

КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ВИСОКИХ ТЕХНОЛОГІЙ

В.о. завідувача кафедри квантової радіофізики

доц. Сергій Олександрович КОЛЄНОВ

Протокол №__ засідання кафедри

від “__” _____ 20__ р.

**Розробка програмно-апаратного комплексу для
вимірювання товщини тонких плівок**

Випускна кваліфікаційна робота бакалавра

студента спеціальності 171

Електроніка

ОП «Електроніка (високі технології)»

Логовця Івана Олександровича

Науковий керівник

доцент кафедри

квантової радіофізики

к.ф.-м.н. Колєнов Сергій Олександрович

Оцінка захисту роботи

Київ-2024 р.

АНОТАЦІЯ

Логовець І. О. Розробка програмно-апаратного комплексу для вимірювання товщини тонких плівок. - Випускна кваліфікаційна робота бакалавра за спеціальністю 171 Електроніка ОП "Електроніка (високі технології)".

У роботі розроблено прилад для вимірювання частоти кварцового резонатора та комп'ютерна програма для розрахунку товщини тонких плівок. Отримані результати можуть бути використані для контролю вирощування тонких плівок з метою створення гетеропереходів у пристроях електроніки, а також застосовуватись у інших галузях, таких як біології та хімії.

Ключові слова: п'єзоелектричний ефект; кварцовий резонатор; тонкі плівки; вимірювання частоти.

ЗМІСТ

Вступ	3
Розділ 1. Вимірювання товщини	4
1.1. П'єзоелектричний ефект	4
1.2. Кварцовий резонатор	5
1.3. Резонансний метод вимірювання товщини	6
1.4. Схема генератора	10
Розділ 2. Вимірювання частоти	14
2.1. Пряме вимірювання	14
2.2. Зворотне вимірювання	15
Розділ 3. Розробка приладу	18
3.1. ESP32	18
3.2. РК дисплей та кнопки керування	21
3.3. Структурна та принципова схеми приладу	23
3.4. Принцип роботи приладу	25
3.5. Тестування приладу	26
Розділ 4. Розробка програми	32
4.1. Принцип роботи програми	32
Висновки	34
Список використаних джерел	35

Вступ

У інтегрованих пасивних пристроях та інтегральних мікросхемах широко застосовуються гетероструктури, в склад яких входять тонкі плівки, які використовуються в якості гетеропереходів [1]. Тонкі шари елементарних металів, таких як мідь, алюміній, золото чи срібло тощо, і сплави знайшли численні застосування в електричних пристроях. Завдяки своїй високій електропровідності вони здатні транспортувати електричні струми або подавати напругу. Тонкі металеві шари служать у звичайній електричній системі, наприклад, як шари Cu на друкованих платах, як зовнішній провідник заземлення в коаксіальних кабелях та інших формах, таких як датчики. Технологія виготовлення таких плівок, як складника гетеропереходів для приладів електронної техніки, представляє собою комплекс складних технологічних процесів, один з етапів якого зводиться до виміру товщини, який, в свою чергу, представляє серйозну сучасну проблему [2-4].

Серед різних методів визначення товщини тонких плівок (оптичний, акустичний, тощо) найбільш ефективним є резонансний метод, який дозволяє контролювати товщину плівки у процесі її формування [5].

Метою даної роботи є розробка програмно-апаратного комплексу для вимірювання товщини тонких плівок та опис методик цифрового вимірювання частоти.

Задача полягає у створенні приладу, який буде вимірювати частоту кварцевого резонатора, та комп'ютерної програми, яка буде обробляти значення частоти та вираховувати товщину плівки.

Розділ 1.

Вимірювання товщини

1.1. П'єзоелектричний ефект

Робота резонансного методу [6] вимірювання товщини плівок базується на явищі п'єзоелектричного ефекту, який виникає на гранях у деяких кристалах.

Явище п'єзоелектричного ефекту полягає у генерації електричного потенціалу у кристалі при застосуванні механічної деформації до цього кристала (прямий ефект), і виникнення деформації цього матеріалу при прикладанні до нього електричного потенціалу (зворотній ефект). Прибирання потенціалу дозволяє кристала відновити свою початкову орієнтацію.

На рисунку 1.1 зображено деформації зсуву кристала [6].

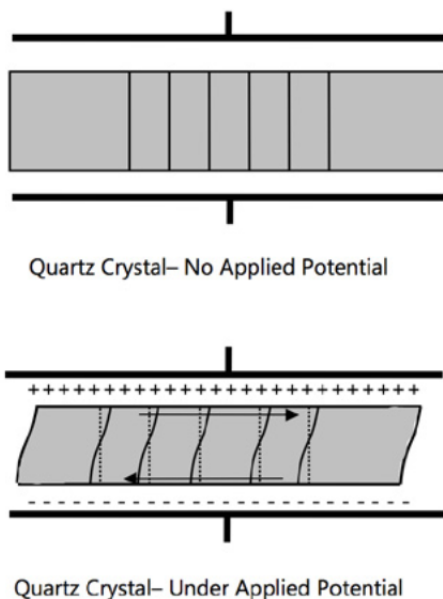


Рис. 1.1. Графічне представлення деформації зсуву по товщині.

Прикладення змінного потенціалу до граней кристала викликає коливання кристала. Коли товщина кристала (t_q) вдвічі перевищує довжину звукової хвилі, можна встановити стоячу хвилю, коли зворотна частота прикладеного потенціалу

становить (0.5) періоду стоячої хвилі. Ця частота називається резонансною частотою f_0 [6]:

$$f_0 = \sqrt{\frac{\mu_q}{\rho_q}} / 2t_q \quad (1.1)$$

Де:

μ_q – модуль зсуву (відношення напруги зсуву до деформації зсуву)

ρ_q – щільність

t_q – товщина кристала.

Кількість енергії, що втрачається під час коливань на цій частоті, є мінімальною.

1.2. Кварцовий резонатор

Кварц, будучи п'єзоелектричним матеріалом, також має унікальну комбінацію властивостей, що робить його ідеальним кандидатом для ультраточливих приладів. Його можна знайти в природі у достатній кількості, а також його легко вирощувати та обробляти.

Щоб виготовити кварцові резонатори, пластини вирізають з маси кристала кварцу в певних орієнтаціях відносно кристалографічної осі. Кварцові диски, що використовуються у вимірюванні товщини, найчастіше обробляються за допомогою «АТ-cut» гравіювання. Після різання пара металевих електродів (зазвичай золотих) безпосередньо випаровується на верхній і нижній поверхнях кварцового диска, як зображено на рис. 1.2 [7]. Коли до кварцового диска подається відповідний змінний струм, він буде коливатися на своїй резонансній частоті. Резонансні частоти зазвичай мають порядок МГц і обернено пропорційні товщині кристала. Звичайний кристал кварцу з частотою 5 МГц має відповідну товщину приблизно 330 мкм.

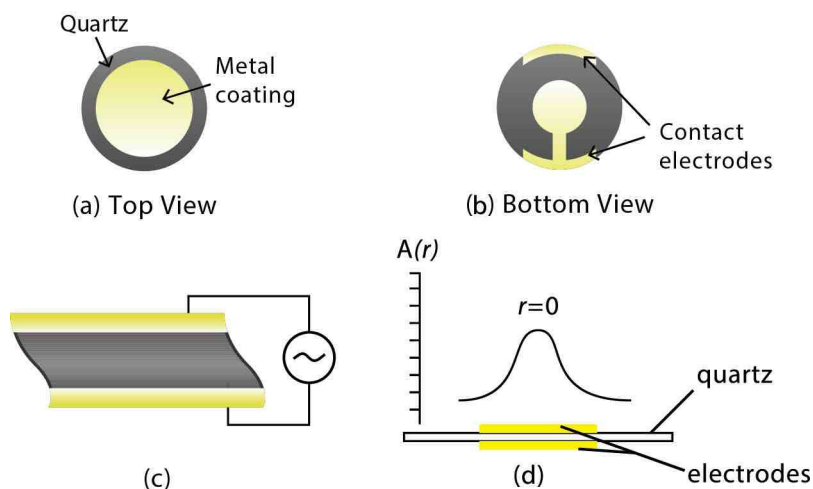


Рис. 1.2. Дизайн кристала кварцу (сірий) з електродами (жовтий); (а) вид зверху (б) вид знизу. (с) Схематичне зображення деформації, викликані в кристалі АТ-розрізу при прикладанні змінної напруги. (д) Схематичне зображення того, як амплітуда вібрації $A(r)$ змінюється залежно від відстані (r) від центру датчика. Область коливань називається активною поверхнею і чутлива до змін маси.

Кристали АТ-cut розроблені таким чином, щоб мати гарну стабільність при кімнатній температурі ($25\text{ }^{\circ}\text{C}$), тобто мінімальну зміну частоти ($1\text{-}3\text{ Гц}/^{\circ}\text{C}$). Однак цей майже нульовий температурний коефіцієнт може збільшуватися, коли кристали занурені в рідину. Поєднання коливань режиму зсуву з залежною від температури в'язкістю рідини може збільшити температурний коефіцієнт приблизно до $8\text{ Гц}/^{\circ}\text{C}$ для води. Тому для високоточних вимірювань за допомогою резонансного методу необхідний ретельний контроль температури (до $\leq 0,1^{\circ}\text{C}$) навколо кристала або точні вимірювання, що супроводжуються компенсацією.

1.3. Резонансний метод вимірювання товщини

Кварцові мікроваги (QCM) широко використовуються для моніторингу та контролю росту тонких плівок у процесах фізичного осадження з парової фази та розпилення. Хоча QCM застосовуються у газоподібних і рідких середовищах, кон-

троль швидкості росту тонких твердих плівок все ще залишається основним застосуванням інструментів QCM. У типовому застосуванні кристал кварцу з відповідними електродами поміщають у камеру осадження поруч із підкладкою, на яку потрібно нанести покриття, і піддають впливу парів матеріалу осадження через відповідний отвір. Матеріали, які конденсуються на поверхні цього кристала кварцу, зменшують його резонансну частоту. За змінами резонансної частоти кристала вираховується кількість маси, що осідає на його поверхні [8].

Зміна частоти в QCM може бути виміряна з роздільною здатністю 1 Гц або менше на кристалах з основною резонансною частотою в діапазоні МГц. Завдяки високій стабільності як резонатора кристали кварцу були успішно включені на початку 1900-х років як компоненти в різні пристрої, такі як електронні фільтри, пристрої контролю частоти та ультразвукові перетворювачі. Застосування кристалів кварцу як чутливих ваг було реалізовано наприкінці 1950-х після роботи Зауербрея. Зауербрей продемонстрував у 1959 році, що зміна частоти (Δf) коливального кварцу може бути лінійно пов'язана зі зміною його маси (Δm):

$$\Delta f = -C_f \Delta m \quad (1.2)$$

Де:

Δf - зміна частоти

Δm - зміна маси на одиницю площі у (г/см²)

C_f - коефіцієнт чутливості кристала

Ця формула, яку зазвичай називають рівнянням Зауербрея, становить основний принцип технології QCM [8]. Для 5 МГц кварцового кристала АТ-cut при кімнатній температурі C приблизно дорівнює 17.7 нг/(см² × Гц) [7]. Це означає, що додавання 17.7 нг/см² маси на кристал кварцу 5 МГц викликає зміну частоти на 1 Гц. Частоту 5 МГц кварцу можна виміряти з точністю до 0,01 Гц у вакуумі; отже,

можна досягти вимірювання мас у нанограмовому масштабі. Наприклад, відповідний зсув частоти при додаванні моношару води з площинною щільністю приблизно 25 нг/см^2 на поверхню кристала кварцу АТ-розрізу становить приблизно $1,4 \text{ Гц}$ і знаходиться в межах виявлення. У 1963 році Уорнер і Стокбрідж продемонстрували вимірювання зміни маси всього на 1 пг/см^2 , що відповідало приблизно $0,1\%$ моношару водню.

Зауербрей розробив формулу (1.2), припускаючи, що невелику масу, додану до кристала, можна розглядати як еквівалентну зміну маси самого кристала кварцу. Це означає, що формула дійсна лише тоді, коли додана маса жорстко адсорбується на поверхні кварцу без ковзання. Відкриття Зауербрея схематично зображено на рис. 1.3 [7]. Зауербрей продовжив дослідження властивостей вимірювання маси QCM і пізніше продемонстрував, що вібрація кристала обмежена областю, де електроди перекриваються, як показано на рис. 1.2 (d). Цю область коливань називають активною областю кристала. Амплітуда вібрації, $A(r)$, досягає піку в центрі електрода, $r = 0$, і звужується за Гаусовою модою до країв електродів (рис 1.2 d). Ця диференціальна масова чутливість площі поверхні кварцу становить ще одне обмеження для рівняння Зауербрея, а саме те, що маса повинна бути рівномірно розподілена по активній площі.

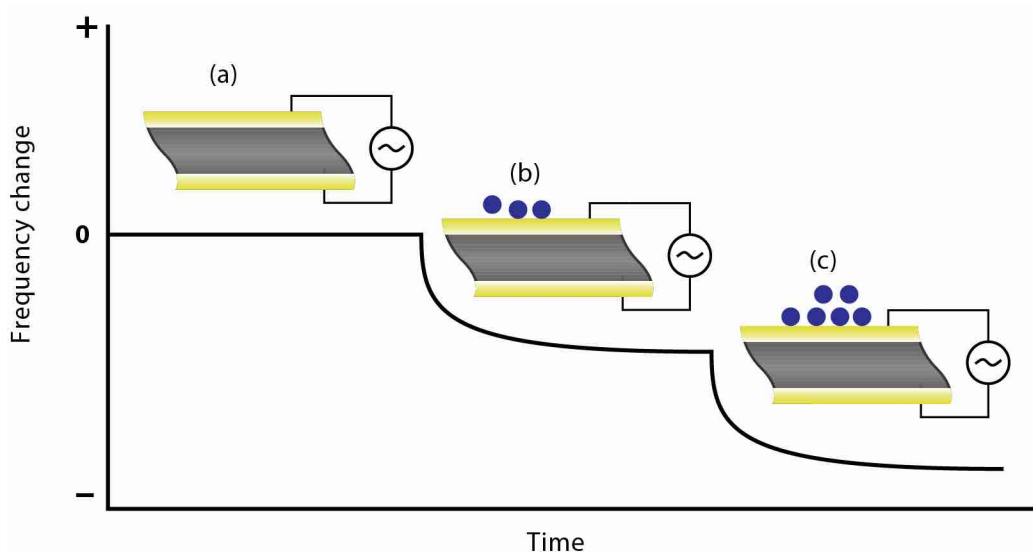


Рис. 1.3. Схематичне зображення результатів Зауєрбрея: (а) кристал кварцу коливається з постійною частотою, коли прикладається відповідна напруга, (b) частота коливань починає зменшуватися, коли молекули починають осідати на поверхні кристала, і (c) частота далі зменшується оскільки відкладається більше молекул.

Підсумовуючи, рівняння Зауєрбрея дійсне за наступних трьох умов:

1. Додана маса мала порівняно з масою самого кристала
2. Додана маса жорстко адсорбована
3. Маса рівномірно розподілена над активною зоною кристала.

Це рівняння використовувалося і все ще використовується в кількох галузях промисловості для моніторингу швидкості та товщини осадження металу у вакуумній або газовій фазі.

Щоб використовувати QCM для вимірювання товщини плівок, можна пов'язати товщину нанесеної плівки l_f , зі зсувом частоти. Якщо l_q — товщина кварцової пластини, ρ_q — щільність кварцу, а A — площа активної поверхні, то «активна» маса кристала визначається як $m_q = \rho_q l_q A$. Подібним чином, масу плівки можна визначити за її щільністю ρ_f , товщиною l_f і тією самою активною площею A :

$m_f = \rho_f l_f A$. Крім того, із введенням частотної сталої $N_q = l_q f_q$ рівняння можна записати у формі для визначення товщини [9]:

$$l_f = -\frac{N_q \rho_q \Delta f}{\rho_f f_q^2} \quad (1.3)$$

Використовуючи значення щільності ($\rho_q = 2.648 \text{ г/см}^3$ [10]) та сталої частоти ($N_q = 1.668 \times 10^5 \text{ Гц} \times \text{см}$ [11]) для АТ-cut кристалів, формула (1.3) стає:

$$l_f = -\frac{4.417 \times 10^5 \Delta f}{\rho_f f_q^2} \quad (1.4)$$

Розробка QCM, яка могла б працювати в рідких середовищах, була наступним кроком у просуванні її застосувань. Однак це завдання поставило перед першими дослідниками кілька проблем. Лише в 1980 році Номура і Хатторі продемонстрували, що кристал кварцу, повністю занурений у рідке середовище, може коливатися на стабільних частотах [12].

1.4. Схема генератора

На рис. 1.4 зображена електрична модель Баттерворта ван Дайка (BVD) для кристалічного резонатора кварцу [13]. Ця модель часто використовується для представлення електричної поведінки кристалічного резонатора поблизу послідовного резонансу. Модель також була корисною для прогнозування частотних зсувів і втрат кварцового кристала АТ-огранювання в додатках QCM.

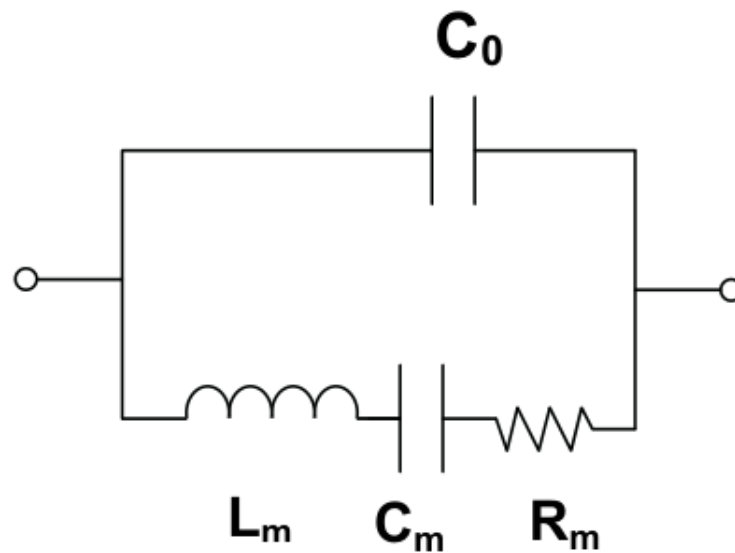


Рис. 1.4. Модель кварцового резонатора Баттерворта-ван Дайка.

Електрична модель BVD складається з двох плечей. Рухоме плече має три послідовні компоненти, модифіковані масою та в'язким навантаженням кристала: (1) R_m (резистор) відповідає розсіюванню енергії коливань від монтажних конструкцій та середовища, що контактує з кристалом (тобто втрати, спричинені в'язким розчином), (2) C_m (конденсатор) відповідає накопиченій енергії в коливанні і пов'язаний з пружністю кварца та навколишнього середовища, і (3) L_m (індуктор) відповідає інерційній складовій коливання, яка пов'язана з масою, зміщеною під час вібрації. Типові значення цих параметрів для 25.4 мм діаметру, 5 МГц кристала: $C_m = 33$ фФ, $L_m = 30$ мН та $R_m = 10$ Ом (для сухого кристала), $R_m = 400$ Ом (для кристала з однією стороною у воді), або $R_m = 3500$ Ом (для кристала з однією стороною у 88% гліцеролі).

Рухоме плече шунтується паразитною ємністю C_0 , яка являє собою суму статичних ємностей електродів кристала, тримача та ємності роз'єму.

Індуктивність руху, L_m , збільшується, коли маса додається до кристалічного електрода - зсув частоти послідовного резонансу є чутливим індикатором доданої маси, і плівки менше 1 нг/см² можна легко розпізнати за допомогою QCM. Опір

руху, R_m , також може надати важливу інформацію про процес, оскільки м'які плівки та в'язкі рідини збільшуватимуть втрати при русі та таким чином збільшуватимуть значення R_m .

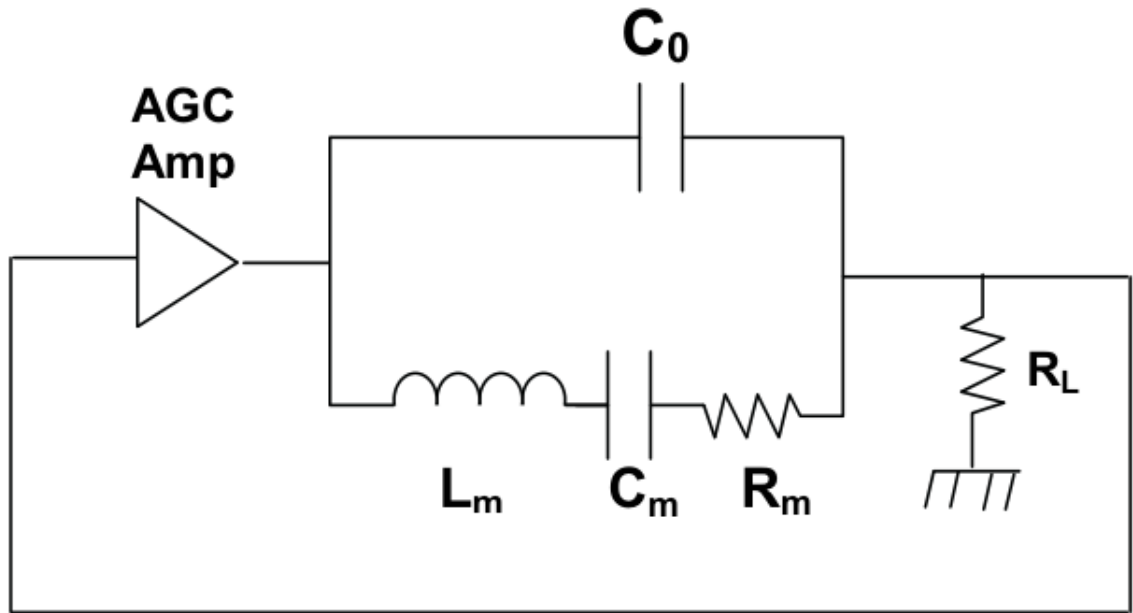


Рис. 1.5. Схема генератора, що складається з АРП підсилювача, кварцового резонатора і резистора навантаження.

Розміщення кристала в контурі генератора забезпечує простий спосіб вимірювання його рухових параметрів. На рис. 1.5 показана модель кристала BVD, що керується підсилювачем з автоматичним регулюванням посилення (АРП) і підключена до навантажувального резистора R_L [13]. Повернувши напругу на R_L на вхід підсилювача АРП, схема буде коливатися на частоті, для якої фазовий зсув становить 0° (або ціле кратне 360°), за умови достатнього посилення. За відсутності C_0 легко побачити, що умова фази задовольняється при послідовному резонансі C_m і L_m .

При послідовному резонансі реактивний опір C_m і L_m скасовується, залишаючи лише R_m . У цьому випадку посилення підсилювача $A_v = (R_m + R_L)/R_L$ забезпечить посилення контуру 1 для підтримки коливань [13].

Але, C_0 не можна ігнорувати в QСМ. У схемі, показаній на рис. 1.5, C_0 вводить випереджаючий струм у R_L , який має бути скасований відстаючим струмом через рухливе плече, щоб досягти стану нульової фази. Для цього потрібна схема, що працює вище послідовного резонансу, де чистий реактивний опір C_m і L_m є індуктивним. Насправді, якщо R_m достатньо великий, можливо, що рухоме плече не зможе внести достатню кількість затримуючого струму, щоб скасувати провідний струм через C_0 , і схема взагалі не буде коливатися.

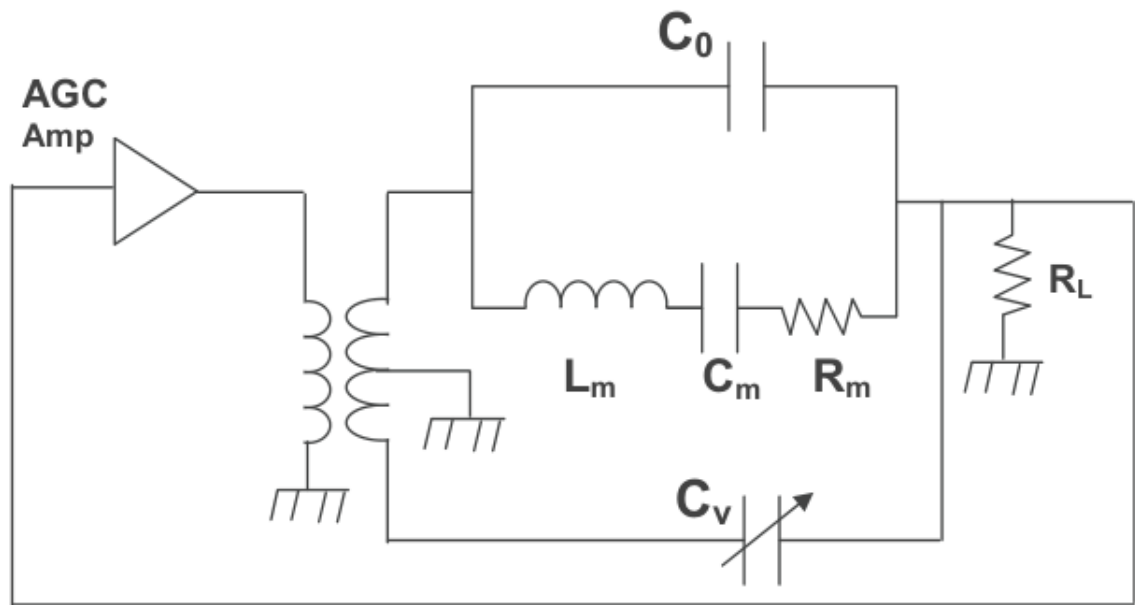


Рис. 1.6. Схема резонатора з варакторним обнуленням C_0 .

Метод компенсації C_0 показаний на рис. 1.6 [13]. У цій схемі підсилювач АРП керує трансформатором із двома вторинними обмотками. Одна вторинна обмотка керує кристалом і навантаженням, як і раніше, а інша вторинна інвертує напругу. Джерело інвертованої напруги вводить струм через варактор, C_v , щоб скомпенсувати струм, введений через C_0 . Повна компенсація досягається, коли варактор дорівнює C_0 .

Розділ 2.

Вимірювання частоти

Існує декілька методів вимірювання частоти: пряме вимірювання та зворотне вимірювання. Для використання обох цих методів потрібно будувати коливальне коло. Чим вища стабільність і точність цього кола, тим кращими будуть результати виміру. Частота цього кола визначає різні параметри результатів вимірювань, зважаючи на використаний метод.

2.1. Пряме вимірювання

Цей метод є найпростішим методом вимірювання частоти. Коливальне коло резонує з меншою частотою ніж вимірюваний сигнал. Ця частота визначає частоту дискретизації кола. Наприклад, якщо воно коливається з частотою 1 Гц, ми отримуємо вимірювання кожну секунду.

Цей метод працює таким чином: під час повного періоду коливального кола вимірюються кількість імпульсів, потім кількість виміряних імпульсів ділиться на період коливального кола, і отримується результат частоти в Гц:

$$f = \frac{Count}{T} \quad (2.1.)$$

Де:

f - Частота сигналу

$Count$ - Кількість імпульсів

T - Період коливального кола (у секундах)

На рис. 2.1 зображено процес прямого виміру частоти [14].

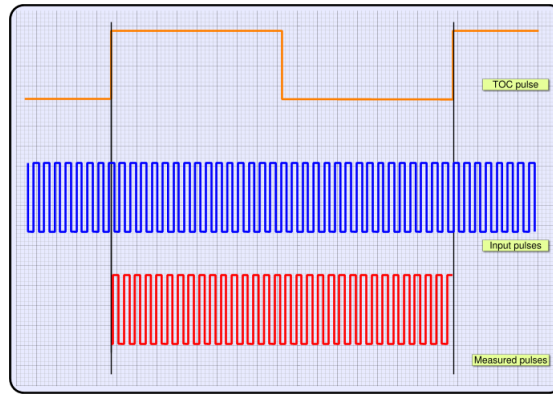


Рис. 2.1. Графічне представлення прямого виміру частоти.

Оранжевим позначено імпульси коливального кола, синім імпульси вимірюваного сигналу, і червоним імпульси які були виміряні.

Якщо частота коливального кола 10 Гц, то його період $\frac{1}{f} = 0.1$ с. Кількість вимірних імпульсів 32. За формулою (2.1), частота сигналу: $f = \frac{Count}{T} = \frac{32}{0.1} = 320$ Гц.

Похибка вимірювання цього методу збільшується, коли частота вимірюваного сигналу зменшується. Цим методом можна вимірювати тільки імпульси, тому ми завжди отримуємо ціле число кількості імпульсів. Якщо коливальне коло має частоту 1 Гц, для вимірюваної частоти 100 Гц, ми отримуємо 100 імпульсів. Для 100.1 Гц ми також отримуємо 100 імпульсів. Для 100.9 Гц буде також отримано 100 імпульсів.

Точність збільшується або коли вимірювана частота збільшується, або коли частота коливального кола зменшується.

2.2. Зворотне вимірювання

Зворотний метод вимірювання більш точний для вимірювань низьких частот, і також може вимірювати високі, хоча і не настільки високі, як метод прямого вимірювання.

Для цього методу, коливальне коло має мати дуже високу частоту. Ідея методу

полягає у тому, щоб виміряти як багато імпульсів коливальне коло може вмістити протягом повного періоду вимірюваного сигналу. На рис. 2.2 зображено процес виміру частоти зворотним методом [14].

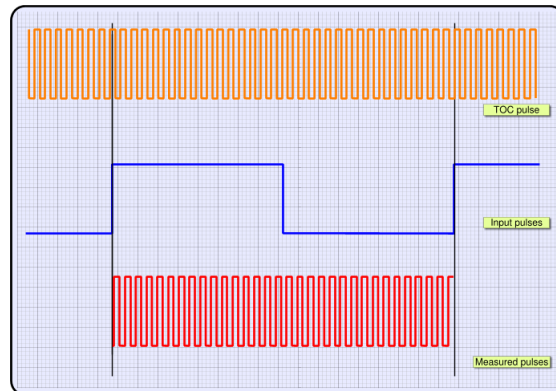


Рис. 2.2. Графічне представлення зворотнього виміру частоти.

Оранжевим позначено імпульси коливального кола, синім імпульси сигналу, який вимірюється, і червоним кількість виміряних імпульсів.

Щоб розрахувати частоту, потрібно поділити частоту коливального кола на кількість виміряних імпульсів:

$$f = \frac{T}{Count} \quad (2.2)$$

Де:

f - Частота вимірюваного сигналу

$Count$ - Кількість виміряних імпульсів

T - Частота коливального кола (у герцах)

Точність вимірювання може бути збільшена шляхом рахування кількості імпульсів коливального кола більше ніж одного повного періоду вимірюваного сигналу:

$$f = n \frac{T}{Count} \quad (2.3)$$

Де n - це повні періоди вимірюваного сигналу під час яких рахуються імпульси коливального кола.

Похибка вимірювання цього методу залежить від частоти коливального кола. Чим більша його частота, тим менша похибка. Рекомендується мати частоту коливального кола хоча б у десять разів більшу ніж максимальна частота, яка буде вимірюватись.

Розділ 3.

Розробка приладу

3.1. ESP32

В основі пристрою для вимірювання частоти сигналу лежить плата розробника ESP32 DevKit V1, до якої під'єднаний LCD та кнопки для керування.

ESP32-WROOM-32 — це потужний загальний модуль MCU Wi-Fi+BT+BLE, який призначений для широкого спектру додатків, починаючи від малопотужних сенсорних мереж і закінчуючи найскладнішими завданнями, такими як кодування голосу, потокове передавання музики та декодування MP3.

В основі цього модуля лежить чіп ESP32-D0WDQ6. Вбудований чіп розроблений таким чином, щоб бути масштабованим і адаптивним. Є два ядра ЦП, якими можна керувати окремо, а тактова частота ЦП регулюється від 80 МГц до 240 МГц. Користувач також може вимкнути центральний процесор і використовувати малопотужний співпроцесор для постійного моніторингу периферійних пристроїв на предмет змін або перевищення порогових значень. ESP32 об'єднує багатий набір периферійних пристроїв, починаючи від ємнісних датчиків дотику, датчиків Холла, інтерфейсу SD-карти, Ethernet, високошвидкісного SPI, UART, I²S та I²C. На рис. 3.1 зображено ESP32 DevKit V1 [15].

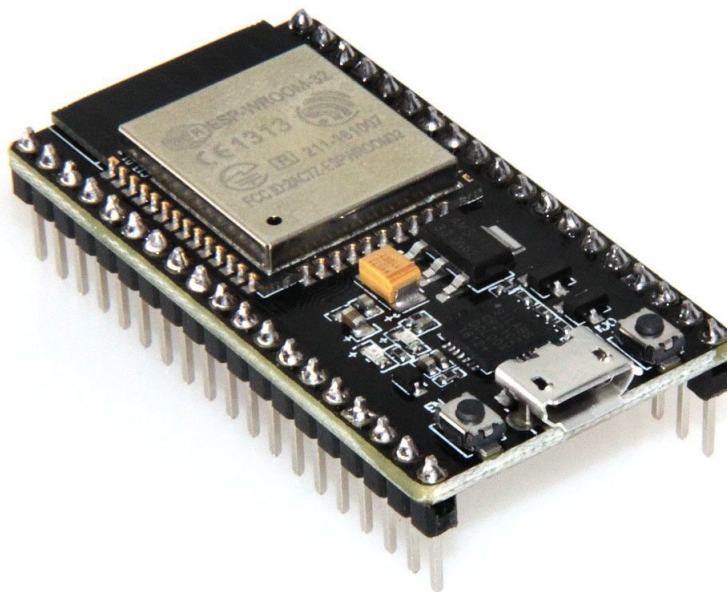


Рис. 3.1. ESP32 DevKit V1.

Інтеграція Bluetooth, Bluetooth LE і Wi-Fi гарантує, що широкий спектр додатків може бути націлений, і що модуль універсальний: використання Wi-Fi забезпечує великий фізичний діапазон і пряме підключення до Інтернету через Wi-Fi, поки Bluetooth дозволяє користувачеві зручно підключатися до телефону. Струм чіпа ESP32 становить менше $5 \mu\text{A}$, що робить його придатним для електроніки, що живиться від батарейок, і для переносних пристроїв. Модуль підтримує швидкість передачі даних до 150 Мбіт/с і вихідну потужність 20 дБм на антені для забезпечення найширшого фізичного діапазону [16].

На рис. 3.2 зображено розпіновку ESP32 DevKit V1 [17].

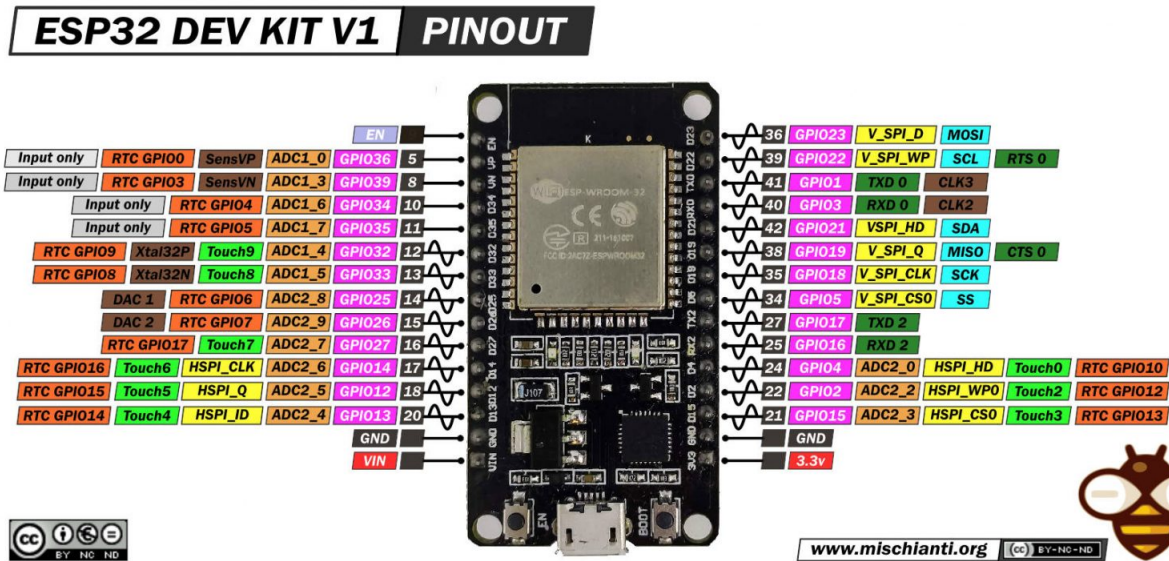


Рис. 3.2. Розпіновка ESP32 DevKit V1.

ESP32 DevKit V1 має комплексну розпіновку, яка забезпечує широкий спектр функцій:

1. **Контакти GPIO:** на платі передбачено численні контакти введення/виведення загального призначення (GPIO), які можна використовувати для різноманітних функцій цифрового введення/виведення. Ці контакти також підтримують такі функції, як PWM, I2C, SPI тощо.
2. **Аналогові входи:** кілька контактів на ESP32 DevKit V1 здатні зчитувати аналогові сигнали, що робить їх придатними для взаємодії з аналоговими датчиками.
3. **Контакти 3,3В і GND:** використовуються для живлення зовнішніх компонентів або датчиків.
4. **5В і GND:** плата також може забезпечити вихід 5 В, що корисно для живлення зовнішніх модулів, які потребують більше енергії.

5. **VIN**: контакт вхідної напруги, який можна використовувати для живлення плати, якщо не використовується з'єднання USB.
6. **UA**: пін-код увімкнення. Він використовується для скидання мікроконтролера.
7. **TX/RX**: ці контакти використовуються для послідовного зв'язку.
8. **Інтерфейс SPI**: на платі є контакти для зв'язку SPI, що забезпечує швидку передачу даних із периферійними пристроями, такими як дисплеї чи флеш-пам'ять.
9. **Інтерфейс I2C**: ESP32 DevKit V1 підтримує зв'язок I2C, який широко використовується для взаємодії з датчиками та іншими периферійними пристроями.
10. **Сенсорні контакти**: деякі GPIO можна використовувати як ємнісні сенсорні входи, пропонуючи інтерфейс для сенсорних пристроїв введення.
11. **VP/VN**: Це контакти для внутрішнього датчика Холла.
12. **Міст USB-UART**: ця функція має вирішальне значення для програмування ESP32 за допомогою USB-кабелю, а також для послідовного зв'язку з комп'ютером або іншими USB-пристроями.

3.2. РК дисплей та кнопки керування

В роботі використовується модуль LCD1602, але також можна використовувати будь-який модуль з контролером Hitachi HD44780.

РК-дисплеї мають паралельний інтерфейс, тобто мікроконтролер має маніпулювати декількома контактами інтерфейсу одночасно, щоб контролювати дисплей. Інтерфейс складається з наступних контактів [17]:

- Підбір вибору реєстру (RS) - контрольне розташування в пам'яті РК- дисплея куди записуються дані. Можна вибрати або реєстр даних, який містить те, що відбувається на екрані, або реєстр інструкцій, де контролер РК-дисплея шукає інструкції щодо чого робити далі.
- Контакт для читання/запису (R/W) - для вибору режиму читання або запису.
- Enable pin - дозволяє записувати в реєстри.
- 8 пінів даних (D0-D7) - Стани цих контактів (високий або низький) є біти, які записуються в реєстр під час запису, або значення які зчитуються при читанні. Окрім цього, є також контакт контрасту дисплея Vo, контакти для живлення VDD (5V) та VSS (GND), та контакти підсвітки дисплею A і K.

На рис. 3.3 зображено контакти РК-дисплею [19].

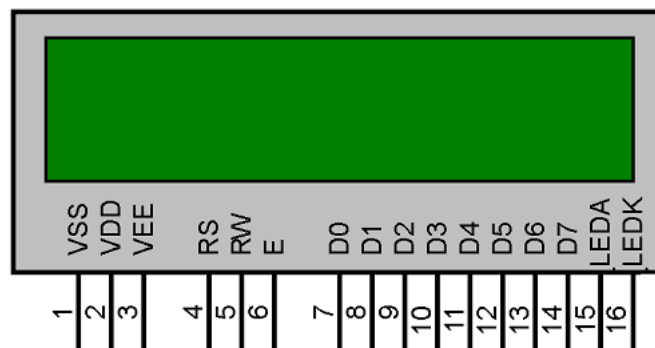


Рис. 3.3. Контакти РК-дисплею.

Керування дисплеєм відбувається за допомогою написання програми для ESP32. Для зручного виводу даних на дисплей використовується бібліотека LiquidCrystal. РК-дисплеями можна керувати в двох режимах: 4-бітному або 8-бітовому. 4-бітовий режим вимагає від Arduino семи контактів вводу-виводу, тоді як 8-бітний режим вимагає 11 контактів.

Для зручності, кнопки керування пристроєм та РК-дисплей об'єднані у одному модулі (MCS01602M). На рис. 3.4 зображено зовнішній вигляд модуля [20].

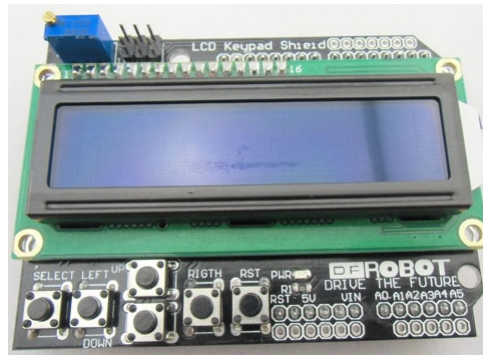


Рис. 3.4. Модуль ПК-клавіатури.

Модуль ПК-клавіатури — це плата, сумісна з Arduino-подібними платами, яка забезпечують зручний інтерфейс, який дозволяє користувачам відображати інформацію на екрані та керувати приладом. Він складається з 16x2 ПК-дисплея з блакитним підсвічуванням та клавіатурою, що складається з 5 кнопок — select, вгору, вправо, вниз і вліво. Щоб зберегти цифрові контакти вводу/виводу, інтерфейс клавіатури використовує лише один канал АЦП. Значення кнопок зчитується через 5-ступінчастий дільник напруги [20].

3.3. Структурна та принципова схеми приладу

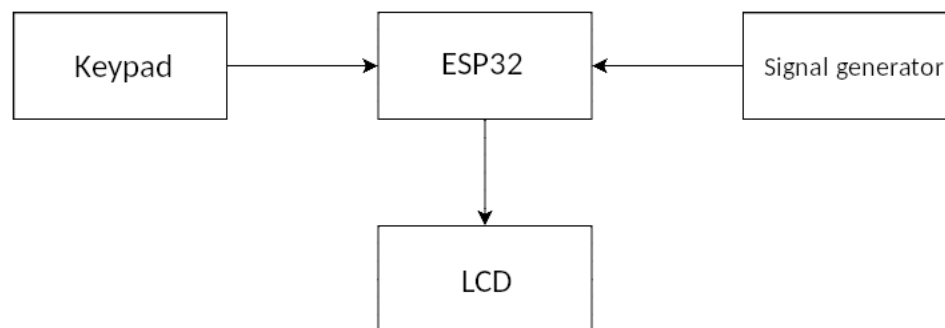


Рис. 3.5. Структурна схема приладу.

З рис 3.5 видно, що керування ESP32 відбувається за допомогою клавіатури. Інформація виводиться на ПК-дисплей, а сигнал на прилад подається від генератора

сигнала.

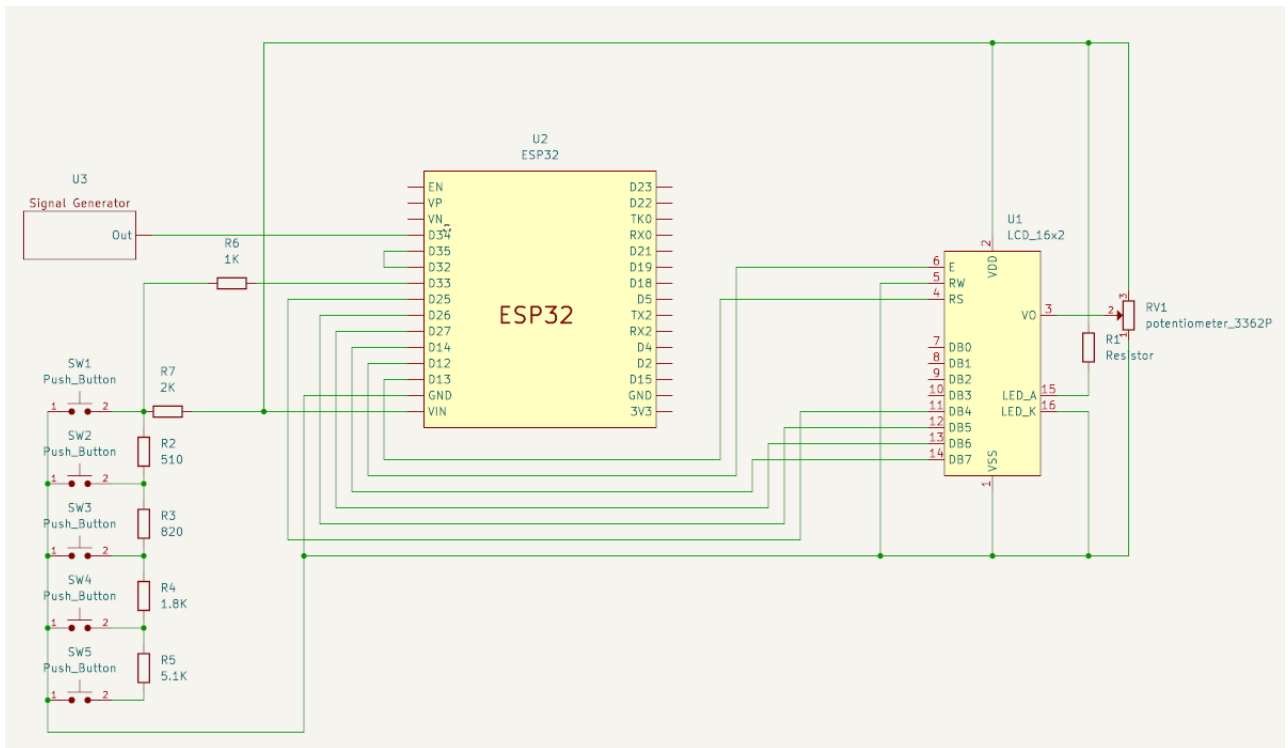


Рис. 3.6. Принципова схема приладу.

З рис 3.6 видно, що контроль яскравістю РК-дисплею відбувається за допомогою потенціометра. РК дисплей підключений до ESP32. Всі кнопки підключені до одного порту ESP32. Перед кожною кнопкою стоїть резистор, який змінює значення яке подається на прилад. Визначення натиснутої кнопки відбувається програмно:

```
btn_input = analogRead(33);
```

```
if (btn_input < 60) return BTN_RIGHT;
```

```
if (btn_input < 800) return BTN_UP;
```

```
if (btn_input < 2000) return BTN_DOWN;
```

```
if (btn_input < 3000) return BTN_LEFT;
```

3.4. Принцип роботи приладу

При увімкненні пристрою, вимірюється F_0 (значення чистого кварца). Потім, при натисканні кнопки *left*, програма переходить в режим установки.

У першому режимі установки, на першому рядку виводиться "Set DFdis", а на другому виводиться "DFdis=...". DF_{dis} – це значення максимального вимірювання частоти кварцу, яке призводить до зупинки вимірювань. Воно має визначатись експериментально для кожної серії кварців. Також записується значення F_{start} - початкове значення частоти перед початком напилення. Після цього виставляється змінна DF_{max} - максимально можливе значення вимірювання частоти при поточному стані кварцу (визначається як $DF_{dis} - (F_{start} - F_0)$).

У другому режимі установки, на першому рядку виводиться "Set Thickness", а на другому рядку виводиться "DFend=...". Значення змінної змінюється кнопками +/- і запам'ятовується після натиснення кнопки select. Після введення числа та натискання на кнопку select, програма перевіряє чи не є DF_{end} більшим за DF_{max} . Якщо DF_{end} є більшим, на екран виводиться повідомлення про помилку та повторно запитується число, доки DF_{end} не стане меншим за DF_{max} . Коли число отримано успішно, виводиться повідомлення про успішне читання.

Далі натискається кнопка *left*, яка викликає команду start. Починається вимірювання частоти, і на першому рядку виводиться "dF/dt=.. Hz/c", що позначає швидкість зміни частоти з інтервалом 1 секунда. Це потрібно для контролю швидкості напилення. На другому рядку виводиться "DFc=... kHz". Це поточне значення приросту частоти, яке визначається за формулою $(F_{start} - F_{end})$. Коли значення частоти доходить до DF_{end} , вимірювання частоти зупиняється і формується логічна одиниця на одному із вихідних портів. Також зупинку вимірювання можна здійснити кнопкою *right*.

На рис. 3.7 зображена блок-схема роботи пристрою.

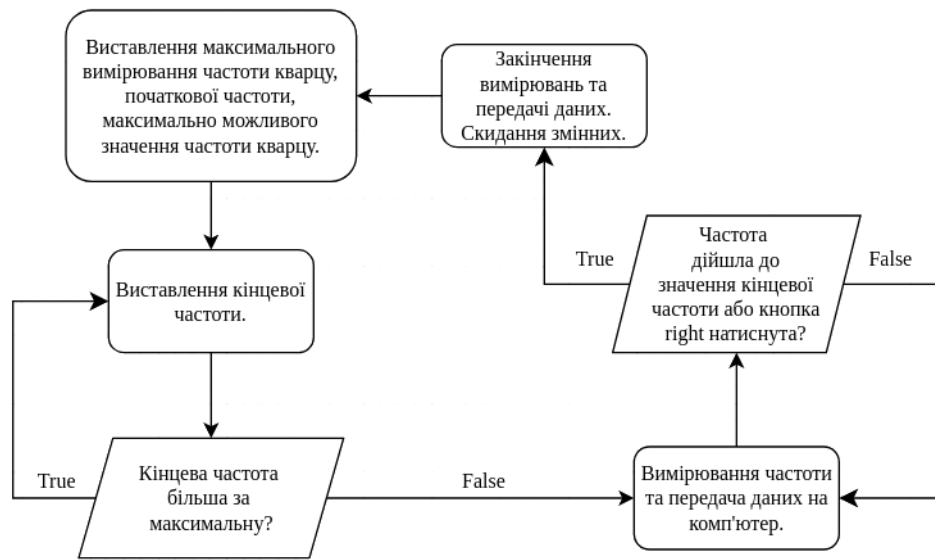


Рис. 3.7. Алгоритм роботи пристрою.

Після зупинки вимірювання всі змінні, окрім F_o скидаються. Після чого, при натисканні кнопки select програма знову входить у режим установки і далі повторювати роботу.

Прилад передає дані про вимірювання за допомогою UART протоколу на комп'ютер, де вони обробляються за допомогою іншої програми.

3.5. Тестування приладу

Тестування приладу відбувалося за допомогою генератора сигналів. Порівняння значень, отриманих з приладу відбувалось за допомогою частотоміра. Відбувалось вимірювання на декількох діапазонах: 1 МГц, 3 МГц, 6 МГц та 8 МГц. Отримані значення порівнювались із вимірюваннями генератора сигналів FY6800, який має функцію вимірювання частоти. Частота вимірювалась з точністю 1 Гц.

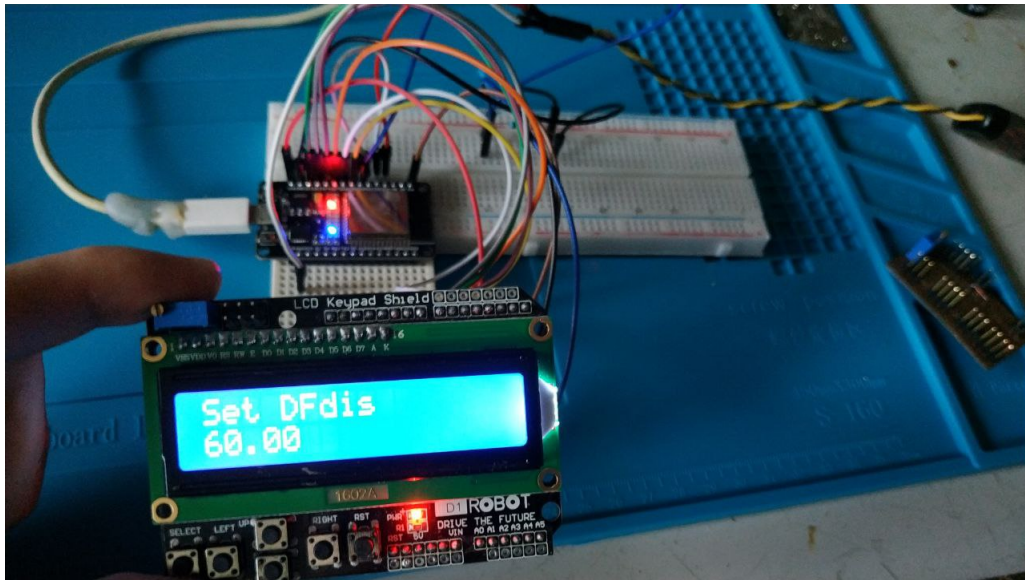


Рис. 3.8. Прилад, зібраний на макетній платі.

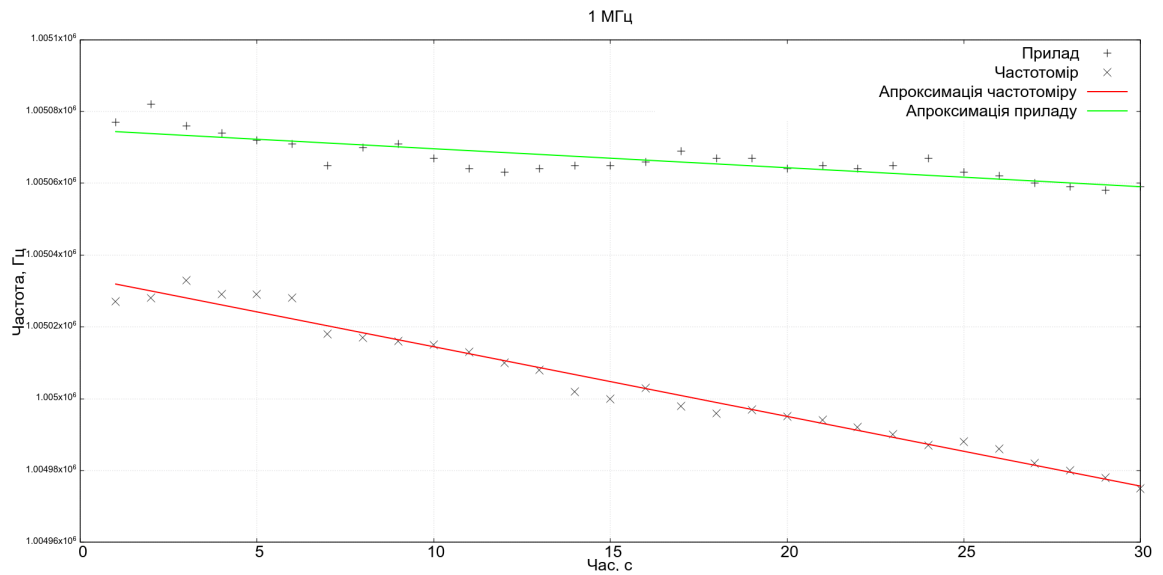


Рис. 3.9. Графік виміру частоти 1 МГц для приладу та частотоміра.

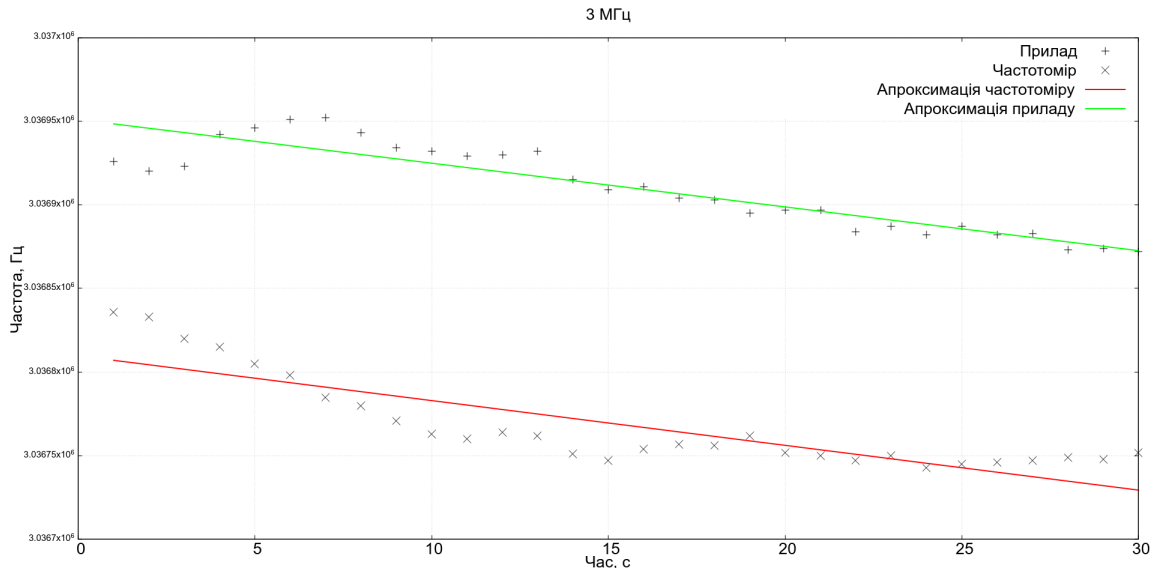


Рис. 3.10 Графік виміру частоти 3 МГц для приладу та частотоміра.

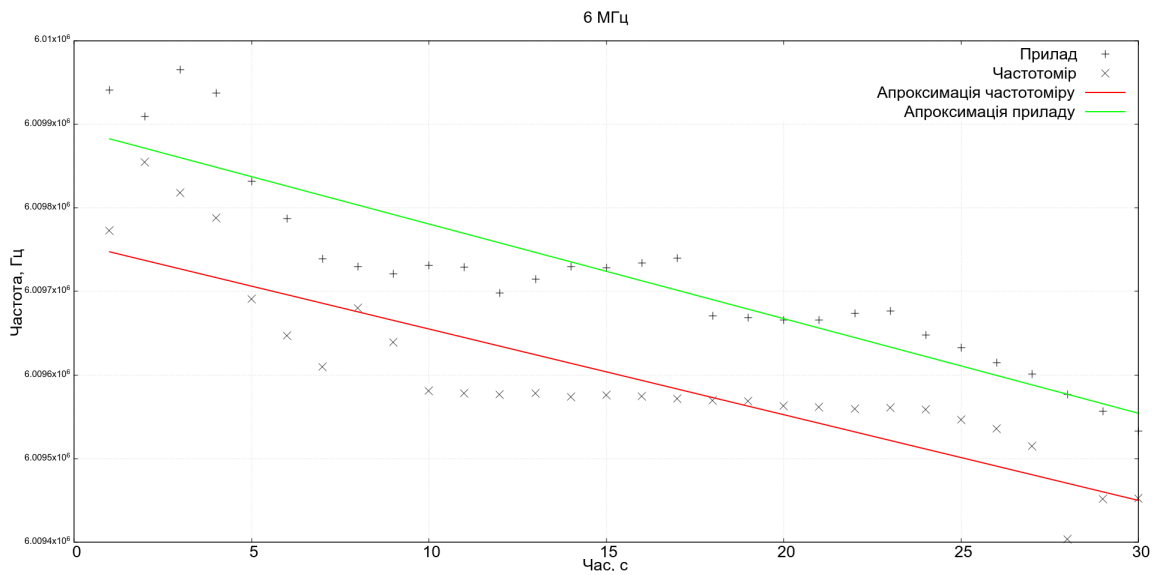


Рис. 3.11. Графік виміру частоти 6 МГц для приладу та частотоміра.

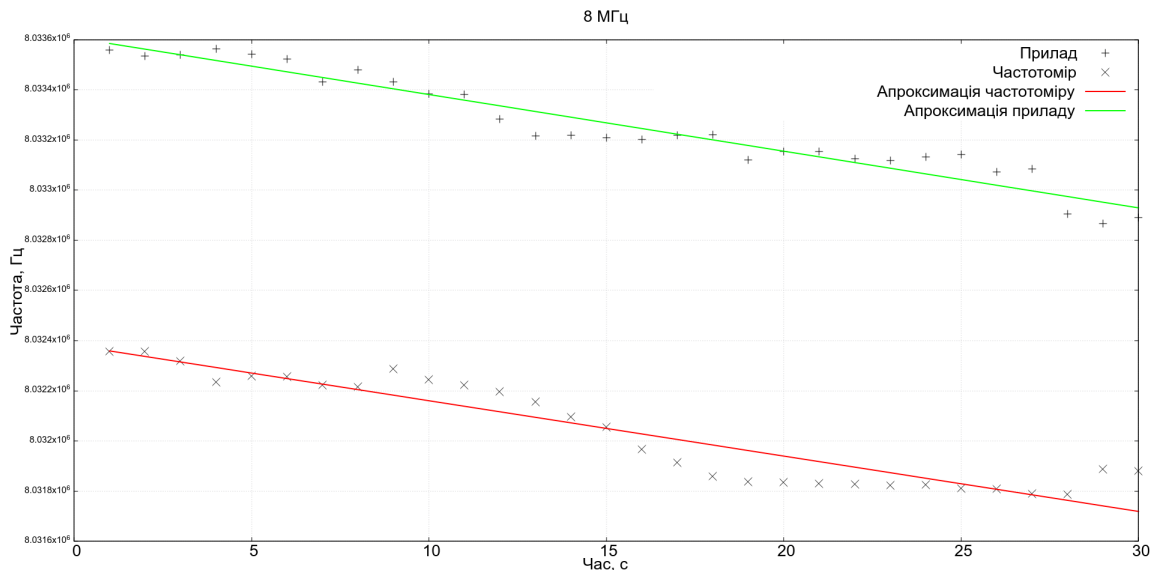


Рис. 3.12. Графік виміру частоти 8 МГц для приладу та частотоміра.

На рисунках зображено графіки різниці показів вимірювань для приладу та частотоміра на різних частотах. З рисунків видно, що вимірювання частот приладу і частотоміра є схожими.

Таблиця 3.1

Середньоквадратичні похибки вимірювань приладу та частотоміра на різних частотах

Частота	Прилад	Частотомір
1 МГц	2.97 Гц	2.61 Гц
3 МГц	10.22 Гц	14.36 Гц
6 МГц	43.76 Гц	48.38 Гц
8 МГц	51.47 Гц	72.63 Гц

На таблиці показано середньоквадратичні похибки вимірювань приладу та частотоміра на різних частотах. Середнє значення середньоквадратичних похибок для приладу складає 27.1 Гц та 34.49 Гц для частотоміра. Різниця складає 7.3 Гц.

Таблиця 3.2**Середні значення вимірюваних частот**

Частота	Прилад	Частотомір	Різниця
1 МГц	1005066.7 Гц	1005003.8 Гц	62.89 Гц
3 МГц	3036910.5 Гц	3036768.2 Гц	142.29 Гц
6 МГц	6009718.4 Гц	6009598.7 Гц	120.4 Гц
8 МГц	8033256.6 Гц	8032039.3 Гц	1217.29 Гц

На таблиці вказані середні значення вимірювань приладом і частотоміром на різних частотах. Зі збільшенням частоти збільшується похибка вимірювання, або це може бути пов'язано з нестабільною роботою самого генератора.

Таблиця 3.3**Точність вимірювання приладу**

Частота	Точність
1 МГц	0.36 Гц
3 МГц	4.13 Гц
6 МГц	4.62 Гц
8 МГц	21.15 Гц

На таблиці показана точність приладу на різних частотах, за умови взяття частотоміра FY6800 за еталон. Точність приладу спадає з підвищенням частоти.

Симуляція наплення плівки проводилась шляхом поступового зменшення частоти генератора сигналів протягом періоду часу.

Точність вимірювання товщини плівки кварцового резонатора залежить від багатьох факторів, таких як температура, резонансна частота кристала, маса кристала, стабільність генератора. Якщо кристал стабільно генерує сигнал 8 МГц та має масу 100 мкг, то можна контролювати приріст маси з чутливістю 0.42 мкг/Гц.

У ході тестування було підтверджено працездатність приладу та визначена точність отриманих результатів у порівнянні з частотоміром.

Розділ 4.

Розробка програми

4.1. Принцип роботи програми

Було розроблено комп'ютерну програму для обробки даних з пристрою. Програма дозволяє візуалізувати зміну частоти кварцового резонатора та вирахувати значення товщини плівки. На рис. 4.1 зображено графічний інтерфейс користувача.

File	Start measurement	Select port	Quit
Quartz density	<input type="text"/>		
Frequency change	<input type="text"/>		
Quartz frequency	<input type="text"/>		
Number of measured points	155		
Minimum frequency	1815250		
Average frequency	2414340		
Maximum frequency	3306010		
Thickness			

Рис. 4.1. Графічний інтерфейс користувача.

Інтерфейс користувача складається з панелі інструментів, та області на якій друкуються дані про вимірювання. Після закінчення вимірювання на екрані друкуються дані про кількість виміряних точок, мінімальну, середню та максимальну частоти та товщину виміряної плівки.

На панелі інструментів розташовані кнопки відкриття та зберігання файлу з даними про вимірювання. При відкритті файлу, будується графік залежності зміни частоти від часу (рис. 4.2).

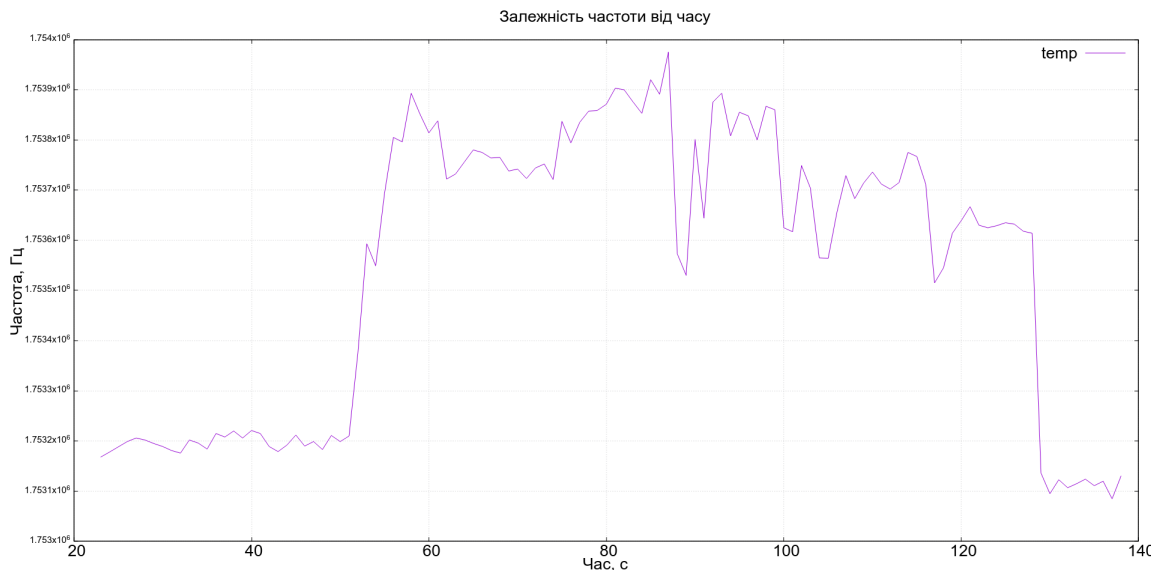


Рис. 4.2 Графік залежності частоти від часу.

Для того, щоб почати вимірювання, потрібно натиснути на "Select port" щоб вибрати порт, до якого підключений прилад. Далі, при натисканні кнопки "Start measurement" програма починає приймати дані з пристрою, обробляти їх та будувати графік у реальному часі. Після закінчення вимірювання, програма розраховує товщину плівки за формулою (1.4).

Висновки

У ході виконання роботи було розроблено прилад для вимірювання частоти вхідного сигналу, та програму для обробки вимірної частоти та вимірювання товщини плівки. Тестування приладу відбувалось за допомогою частотоміра. У ході тестування було визначено відносну похибку приладу та його точність для різних діапазонів вимірюваних частот. За ідеальних умов, точність детектування маси складає 0.42 мкг/Гц.

Метою роботи була розробка програмно-апаратного комплексу для вимірювання товщини тонких плівок та опис методик цифрового вимірювання частоти.

У сучасній електроніці широко застосовуються пристрої та компоненти, які зроблені за допомогою гетероструктур, в склад яких входять тонкі плівки. Тому питання вимірювання товщини тонких плівок є серйозною сучасною проблемою, оскільки існує потреба у точному збігу параметрів гетероструктур.

Практична цінність результату роботи полягає у використанні програмно-апаратного комплексу для вимірювання товщини тонких плівок для потреб електроніки, біології, хімії, та інших галузей науки.

Список використаних джерел

1. Korotcenkov G. Thin metal films. Handbook of Gas Sensor Materials: Properties, Advantages and Shortcomings for Applications. Integrated Analytical Systems. Springer, 2013 P. 153–166.
2. Azhazha V. M., Semenenko V. E., Pilipenko N. N. Ni-Ni₃B Composite coating *Power Metallurgy and Metal Ceramic*. Kharkiv, 2007. P. 32-37.
3. Azhaza V. M., Azarenko N. A., Semenenko V. E., Podzolkova V. V. *Microstructure and hardness of natural composite materials* Materials Int. Conf. “Modern Materials Science: Achievement and Problems”, September 26-30, Kyiv, 2005. 1. P. 15-17.
4. Maurelerst A., King M. Comparison of fractal analyses methods and fractal dimensions for pretreated studies steel surface and the correlation to address join strength *J. Appl. Phys.*, 2001. A.73. P. 347-355.
5. А.В. Кузьмін, В.Е. Семененко, Н.Г. Стервоедов, А.С. Посухов. Резонансний метод визначення товщин вакуумно-осаджених тонких плівок. *Радіофізика та електроніка*. 2008. Т. 13, № 2. С. 214-217.
6. Basics and Applications of a Quartz Crystal Microbalance Monitoring Surface Interactions via Small-scale Mass Changes. Gamry Instruments. 31 с.
URL: <https://mmrc.caltech.edu/Gamry/literature/Basics-Applications-QCM.pdf> (дата звернення 10.05.2024).
7. Quartz Crystal Microbalance (QCM). NanoScience Instruments.
URL: <https://www.nanoscience.com/techniques/quartz-crystal-microbalance/> (дата звернення 10.05.2024).
8. Sauerbrey, Günter Hans. ”Verwendung von Schwingquarzen zur Wägung dünner Schichten und zur Mikrowägung” *Zeitschrift für Physik*, 1959. P. 206-222.

9. C. Lu, O. Lewis. Investigation of film-thickness determination by oscillating quartz resonators with large mass load. *J. Appl. Phys.* 1972. Volume 43, Issue 11, P. 4385-4390
10. R. M. Mueller and W. White, *Rev. Sci. Instrum.* 39,291 (1968).
11. R. B. Sosman, *The Properties of Silica: An Introduction to the Properties of Substances in the Solid Non-conducting State*. Chemical Catalog Company, Inc., New York, 1927.
12. T. Nomura and O. Hattori. Determination of micromolar concentrations of cyanide in solution with a piezoelectric detector. *Analytica Chimica Acta.* 115. 1980. P. 323-326.
13. QCM100-Quartz Crystal Microbalance Theory and Calibration. Stanford Research Systems. (2005)
14. Lazaridis G. Frequency Measuring
URL: https://www.pcbheaven.com/wikipages/Frequency_Measuring (дата звернення 12.05.2024).
15. ESP32-WROOM-32 WIFI Bluetooth Combo. Feasycom. URL: <https://www.feasycom.net/wifi-combo/esp32-wroom-32-wifi-bluetooth-combo.html> (дата звернення 17.05.2024).
16. ESP32-WROOM-32 Datasheet. Espressif Systems. (2019)
17. Mischianti R. DOIT ESP32 DEV KIT V1: high resolution pinout and specs. 2021.
URL: <https://mischianti.org/doit-esp32-dev-kit-V1-high-resolution-pinout-and-specs/>
(дата звернення 17.05.2024).
18. Arduino Docs. Liquid Crystal Displays (LCD) with Arduino. 2023
URL: <https://docs.arduino.cc/learn/electronics/lcd-displays> (дата звернення 17.05.2024).

19. 16x2 LCD Display Module. Circuit Digest. URL: <https://circuitdigest.com/article/16x2-lcd-display-module-pinout-datasheet> (2015) (дата звернення 17.05.2024).
20. LCD Keypad Shield. Elecrow. URL: <https://www.elecrow.com/wiki/lcd-keypad-shield.html> (дата звернення 17.05.2024)