використовують гетинакс або склотекстоліт з одним або більше шарами металізації. Матеріалом ДП обрано склотекстоліт фольгований міддю СФ — 2 — 35/35 — 1.5. Склотекстоліт має високу механічну міцність, термостійкість, низькі втрати, високий поверхневий опір.

5.2.3 Вибір класу точності ДП

Оскільки плата передбачає наявність як планарних, так і штиревих з'єднань, проте щільність розміщених компонентів не є високою. Найменша ширина контактів у корпуса мікроконтролера LQFT-48, що становить 0,25 мм. Тоді обрано клас точності — 3 згідно з ГОСТ 23751:86 [25].

5.2.4 Розрахунок ширини друкованих провідників

Проаналізувавши схему принципову, отримано наступні значення струмів та напруг:

Таблиця 5.1 — Напруги та струми ЕМ

Тип лінії	Напруга	Струм
Силові	0 – 5 В	0 – 1000 мА
Сигнальні	0 – 5 В	0 – 25 мА

На ДП теплонавантажених компонентів немає. Найвищою температурою пристрою є температура ЛІА під час заряджання, що знаходиться поза ДП.

Відповідно до класу точності 3, далі викладено розрахунки.

Мінімальне значення ширини провідника: $t_{min} = 0,25$ мм.

Відхилення ширини провідника: $\Delta t = \pm 0,05$ мм.

Мінімально допустима ширина силового провідника з урахуванням напруг (3%) ДП визначається як:

$$t_{\min 1} = \frac{l_p I_{\max} \rho}{0,03 h_p U}, \quad (5.1)$$

де l_p — максимальна довжина провідника, мм;

$I_{\max}$ — максимальне значення струму, мА;

ρ — питомий опір провідників, Ом·мм²/м;

h_p — товщина металізації, мм;

U — падіння напруги, В.

Мінімально допустима ширина силового провідника з урахуванням струмів ДП визначається як:

$$t_{\min 2} = \frac{I_{\max}}{h_p j_p}, \quad (5.2)$$

де $I_{\max}$ — максимальне значення струму, мА;

h_p — товщина металізації, мм;

j_p — допустима щільність струму в провіднику, А/мм².

Максимальною силою струму пристрою є струм заряджання батареї, що становить 1 А (3.1).

Щільність струму відповідно до ГОСТ 23751:86 [25] для друкованого провідника $j_p = 100 \text{ А/мм}^2$.

Мінімальна ширина провідників для силових ліній за 5.2 при значеннях з табл. 5.1 становить 0,29 мм. При проектуванні використано ширину силової лінії 0,55 мм.

Аналогічно розраховано ширину провідників сигнальних ліній.

За визначенням (5.2) та даними табл. 5.1 для сигнальних ліній мінімальна ширина провідників становить 0,04 мм. При проектування для сигнальних ліній обрано ширину провідників 0,3 мм.

5.2.5 Розрахунок розмірів контактних майданчиків та монтажних отворів

За умови відсутності рекомендацій в технічній документації виробника для елементів поверхневого монтажу розміри контактних майданчиків визначаються як:

$$D_v = l \cdot b, \quad (5.3)$$

де D_v — площа виводів, мм².

l — довжина виводів, мм.

b — ширина виводів, мм.

$$D_k = D_v + 0,3, \quad (5.4)$$

де D_k — площа контактних майданчиків, мм²;

Результати обчислень наведено в табл. 5.2.

Таблиця 5.2 — Розміри контактних майданчиків поверхневого монтажу

Назва елемента	D_v , мм ²	b , мм	l , мм	D_k , мм ²
X1	0,54	0,4	1,35	0,84
R1 – R9	0,15	0,5	0,3	0,45
C1 – C4, C7 – C12	0,15	0,5	0,3	0,45
C5, C6, C13	0,4	0,8	0,5	0,7
H1, H2	0,4	0,8	0,5	0,7
VD1	0,2	0,4	0,5	0,5
D1	0,12	0,2	0,6	0,42
DA1, DA3	0,3	0,5	0,6	0,6
DA2	0,2	0,4	0,5	0,5
SW2 – SW4	0,2	0,5	0,4	0,5

Розміри монтажних отворів для наскрізного монтажу визначаються як:

$$d_0 = D_v + 0,2, \quad (5.5)$$

де d_0 — діаметр отвору, мм;

D_v — діаметр виводу, мм;

$$D_k = \frac{5}{3} d_0, \quad (5.6)$$

де D_k — діаметр контактної майданчика (зовнішній діаметр), мм.

Результати обчислень наведено в табл. 5.3.

Табл. 5.3 — Розміри монтажних отворів

Назва елемента	D_v , мм	d_0 , мм	D_k , мм
X1	0,25	0,45	0,27
X3, X4,	0,5	0,7	0,42
DD1	0,5	0,7	0,42
SW1	0,5	0,7	0,42

Розміри контактних майданчиків і отворів для вивідних елементів обрано відповідно до технічної документації від виробника.

5.2.6 Трасування провідників

Проектування виконано в програмному середовищі Altium Designer [22].

На основі виконаних розрахунків контактних майданчиків та отворів для монтажу вивідних елементів, обрано ширину провідників силової лінії заряджання ЛПА 0,55 мм і сигнальних ліній (всіх інших) — 0,33 мм. Загальний ланцюг низького потенціалу GND (Ground) опорної напруги виконаний у вигляді полігону по невикористаній площі верхньої та нижньої сторін ДП. Результати трасування зображені на рис. 5.2 і рис. 5.3.

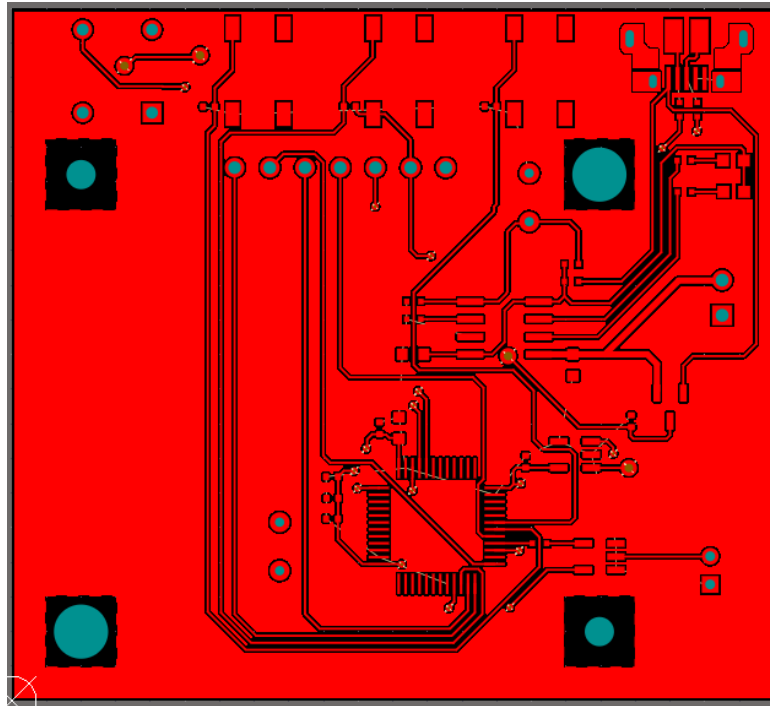


Рисунок 5.2 — Верхній шар металізації ДП

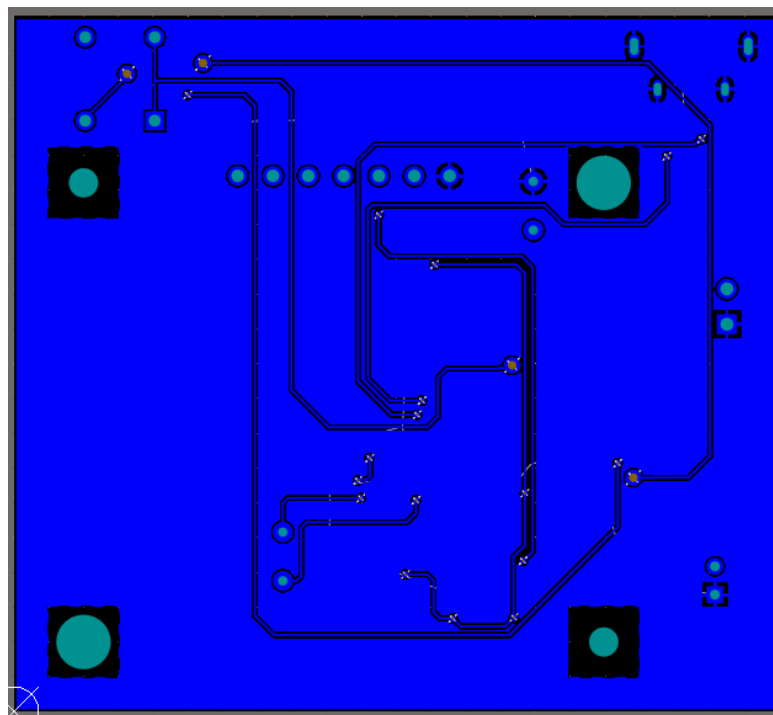


Рисунок 5.3 — Нижній шар металізації ДП

Вигляд ЕМ частотоміра без модуля дисплею зображено на рис. 5.4, з дисплеєм — на рис. 5.5.

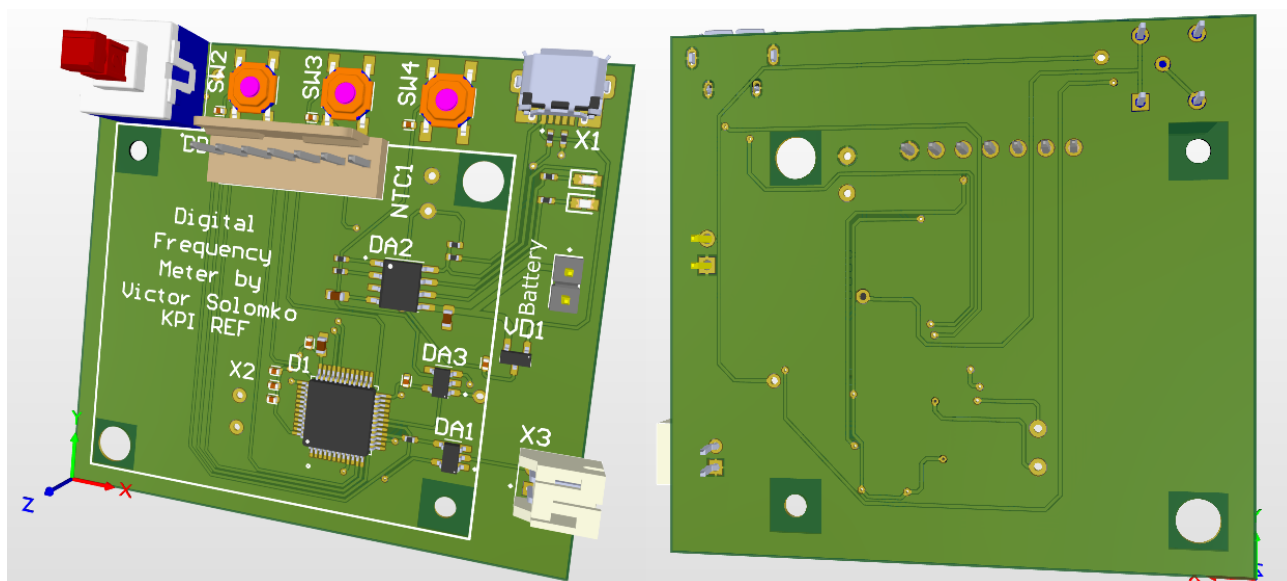


Рисунок 5.4 — Зовнішній вигляд ЕМ без модуля дисплею

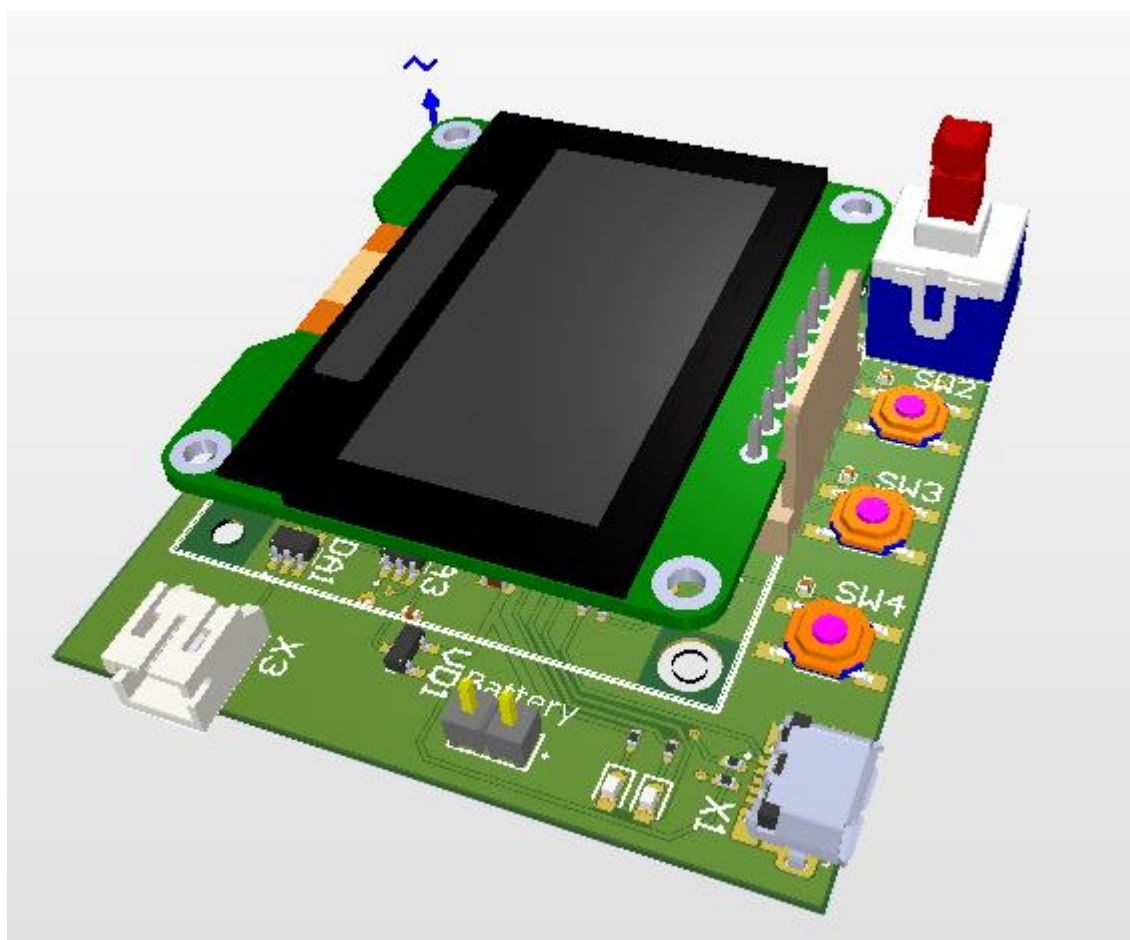


Рисунок 5.5 — Зовнішній вигляд ЕМ з дисплеєм

Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата

PI91.411711.001 ПЗ

Арк.

51

6 РОЗРОБКА КОРПУСУ ТА АНАЛІЗ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ

6.1 Розробка корпусу ЕМ

Проектування корпусу ЕМ виконано в програмному середовищі SolidWorks [26].

Згідно з вимогами ТЗ (додаток А) корпус пристрою виконано прямокутної мінімалістичної форми (рис. 6.1), складається з двох частин: кришка і основа корпусу. В кришці вклеєно захисну пластикову панель для графічного дисплею. Вимоги до матеріалу виготовлення в ТЗ не висуваються. В якості матеріалу для прикладу обрано АБС-пластик (акрилонітрилбутадієнстирол) жовтого кольору. Виготовлення корпусу виконано за 7 квалітетом. З погляду естетики ребра кришки і кути основи корпусу виконані зі скругленням.

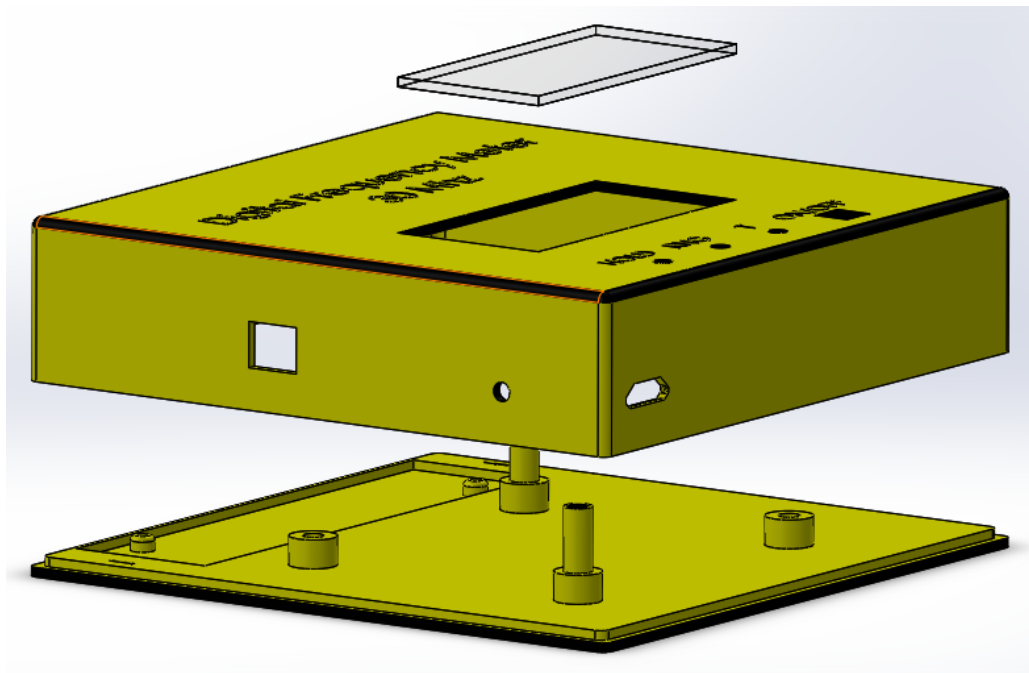


Рисунок 6.1 — Корпус ЕМ частотоміра

На нижній частині корпусу приклеєно гумову рамкоподібну підкладку для фіксації на гладкій поверхні та прикривання голівок гвинтів (рис. 6.2).

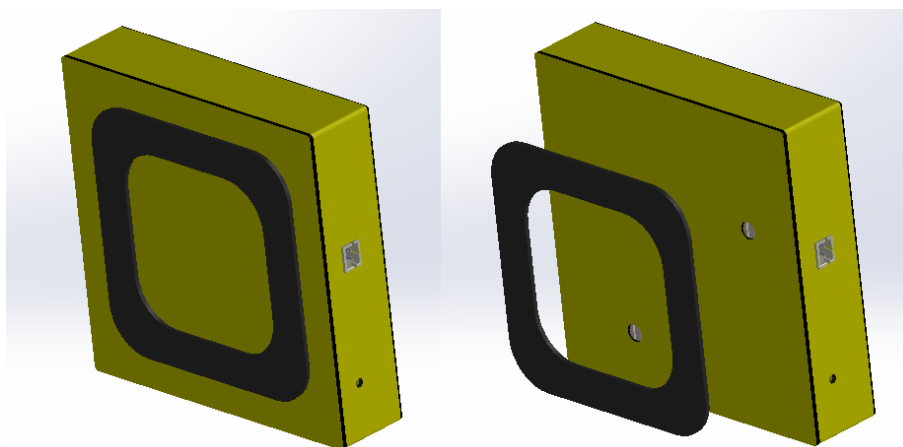


Рисунок 6.2 — Нижня сторона корпусу з гумовою підкладкою

Роз'єм для подачі вхідного сигналу та USB виведені через отвори в стінках корпусу. В стінці між двома світлодіодами розташовано пластикову лінзу для індикації заряду ЛІА. ЕМ розміщується всередині корпусу, фіксується чотирма гвинтами наскрізь модуля дисплею та основної плати з компонентами. Всередині корпусу ЛІА підключається до штиревих контактів. Модуль дисплею підключається через 7-контактний штиревий роз'єм. Пристрій у збірці зображено на рис. 6.3, в розібраному вигляді — на рис. 6.4.

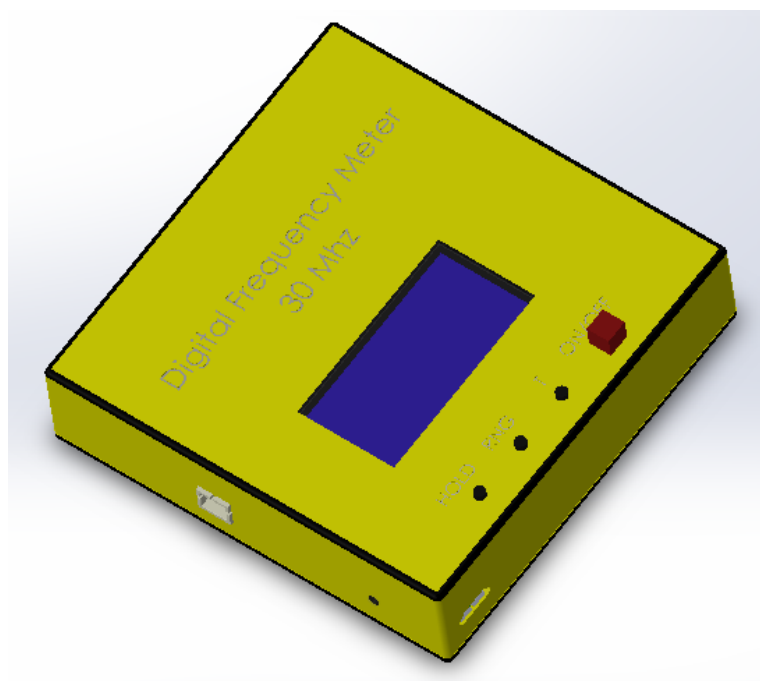


Рисунок 6.3 — Зовнішній вигляд пристрою

Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата

PI91.411711.001 ПЗ

Арк.

53

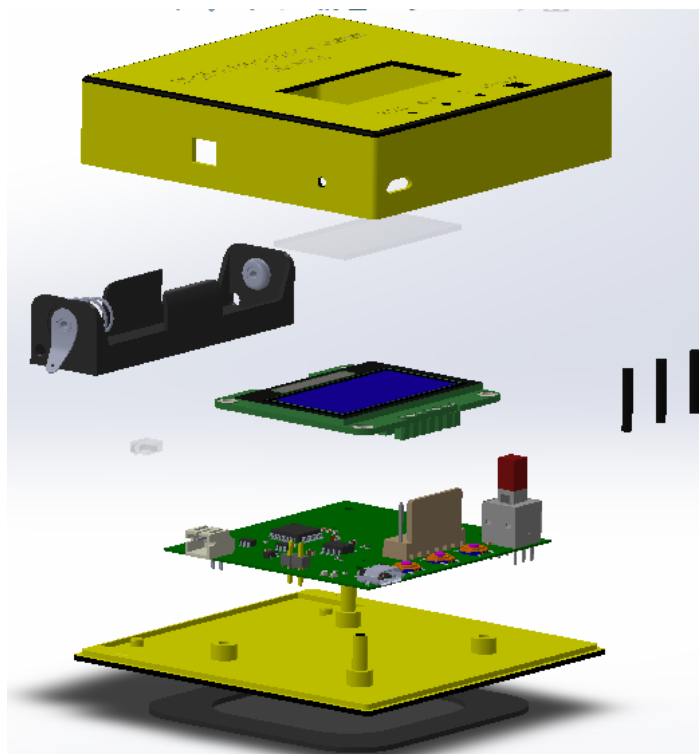


Рисунок 6.4 — Розібраний пристрій

6.2 Розрахунок працездатності пристрою

Розрахунки надійності виконані за прикладом [27].

Експлуатаційна (розрахункова) інтенсивність відмов елементів λ_p пристрою розраховується відповідно до наступних коефіцієнтів:

λ_0 — середньостатистична інтенсивність відмов ЕРЕ;

Функція K_1 температури та коефіцієнта навантаження визначається як:

$$K_1 = f(\Theta, K_H), \quad (6.1)$$

де Θ — температура ЕРЕ, °С;

K_H — коефіцієнт навантаження.

K_m — температурний коефіцієнт, що залежить від температур навколишнього середовища і відсотка робочого часу, упродовж якого обмотка перебуває під напругою;

$K_{сг}$ — Коефіцієнт режиму, що враховує складність інтегральних мікросхем

					<i>PI91.411711.001 ПЗ</i>		Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата			54

та температуру навколишнього середовища;

$K_{корп}$ — коефіцієнт, що враховує вплив матеріалу корпусу інтегральних мікросхем ($K_{корп} = 3$ для пластмасових корпусів);

K_1 — коефіцієнт, який враховує електричне і теплове навантаження;

K_2 — поправний коефіцієнт урахування напруги конденсатора, що визначається як співвідношення номінальної напруги до максимально можливої в пристрої:

$$K_2 = U_{ном} / U_{макс} , \quad (6.1)$$

K_p — коефіцієнт режиму роботи пристрою, що залежить від навколишньої температури та навантаження по струму;

K_e — коефіцієнт умов експлуатації. Всі розрахунки наводяться для нормальних умов експлуатації, за температури середовища 25 °C і $K_e = 1,5$;

Ймовірність відмов пристрою розраховується за формулою:

$$\lambda_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n \lambda_i , \quad (6.2)$$

Інтенсивність відмов пристрою розраховується за формулою для експоненційного розподілу:

$$T_{сер} = 1 / \lambda_{\Sigma} , \quad (6.3)$$

Далі за текстом наведені розрахунки експлуатаційної можливості відмов (ЕМВ) λ_p .

6.2.1 Розрахунок ЕМВ мікросхем

$$\lambda_{pm} = \lambda_0 K_{сТ} K_{корп} , \quad (6.4)$$

$\lambda_0 = 2$, тоді для полімерних корпусів, які входять до обраної компонентної бази, $\lambda_{pm} = 3$.

6.2.2 Розрахунок ЕМВ резисторів:

$$\lambda_{pp} = \lambda_0 K_1 K_e, \quad (6.5)$$

K_1 визначається з графіка на рис. 6.5.

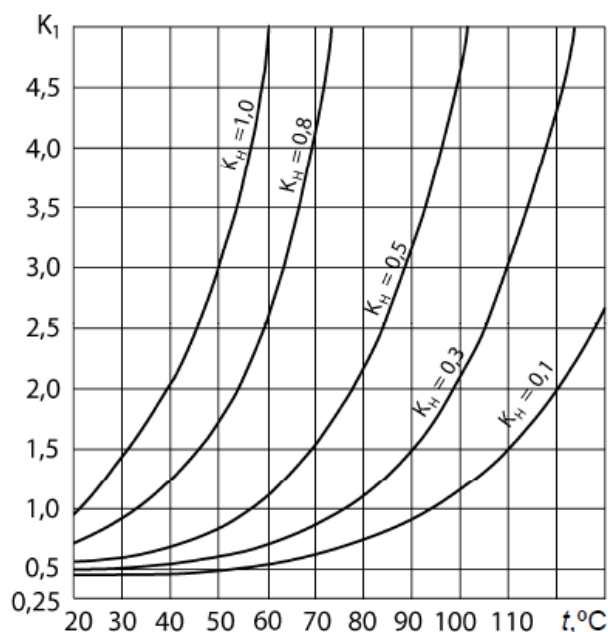


Рисунок 6.4 — Залежність коефіцієнту K_1 для постійних недротянутих резисторів

Оскільки для частотоміра рекомендовано резистори номінальної потужності 0,250 Вт, а максимальна потужність, що виділяють резистори в пристрої складає 0,125 Вт (4.1), коефіцієнт навантаження K_n приймемо за 0,5, тоді за умови, що λ_0 рівний 0,5 отримаємо значення $\lambda_{pp} = 0,38$.

6.2.3 Розрахунок ЕМВ керамічних конденсаторів

$$\lambda_{pk} = \lambda_0 K_1 K_2 K_e, \quad (6.6)$$

Всі використані в пристрої конденсатори мають номінальну напругу 25 В або вище. Тоді $K_2 = 0,2$ з урахуванням максимальної напруги в 5 В.

Згідно з даним графіком на рис. 6.5, $K_1 = 0,1$. Інтенсивність відмов $\lambda_0 = 0,7$.

Величина λ_{pk} становить 0,02.

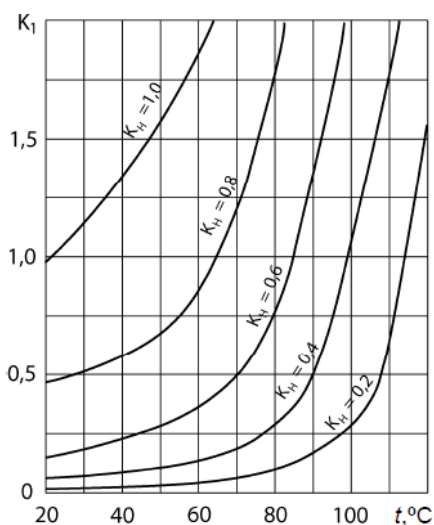


Рисунок 6.5 — Залежність коефіцієнту K_1 для керамічних конденсаторів

6.2.4 Розрахунок EMB світлодіодів:

$$\lambda_{pc} = \lambda_0 K_1 K_H, \quad (6.7)$$

За табличними значеннями $\lambda_0 = 1,5$.

Згідно з технічною документацією та способом включення, $K_H = 0,7$.

За рис. 6.6 K_1 становить близько 0,7. Отже $\lambda_{pc} = 0,74$.

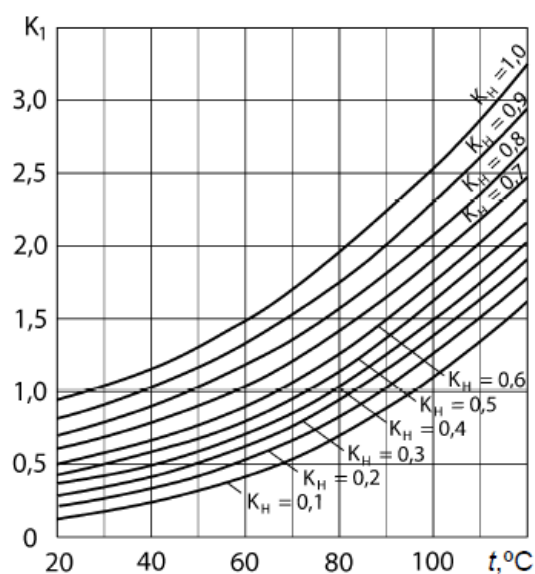


Рисунок 6.6 — Залежність коефіцієнту K_1 для діодів.

6.2.5 Розрахунок ЕМВ діодної збірки:

$$\lambda_{p\partial z} = \lambda_0 K_1 K_n, \quad (6.8)$$

Для діодної збірки $\lambda_0 = 0,5$.

В пристрої використовується збірка BAS40-05, що представляє собою два кремнієвих діоди Шотткі зі спільним катодом, тому можна використати минулу останню характеристику (рис. 6.6) і $K_n = 1$, $K_1 = 1$.

Інтенсивність відмов складає $\lambda_{p\partial c} = 0,5$.

Обчислимо ймовірність відмов:

$$\lambda_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n \lambda_i = 4\lambda_{pm} + 9\lambda_{pp} + 12\lambda_{pk} + 2\lambda_{pc} + \lambda_{p\partial} = 1,76 \cdot 10^{-5}, \quad (6.9)$$

середнє напрацювання на відмову:

$$T_{cp} = 1/\lambda_{\Sigma} = 5,68 \cdot 10^4. \quad (6.10)$$

Середній час безвідмовної роботи пристрою становить майже 6,5 років, що задовольняє ТЗ.

ВИСНОВКИ

Конвеєрний метод вимірювання широко використовується в цифровій техніці, зокрема для визначення частоти. Проте його реалізація, зазвичай, ускладнює конструкцію пристрою. Завдяки запропонованому програмному забезпеченню, частотомір може використовуватися в безперервному режимі, замість застосування кількох паралельно працюючих частотомірів. Це значно спрощує засоби вимірювань частоти і зменшує витрати на апаратне забезпечення.

В дипломному проєкті представлена основна конструкторська документація та розрахунки, що підтверджують працездатність пристрою.

Розроблений пристрій може оброблювати також і аналогові сигнали за наявності відповідного блока обробки і тригерів Шміта. Діапазон вимірюваних частот складає 100 Гц – 30 МГц. Для покращення роботи частотоміра доцільно додати вузол формування імпульсів із захистом від високої напруги, і ФНЧ для роботи з низькочастотними сигналами або дільник частоти у випадку обробки сигналів вищої частоти за підтримувану мікроконтролером.

Розроблений частотомір можна використати як базовий вузол для більш складних пристроїв обробки сигналів.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. What Reaching the Size Limit of the Transistor Means for the Future. *Insidetelecom* : веб сайт. URL:
<https://insidetelecom.com/what-reaching-the-size-limit-of-the-transistor-means-for-the-future/> (дата звернення 11.05.2023).
2. Технології розподілених систем та паралельних обчислень / Оксана Наконечна та ін. Житомир : ЖДУ ім. Івана Франка, 2023. 74 с.
3. What Does RISC and CISC Mean in 2020? / Erik Engheim. *Medium* : веб сайт. URL:
<https://medium.com/swlh/what-does-risc-and-cisc-mean-in-2020-7b4d42c9a9de> (дата звернення 11.05.2023).
4. ГОСТ 15150:69. Машины, прилади та інші технічні вироби. [Чинний від 1971—01—01, 1969. 81]. М. : Міждержавний стандарт, 1969. 81 с.
5. ГОСТ 16019-2001. Апаратура сухопутного рухомого радіозв'язку. [Чинний від 2002—01—01]. М. : Міждержавний стандарт, 2001. 11с.
6. ДСТУ-Н 7916:2015. Система технологічної документації. Настанови щодо оформлення документів, застосовуваних для розроблення, упровадження та функціонування технологічних процесів. [Чинний від 2016—07—01]. Київ : Державний Стандарт України, 2015. 23 с.
7. ДСТУ 3943:2000. Дизайн і ергономіка. Склад, виклад та зміст документації. [Чинний від 2000—09—01]. Київ : Державний Стандарт України, 2000. 21 с.
8. ДСТУ 3944:2000. Дизайн і ергономіка. Правила виконання дизайн-ергономічних робіт під час розроблення та поставлення продукції на

- виробництво. [Чинний від 2000—09—01]. Київ : Державний Стандарт України, 2000. 34 с.
9. ДСТУ ISO 14001:2015. Системи екологічного управління. Вимоги та настанови щодо застосування. [Чинний від 2015—12—21]. Київ : Державний Стандарт України, 2015. 37 с.
 10. ДСТУ ISO 14004:2016. Системи екологічного управління. Загальні настанови щодо запровадження. [Чинний від 2016—12—13]. Київ : Державний Стандарт України, 2016. 60 с.
 11. ДСТУ 2195:99. Охорона природи. Поводження з відходами. Технічний паспорт відходу. Склад, вміст, виклад і правила внесення змін. [Чинний від 1999—09—08]. Київ : Державний Стандарт України, 1999. 22 с.
 12. Методи вимірювань основних фізичних величин. *ТДАТУ ім. Дмитра Моторного* : веб сайт. URL:
<http://www.tsatu.edu.ua/ophv/wp-content/uploads/sites/13/lekciya-1-metody-vymirjuvannja-osnovnyh-fizychnyh-velychn.pdf> (дата звернення 28.04.2023).
 13. Основи метрології та засоби технічного контролю: конспект лекцій. Дрогобич : ДМТК, 2010. 113 с.
 14. Аналіз методів вимірювання частоти / В.М. Литвиненко, Г.Г. Дощенко, М.О. Самойлов. Херсон : 2017. 21 с.
 15. Основи побудови військових засобів вимірювань: конспект лекцій. Київ : КНУ ім. Тараса Шевченка. *PPT онлайн*: веб сайт. URL:
<https://ppt-online.org/112143> (дата звернення 04.06.2023).
 16. Technical Manual : Frequency Meter AN/URM-80. Washington : Department Of The Army, 1955. 130 с.

17. Шаповаленко О.Г. Основи електричних вимірювань: підручник для учнів ПТНЗ. Київ : «Либідь», 2002. 320 с.
18. Тимчик Г.С., Подолян О.О. Вимірювач частоти з Автоматичним Вибором Діапазону Вимірювання. *Вісник КПІ. Серія ПРИЛАДОБУДУВАННЯ*, Вип. 63(1), 2022.
19. Є.С. Поліщук, М.М. Дорожовець, В.О. Яцук та ін. Метрологія та вимірювальна техніка: підручник для студентів електротехнічних спеціальностей ВНЗ. Львів : НУ «Львівська політехніка», 2003. 544 с.
20. Pipelining in Computer Architecture. *Binary Terms* : веб сайт. URL: <https://binaryterms.com/pipelining-in-computer-architecture.html> (дата звернення 21.05.2023).
21. С.В. Денбовецький, О.В. Лещичин. Електронні системи : навчальний посібник. Київ : НТУУ КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2011. 293 с.
22. Altium Designer : система автоматизованого проектування. Altium : веб сайт. URL: <https://www.altium.com/> (дата звернення 09.06.2023).
23. J-STD-013:1996. Implementation of ball grid array and other high density technology. [Чинний від 1996—07]. Northbrook : Joint Industry Standard, 1992. 74 с.
24. IPC National Technology Roadmap for Electronic Interconnections : довідка технологічних стандартів. Bannockburn : Association Connecting Electronics Industries, 2015. 642 с.
25. ГОСТ 23751:86. Плати друковані. Основні параметри конструкції. [Чинний від 1986—03—19]. М.: Державний стандарт СРСР, 1986. 17 с.
26. SOLIDWORKS : система автоматизованого проектування. SOLIDWORKS : веб сайт. URL: <https://www.solidworks.com/> (дата звернення 09.06.2023).

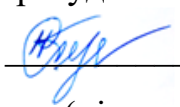
					PI91.411711.001 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		62

27. С.М. Перегудов, М.В. Зінченко. Фізико-теоретичні основи конструювання електронних апаратів : методичні рекомендації. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2012. 56 с.

ПОГОДЖЕНО

Керівник дипломного проєкту
к.т.н., доцент Перегудов С.М.

(дата)

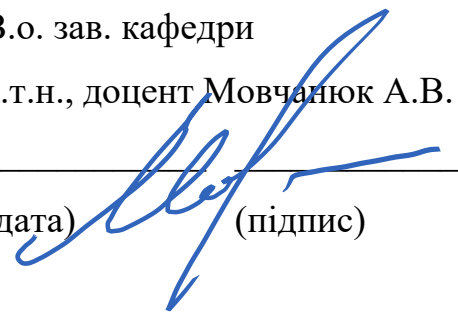


(підпис)

ЗАТВЕРДЖЕНО

В.о. зав. кафедри
к.т.н., доцент Мовчанюк А.В.

(дата)



(підпис)

ДОДАТОК А

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ

на тему «Цифровий частотомір конвеєрного типу»



(підпис)

Соломко В.О.

(виконавець)

Київ — 2023

					PI91.411711.001 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		63

1 НАЙМЕНУВАННЯ ТА ОБЛАСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ

Назва дипломного проекту: «Цифровий частотомір конвеєрного типу».

2 ПІДСТАВА ДЛЯ РОЗРОБКИ

Підставою для виконання є завдання, видане кафедрою прикладної радіоелектроніки.

3 МЕТА ВИКОНАННЯ І ПРИЗНАЧЕННЯ ПРОЄКТУ

Розробка електронного модуля, конструкції та необхідної конструкторської документації цифрового вимірювача частоти.

4 ВИМОГИ ДО ДП

ДП має бути виконана відповідно до календарного плану.

Звіт (дипломний проект) має бути оформлений згідно з ДСТУ 3974-2000.

5 ТЕХНІЧНІ ВИМОГИ

5.1 Показники призначення

Напруга живлення: від внутрішнього акумулятора +3,7 В, від USB +5 В;

Вхідні роз'єми: для вхідного сигналу PLS-2 (або подібні штиреві однорядні з кроком 2,54 мм) – 1 шт., для живлення USB micro;

Діапазон робочих частот: 100 Гц – 30 МГц;

Забезпечити виведення інформації на OLED дисплей і керування кнопками.

					<i>PI91.411711.001 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		64

5.2 Вимоги до життєздатності та стійкості до зовнішніх впливів і чинників

Кліматичне виконання за УХЛ 4.2 ГОСТ 15150-69.

Умови експлуатації згідно з ГОСТ 16019-2001.Р6.

5.3 Вимоги надійності

Строк експлуатації не менше 5 років за умови забезпечення безперервного живлення згідно з наведеними вимогами.

5.4 Вимоги до конструкції

Забезпечити можливість заміни внутрішнього акумулятора. Вимог габаритних розмірів і маси конструкції не висувається. При виборі елементної бази опиратися на вартість компонентів, надавати перевагу компонентам поверхневого монтажу з мінімальними розмірами.

5.5 Вимоги до технологічності

Відповідно до ДСТУ-Н 7916:2015.

5.6 Вимоги до уніфікації та стандартизації

Вибір уніфікованої і стандартизованої елементної бази.

5.7 Вимоги до дизайну та ергономіки

Дизайн пристрою композиційно цілісний, мінімалістичний раціональної форми згідно з ДСТУ 3943-2000 та ДСТУ 3944-2000. Забезпечити зручний доступ до кнопок управління, роз'ємів.

					<i>PI91.411711.001 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		65

5.8 Вимоги до експлуатації, зручності технологічного обслуговування та ремонту

Забезпечити ремонтпридатність та відновлюваність пристрою.

5.9 Вимоги безпеки життя, здоров'я майна громадян та охорони довкілля

Забезпечити відповідність стандартам до вимог електробезпеки, пожежної, технічної та екологічної безпеки за ГОС ДСТУ ISO 14001 та ДСТУ ISO 14004.

Утилізувати відповідно до вимог ДСТУ 2195-99.

5.10 Вимоги до транспортування і зберігання

Забезпечити транспортування відповідно до ДСТУ 8281:2015.

6 ВИМОГИ ДО СИРОВИНИ, МАТЕРІАЛІВ І ПКВ

Використовувати безсвинцевий припій, матеріали і ЕРЕ серійного виробництва.

7 ВИМОГИ ДО КОНСЕРВАЦІЇ, ПАКУВАННЯ ТА МАРКУВАННЯ

Нанести підписи на корпусі біля кнопок керування і назва пристрою на верхній частині корпусу.

Вимоги до пакування і консервації не передбачені.

8 ВИМОГИ ДО РОЗРОБЛЮВАНОЇ ДОКУМЕНТАЦІЇ

Документація оформлюється згідно з ЄСКД.

Забезпечити оформлення документації відповідно до ДСТУ 3008:2015.

Документація містить:

					<i>PI91.411711.001 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		66

1. Текстова документація (пояснювальна записка, перелік елементів, специфікація на пристрій).
2. Графічна документація загальним обсягом не менше 3 аркушів А2 (схема електрична принципова, складальний кресленик пристрою, складальний кресленик друкованого вузла)

					<i>PI91.411711.001 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		67

ДОДАТОК Б

```
#include "stm32f1xx.h"

typedef struct {
    uint32_t m;
    uint32_t n;
} FrequencyData;

class FrequencyMeter {
public:
    FrequencyMeter(uint32_t bufferSize) : bufferCapacity(bufferSize + 1) {
        dataBuffer = new FrequencyData[bufferCapacity];
        Reset();
    }
    ~FrequencyMeter() {
        delete[] dataBuffer;
    }

    void Reset() {
        bufferStart = 0;
        bufferEnd = 0;
        isReady = false;
    }

    uint32_t GetCount() {
        if (bufferEnd >= bufferStart)
            return bufferEnd - bufferStart;
        else
```

					<i>PI91.411711.001 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		68

```

        return bufferCapacity - (bufferStart - bufferEnd);
    }

```

```

const FrequencyData* GetFirst() {
    return &dataBuffer[bufferStart];
}

```

```

const FrequencyData* GetLast() {
    return &dataBuffer[bufferEnd];
}

```

```

bool IsReady() {
    return isReady;
}

```

```

void AddData(uint32_t m, uint32_t n) {
    dataBuffer[bufferEnd].m = m;
    dataBuffer[bufferEnd].n = n;
    bufferEnd = (bufferEnd + 1) % bufferCapacity;
    if (bufferEnd == bufferStart)
        bufferStart = (bufferStart + 1) % bufferCapacity;
    isReady = true;
}

```

private:

```

FrequencyData* dataBuffer;
uint32_t bufferCapacity;

```

```

uint32_t bufferStart;
uint32_t bufferEnd;
bool isReady;
};

void InitializeHardware() {
    // Enable GPIOA and TIM2 clocks
    RCC->APB2ENR |= RCC_APB2ENR_IOPAEN | RCC_APB2ENR_TIM1EN;

    // PA6 as input floating
    GPIOA->CRL &= ~(GPIO_CRL_MODE6 | GPIO_CRL_CNF6);
    GPIOA->CRL |= GPIO_CRL_CNF6_1;

    // TIM2 for input capture
    TIM2->CR1 = 0;           // Disable TIM2
    TIM2->CCER &= ~TIM_CCER_CC1E; // Disable capture/compare channel

1
    TIM2->SMCR &= ~TIM_SMCR_SMS; // Disable slave mode
    TIM2->CCMR1 &= ~TIM_CCMR1_CC1S; // Select input IC1 for capture
    TIM2->CCER |= TIM_CCER_CC1P; // Capture on falling edge
    TIM2->CCMR1 |= TIM_CCMR1_IC1F; // Configure input filter
    TIM2->CCER |= TIM_CCER_CC1E; // Enable capture/compare channel

1
    TIM2->CR1 |= TIM_CR1_CEN; // Enable TIM2

    // TIM1 for timebase generation
    RCC->APB1ENR |= RCC_APB1ENR_TIM1EN; // Enable TIM1 clock

```

```

TIM1->PSC = 7200 - 1;          // Set prescaler to 7200
TIM1->ARR = 1000 - 1;          // Set auto-reload value to 1000
TIM1->DIER |= TIM_DIER_UIE;    // Enable update interrupt
TIM1->CR1 |= TIM_CR1_CEN;      // Enable TIM1

// TIM3 for timebase generation
RCC->APB1ENR |= RCC_APB1ENR_TIM7EN; // Enable TIM7 clock
TIM3->PSC = 10000 - 1;         // Set prescaler to 10000
TIM3->ARR = 5000 - 1;          // Set auto-reload value to 5000
TIM3->DIER |= TIM_DIER_UIE;    // Enable update interrupt
TIM3->CR1 |= TIM_CR1_CEN;      // Enable TIM3

NVIC_SetPriority(TIM1_DAC_IRQn, 0); // Set TIM1 interrupt priority to
highest
NVIC_EnableIRQ(TIM1_DAC_IRQn);    // Enable TIM1 interrupt in NVIC

NVIC_SetPriority(TIM3_IRQn, 1);   // Set TIM3 interrupt priority to lower
NVIC_EnableIRQ(TIM3_IRQn);       // Enable TIM3 interrupt in NVIC
}

void StartMeas(uint32_t timerDiv1, uint32_t timerDiv2, uint32_t bufferSize) {
    // Check argument validity
    if (timerDiv1 == 0 || timerDiv1 > 0xFFFF || timerDiv2 < 2 || timerDiv2 >
0xFFFFE || bufferSize == 0)
        return;

```

```

// Stop measurements if already running
if (TIM2->CCER & TIM_CCER_CC1E)
    StopMeasurement();
// Initialize global variables
previousCounter_m = 0;
previousCounter_n = 0;

// Reset data buffer
frequencyMeter.Reset(bufferSize);
// Prepare and start peripherals
TIM2->CNT = 0;
TIM2->CR1 |= TIM_CR1_CEN;
TIM2->CCER |= TIM_CCER_CC1E;

TIM1->CNT = 0;
TIM1->CR1 |= TIM_CR1_CEN;

TIM3->PSC = timerDiv1 - 1;
TIM3->EGR = TIM_EGR_UG;
TIM3->ARR = timerDiv2 - 1;
TIM3->CR1 |= TIM_CR1_CEN;

TIM1->DIER |= TIM_DIER_UIE;
TIM3->SR = ~TIM_SR_UIF;
TIM3->DIER |= TIM_DIER_UIE;
}

```

```

void StopMeasurement() {
    TIM3->CR1 &= ~TIM_CR1_CEN;
    TIM1->CR1 &= ~TIM_CR1_CEN;
    TIM2->CCER &= ~TIM_CCER_CC1E;
    TIM2->CR1 &= ~TIM_CR1_CEN;

    TIM1->DIER &= ~TIM_DIER_UIE;
    TIM3->DIER &= ~TIM_DIER_UIE;
}

void ProcessMeasurementRes() {
    uint32_t m, n, count, c0;
    if (frequencyMeter.IsReady()) {
        count = frequencyMeter.GetCount();
        c0 = frequencyMeter.GetFirst()->m;
        const FrequencyData* firstData = frequencyMeter.GetFirst();
        const FrequencyData* lastData = frequencyMeter.GetLast();
        m = lastData->m - firstData->m;
        n = lastData->n - firstData->n;
        frequencyMeter.Reset();
        // Perform actions with the calculated values
    }
}

extern "C" void TIM1_DAC_IRQHandler() {
    TIM1->SR &= ~TIM_SR_UIF;
    // Handle TIM1 interrupt
    uint32_t currentCounter_m = TIM2->CNT;

```

```

    frequencyMeter.AddData(currentCounter_m, currentCounter_n);
    previousCounter_m = currentCounter_m;
}

```

```

extern "C" void TIM3_IRQHandler() {

```

```

    TIM3->SR &= ~TIM_SR_UIF;

```

```

    // Handle TIM3 interrupt

```

```

    // ...

```

```

    uint32_t currentCounter_n = TIM2->CNT;

```

```

    uint32_t currentCounter_m = previousCounter_m;

```

```

    frequencyMeter.AddData(currentCounter_m, currentCounter_n);

```

```

    previousCounter_n = currentCounter_n;

```

```

}

```

```

int main() {

```

```

    InitializeHardware();

```

```

    FrequencyMeter frequencyMeter(5);

```

```

    StartMeas(240, 10000, 5);

```

```

    while (1) {

```

```

        ProcessMeasurementRes();
    }
}

```

Позн.		Найменування			Кіл.	Примітки			
		<u>Мікросхеми</u>							
D1		Мікроконтролер STM32F103C8T6			1				
DA1		Тригер Шміта SN74LVC1G17			1				
DD1		Модуль 128х64 OLED-дисплею на контролері SSD1306			1				
		<u>Регулятори напруги</u>							
DA2		Контролер заряду TP4056			1				
DA3		Регулятор напруги AP2112-3.3			1				
		<u>Резистори</u>							
R1, R2		Резистор Hitano 20 Ом, 0,250 Вт ±5%			2				
R3		Резистор Hitano 0,4 Ом, 0,250 Вт ±5%			1				
R4		Резистор Hitano 100 Ом, 0,250 Вт ±5%			1				
R5		Резистор Hitano 2,2 кОм, 0,250 Вт ±5%			1				
R6, R7		Резистор Hitano 1 кОм, 0,250 Вт ±5%			2				
R8		Резистор Hitano 1,2 кОм, 0,250 Вт ±5%			1				
R9		Резистор Hitano 47 Ом, 0,250 Вт ±5%			1				
		<u>Конденсатори</u>							
C1-C3		Конденсатор керамічний Murata 25 В, 100 нФ ±10%			3				
C4, C5		Конденсатор керамічний Murata 25 В, 10 мкФ ±10%			2				
C6, C7		Конденсатор керамічний Murata 25 В, 1 мкФ ±10%			2				
C8-C11		Конденсатор керамічний Murata 25 В, 10 нФ ±10%			4				
C12		Конденсатор керамічний Murata 25 В, 10 мкФ ±10%			1				
					PI91.411711.001 ПЕ				
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					
Розробив		Соломко В.О.			Вимірювач частоти Перелік елементів	Лім.		Арк.	Аркушів
Перевір.		Перегудов С.М.					1	2	
Реценз.						КПІ ім. Ігоря Сікорського РТФ			
Н.Контр									
Затверд.		Перегудов С.М.							

Позн.	Найменування	Кіл.	Примітки
	<u>Термістори</u>		
NTC	Термістор NTC Bochen MF52 10 Ом±5%	1	
	<u>Діоди</u>		
VD1	Діодна збірка зі спільним катодом, Infineon, BAS-40-05	1	
	<u>Світлодіоди</u>		
H1	Зелений світлодіод LSM0603452V	1	
H2	Червоний світлодіод LSM0603412V	1	
	<u>Роз'єми</u>		
X1	USB-micro KLS1-233-1-0-0-T-KLS	1	
X3	Штиревий роз'єм JST_S2B-PH-KS	1	
X4	Штиревий роз'єм SAMTEC_HTSW-102-05-TM-S	1	
	<u>Кнопки</u>		
SW	Кнопки тактові KLS7-TS6611-1.5-180	3	
	<u>Перемикачі</u>		
SW	Кнопка-перемикач з фіксацією KLS7-P	1	

					PI91.411711.001 ПЕ				
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					
Розробив	Сопомко В.О.				Вимірювач частоти Перелік елементів		Літ.	Арк.	Аркушів
Перевір.	Перебудов С.М.							2	2
Реценз.							КПІ ім. Ігоря Сікорського, РТФ		
Н.Контр									
Затверд.	Перебудов С.М.								

[illegible]

[illegible]

[illegible]