

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Західноукраїнський національний університет
Факультет комп'ютерних інформаційних технологій
Кафедра спеціалізованих комп'ютерних систем

ДОРОШЕНКО ОЛЕКСАНДР ВІТАЛІЙОВИЧ

Портативний мультиметр / Portable multimeter

спеціальність 152 – Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка
освітньо професійна програма – Технології інтернету речей

Кваліфікаційна робота

Виконав студент групи
МТІР – 41 О.В.Дорошенко

Науковий керівник :
к.т.н. доцент Б.О.Масляк

Кваліфікаційну роботу
допущено до захисту

«___» _____ 2025р.

Завідувач кафедри

_____ А.І.Сегін

Тернопіль - 2025

Факультет комп'ютерних інформаційних технологій
Кафедра спеціалізованих комп'ютерних систем
Освітній ступінь "бакалавр"

Спеціальність: 152 – Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка
Освітньо-професійна програма – Технології інтернету речей

“ЗАТВЕРДЖУЮ”
Завідувач кафедри СКС

_____ А.І. Сегін
“ _____ ” _____ 2025р.

З А В Д А Н Н Я

НА ВИПУСКНУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Дорошенко Олександр Віталійовичу

(прізвище, ім'я по-батькові)

1. Тема випускної кваліфікаційної роботи
Портативний мультиметр / Portable multimeter

Керівник роботи _____ к.т.н., доцент Б.О.Масляк
затверджені наказом по університету від ”28” грудня 2024 р. № 938

2. Строк подання студентом закінченої випускної кваліфікаційної роботи: 25 травня 2025р.

3. Вихідні дані до випускної кваліфікаційної роботи:
1. Технічні характеристики цифрових мультиметрів
2. Методи вимірювання та моніторингу електричних параметрів побудовані з використанням мультиметра
3. Характеристики мікроконтролера ESP 32

4. Основні питання, які потрібно розробити:
1. Аналіз особливостей будови та функціонування мультиметра в режимі вимірювання параметрів електричних кіл.
2. Проектування структури портативного мультиметра.
3. Програмно-апаратна реалізація аналогових електричних кіл та цифрової обробки вимірюваних сигналів.

5. Перелік графічного матеріалу у роботі:
1. Структурна схема портативного мультиметра.

2. Структурна схема підключення сигналів U , A , R , C , L до мультиметра в режимі вимірювань.
3. Схема автоматичного вибору діапазону вимірювань
4. Електрична схема аналогового комутатора.

6. Консультанти розділів випускної кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
1	Масляк Б.О.		
2	Масляк Б.О.		
3	Масляк Б.О.		

7. Дата видачі завдання 28 листопада 2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назви етапів випускної кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз ринку та технічних характеристик цифрових мультиметрів	12.2024р. – 01.2025р.	
2	Проектування структури та основних вузлів мультиметра	02.2025р. – 03.2025р.	
3	Апаратно-програмна реалізація основних компонентів мультиметра	04.2025р. – 05.2025р.	

Студент

(підпис)

Дорошенко О.В.

Керівник роботи

(підпис)

к.т.н., доц. Масляк Б.О.

РЕФЕРАТ

Робота виконана на 69 сторінках та містить 23 рисунки, 13 джерел за переліком посилань.

Мета роботи. Розробка портативного мультиметра для вимірювання напруги, струму, опору, ємності та індуктивності.

Результати роботи. У рамках проєкту було розроблено прототип портативного мультиметра, призначеного для вимірювання напруги, струму, опору, ємності та індуктивності. Для реалізації перемикання між різними вимірювальними каналами використано аналогові комутатори, які автоматично підключають вхідні сигнали до відповідних схем вимірювання.

У пристрої реалізовано алгоритм автоматичного визначення діапазону вимірювань, що базується на двоетапному аналізі вхідного сигналу — спочатку проводяться попередні вимірювання, після чого обирається оптимальний діапазон для точного результату.

Усі обчислення, керування схемами та обробка результатів виконуються мікроконтролером ESP32, який також забезпечує передачу даних через Wi-Fi. Це дає змогу надсилати результати вимірювань на віддалений сервер або інтерфейс користувача. Конструкція мультиметра оптимізована для портативного використання, з урахуванням компактності та енергоефективності.

Рекомендації по використанню результатів роботи. Розроблений портативний мультиметр рекомендується застосовувати при потребі вимірювання параметрів електричних кіл у різних сферах.

Ключові слова. ВИМІРЮВАННЯ, НАПРУГА, СТРУМ, ОПІР, ЄМНІСТЬ, МУЛЬТИМЕТР, ДРОТОВИЙ ТА БЕЗДРОТОВИЙ ІНТЕРФЕЙС, МІКРОКОНТРОЛЕР, ПРОГРАМНИЙ СКЕТЧ.

ABSTRACT

The work is completed on 69 pages and contains 23 figures, 13 sources according to the list of references.

Purpose of the work. Development of a portable multimeter for measuring voltage, current, resistance, capacitance and inductance.

Results of the work. As part of the project, a prototype of a portable multimeter was developed, designed to measure voltage, current, resistance, capacitance and inductance. Analog switches were used to implement switching between different measurement channels, which automatically connect input signals to the corresponding measurement circuits. The device implements an algorithm for automatically determining the measurement range, based on a two-stage analysis of the input signal - first, preliminary measurements are performed, after which the optimal range is selected for an accurate result. All calculations, circuit control and processing of results are performed by the ESP32 microcontroller, which also provides data transmission via Wi-Fi. This allows you to send measurement results to a remote server or user interface. The design of the multimeter is optimized for portable use, taking into account compactness and energy efficiency.

Recommendations for using the results of the work. The developed portable multimeter is recommended for use when measuring parameters of electrical circuits in various fields.

Keywords. MEASUREMENT, VOLTAGE, CURRENT, RESISTANCE, CAPACITIVENESS, MULTIMETER, WIRED AND WIRELESS INTERFACE, MICROCONTROLLER, SOFTWARE SKETCH.

3MICT

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	7
Вступ	8
Розділ 1. Особливості ринку портативних мультиметрів та теоретичні основи вимірювань електричних величин	13
1.1. Аналіз та основні характеристики портативних мультиметрів	13
1.2. Принципи вимірювання основних електричних величин	16
1.3. Принципи вимірювання додаткових величин - ємність, індуктивність	21
1.4. Аналіз джерел похибок вимірювань в мультиметрах	25
1.5. Огляд сучасних технологій створення мультиметрів та постановка задачі	27
Розділ 2. Проектування портативного мультиметра	32
2.1. Розробка структури та обґрунтування вибору основних компонентів мультиметра	32
2.2 Розробка принципових електричних схем вимірювальних кіл в режимі ручного управління	38
2.3. Розробка принципових електричних схем вимірювальних кіл в режимі автоматичного управління	46
Розділ 3. Програмна реалізація та особливості калібрування	53
3.1. Розробка алгоритму роботи програмного забезпечення	53
3.2. Налаштування середовища та розробка програмного скетчу	56
3.3. Особливості методики калібрування мультиметра	63
Висновки	67
Список використаних джерел	68

					ДП.МТІР.9702577.00.00.00.000 ПЗ							
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Портативний мультиметр / Portable multimeter				Літ.	Арк.	Акрушів	
Розроб.		Дорошенко О.В.									6	69
Перевірів.		Масляк Б.О.										
Консульт.												
Н. Контр.		Масляк Б.О										
Затверд.		Сегін А.І.							ЗУНУ.ФКІТ.МТІР-41			

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

М – мультиметр

МК – мікроконтролер;

ВК – вимірювальний канал

АЦП – аналого-цифровий перетворювач

ЦАП – цифро - аналоговий перетворювач

САВД – схема автоматичного вибору діапазону вимірювань

ПЗ – програмне забезпечення

					ДП.МТІР.9702577.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						7
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

ВСТУП

Сучасний розвиток технологій зумовлює зростаючу потребу в портативних, точних та універсальних вимірювальних приладах, які знаходять застосування в різних галузях, таких як електроніка, ремонт, освіта, наукові дослідження та хобі. Точність вимірювань є критично важливою для забезпечення надійності, безпеки та ефективності роботи електронних систем, адже навіть незначні похибки можуть призвести до серйозних наслідків. На ринку представлено широкий асортимент портативних мультиметрів, які дозволяють вимірювати такі електричні величини, як напруга, струм, опір, ємність, частота тощо. Проте більшість доступних моделей мають певні обмеження, зокрема недостатню точність у деяких діапазонах, громіздкість, обмежений функціонал або високу вартість, що робить актуальним створення нових рішень, які поєднували б компактність, універсальність і високу точність.

Сучасні напрямки розробки портативних мультиметрів зосереджені на підвищенні точності, компактності, енергоефективності, інтеграції з цифровими технологіями та розширенні функціональності. Нижче наведено розгорнутий аналіз сучасних тенденцій у цій галузі, доповнений інформацією про актуальність, методи підвищення точності вимірювань та приклади інноваційних рішень, з урахуванням наданих джерел та загальних тенденцій у вимірювальній техніці [1, 2].

Актуальність теми

Зростання попиту на портативні мультиметри обумовлене їх широким застосуванням у промислових, освітніх, наукових та побутових сферах. У сучасному світі, де електронні пристрої стають дедалі складнішими, точність вимірювань напруги, струму, опору, ємності, частоти та інших параметрів є критично важливою для забезпечення безпеки, надійності та якості роботи систем. Наприклад, у ремонті електроніки, автоматизації виробництва чи розробці IoT-пристроїв потрібні компактні прилади з високою точністю та можливістю інтеграції з іншими системами. Водночас існуючі мультиметри

					ДП.МТІР.9702577.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		8

часто мають обмеження, такі як недостатня точність у низьких діапазонах вимірювань, громіздкість або відсутність сучасних інтерфейсів для передачі даних. Це створює потребу в розробці нових моделей, які відповідають сучасним вимогам.

Сучасні напрямки розробки портативних мультиметрів передбачають вирішення низки проблем. Це, насамперед, мініатюризація та енергоефективність. Сучасні мультиметри стають дедалі компактнішими завдяки прогресу в мікроелектроніці. Використання енергоефективних компонентів, таких як низькопрофільні мікроконтролери (наприклад, Arduino Pro Mini, Arduino Nano33BLE, STM32) та енергоощадні дисплеї, дозволяє створювати портативні пристрої з тривалим часом автономної роботи. Це особливо важливо для польових умов, де доступ до джерел живлення обмежений.

Наступною проблемою є інтеграція з цифровими технологіями. Одним із ключових напрямків є поєднання мультиметрів із сучасними засобами комунікації, такими як Bluetooth, Wi-Fi або USB для передачі даних на смартфони, планшети чи комп'ютери. Це дозволяє користувачам зберігати, аналізувати та візуалізувати результати вимірювань у реальному часі через спеціалізовані додатки. Наприклад, мультиметри на базі Arduino та STM32 можуть передавати дані на мобільні пристрої, що підвищує зручність використання в освіті чи хобі.

Сучасні мультиметри оснащуються інтелектуальними сенсорами та алгоритмами цифрової обробки сигналів, які зменшують шум і підвищують точність вимірювань. Наприклад, використання первинної обробки інформації та фільтрації шумів дозволяє досягти високої точності навіть у складних умовах (високий електромагнітний фон, низькі значення сигналів).

Розширення функціональності - нові моделі мультиметрів здатні вимірювати не лише базові параметри (напруга, струм, опір), але й додаткові величини, такі як температура, індуктивність, частота сигналів чи навіть параметри оптичних систем. Наприклад, інтеграція інфрачервоних датчиків

					ДП.МТІР.9702577.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		9

дозволяє вимірювати температуру безконтактно, що розширює сферу застосування приладів.

Для підвищення точності застосовуються нові методи калібрування, використання високоточних аналого-цифрових перетворювачів (АЦП) та вдосконалених захисних ланцюгів. Наприклад, точність вимірювань залежить від якості вхідних захисних ланцюгів, які потрібно регулярно перевіряти, щоб уникнути похибок. Сучасні дослідження також зосереджені на розробці нових матеріалів для сенсорів, що підвищують чутливість і стабільність вимірювань.

Сучасні мультиметри оснащуються мікропроцесорами для автоматичного вибору діапазону вимірювань, самокалібрування та виявлення помилок. Це знижує ймовірність людських помилок і полегшує використання приладів непрофесіоналами.

Деякі мультиметри розробляються з модульною архітектурою, що дозволяє додавати нові функції чи оновлювати компоненти без необхідності заміни всього приладу. Наприклад, сучасні вимірювальні комплекси підтримують масштабовані діапазони вимірювань і обмін даними через цифрові шини.

Точність вимірювань є ключовим параметром портативних мультиметрів, оскільки вона безпосередньо впливає на їхню надійність. Основні фактори, що впливають на точність, включають:

- Якість компонентів: Використання високоточних АЦП, високостабільних джерел опорної напруги та стабільних резисторів - це значно знижує похибки.

- Калібрування: Розробка методик калібрування, які враховують різні діапазони вимірювань (наприклад, низькі значення ємності чи індуктивності), є критично важливою. Неточність калібрування може призвести до систематичних помилок.

- Захист від зовнішніх впливів: Електромагнітні перешкоди, температура та вологість можуть впливати на точність. Сучасні мультиметри оснащуються екрануванням і алгоритмами компенсації зовнішніх впливів.

					ДП.МТІР.9702577.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		10

– Статистичний аналіз даних: Для оцінки точності проводяться експериментальні дослідження з використанням статистичних методів, таких як обчислення середнього значення, дисперсії та похибки. Це дозволяє порівняти розроблений мультиметр із комерційними аналогами.

Мета роботи

Метою даної кваліфікаційної роботи є розробка портативного мультиметра, яка б відповідала сучасним вимогам до точності, портативності та універсальності, а також проведення аналізу її точності для різних видів вимірювань. Для досягнення цієї мети визначено низку завдань: провести огляд існуючих портативних мультиметрів та їхніх принципів роботи; обрати оптимальну архітектуру та компоненти для створення мультиметра; розробити принципову електричну схему та, за необхідності, програмне забезпечення; створити фізичну модель приладу (макет або прототип); розробити методику калібрування та оцінки точності для вимірювання напруги, струму, опору, ємності, частоти тощо; провести експериментальні дослідження для визначення точності розробленого мультиметра в різних діапазонах вимірювань; проаналізувати отримані результати та порівняти їх із характеристиками комерційних аналогів; сформулювати висновки та визначити перспективи подальшого розвитку.

Об'єктом дослідження є портативний мультиметр як електронний вимірювальний прилад, призначений для виконання різноманітних вимірювань електричних величин. Предметом дослідження виступає точність вимірювань цих величин розробленим мультиметром, що є ключовим показником його ефективності та конкурентоспроможності.

Методи дослідження

Для реалізації поставлених завдань будуть використані такі методи дослідження: аналіз науково-технічної літератури та існуючих рішень для визначення сучасного стану галузі; системний аналіз та моделювання для вибору оптимальної архітектури приладу; електричне моделювання для розробки схемотехнічних рішень; проектування та конструювання електронних пристроїв

					ДП.МТІР.9702577.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		11

для створення прототипу; експериментальні дослідження для оцінки точності вимірювань; статистичний аналіз отриманих даних для обґрунтування результатів.

Розробка портативного мультиметра з високою точністю та аналіз його характеристик сприятимуть створенню ефективного інструменту, який може бути використаний у різних сферах, а також відкриють перспективи для подальших удосконалень у цій галузі.

					ДП.МТІР.9702577.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						12
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

1. ОСОБЛИВОСТІ РИНКУ ПОРТАТИВНИХ МУЛЬТИМЕТРІВ ТА ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ВИМІРЮВАНЬ ЕЛЕКТРИЧНИХ ВЕЛИЧИН

1.1. Аналіз та основні характеристики портативних мультиметрів

Портативні мультиметри є одним з найпоширеніших типів вимірювальних приладів, що застосовуються в електроніці, електротехніці, ремонті та технічній діагностиці. Їх популярність зумовлена компактністю, зручністю використання та широким спектром функцій, які дозволяють виконувати як базові, так і спеціалізовані вимірювання [2, 3].

Залежно від функціональних можливостей, портативні мультиметри поділяються на кілька основних типів. Найпростішими є базові цифрові мультиметри, які забезпечують вимірювання постійної та змінної напруги, сили струму та опору. Вони орієнтовані переважно на побутове та навчальне використання. Прикладами таких моделей є DT-830B або M830 -рисунок 1.1.. Хоча їхні технічні характеристики обмежені, вони залишаються доступними та корисними для простих завдань.



Рисунок 1.1 – Базовий тип Мультиметрів

Більш розширений клас представляють мультиметри середнього рівня, які додатково підтримують функції перевірки діодів, транзисторів, прозвонки

					ДП.МТІР.9702577.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		13

ланцюга, вимірювання ємності та температури. Такі пристрої, як правило, мають вищу точність, кращу роздільну здатність дисплея, а іноді — автоматичний вибір діапазону. До прикладу, мультиметри серії UNI-T UT61 або Victor VC890C+ дозволяють використовувати їх у професійній діяльності для більш точного контролю параметрів – рисунок 1.2.

Окрему категорію становлять професійні та лабораторні портативні мультиметри, які оснащені широким спектром функцій: True RMS-вимірювання, інтерфейси передачі даних (USB, Bluetooth), підвищена точність (аж до 0.025% на постійній напрузі), вбудований реєстратор даних, а також розширені системи захисту.



Рисунок 2.2 – Мультиметр середнього рівня VICTOR VC890C

Прикладами таких пристроїв є Fluke 87V, Brymen BM869s, Keysight U1282A. Вони широко використовуються в промисловості, лабораторних умовах та сфері технічного обслуговування високоточних систем – рисунок 1.3.

Портативні мультиметри також класифікують за типом дисплея (LCD, графічний, сегментований), системою живлення (батарейки, акумулятори), наявністю автоматичного вимкнення, міцністю корпусу (включно з пило- та вологозахистом), а також робочим температурним діапазоном. Для польових умов особливо актуальними є мультиметри з корпусами підвищеної міцності, які витримують падіння, перепади температур і вологу.

					ДП.МТІР.9702577.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		14



Рисунок 1.3 – Високоточний мультиметр фірми Fluke

Сучасні мультиметри нерідко інтегруються з цифровими технологіями — наприклад, через Bluetooth або Wi-Fi, що дозволяє дистанційно переглядати результати вимірювань на смартфоні або комп'ютері. Це відкриває нові можливості для ведення протоколів, діагностики у важкодоступних місцях або побудови систем інтернету речей (IoT).

У таблиці 1.1 нижче наведено порівняльний аналіз характеристик кількох популярних моделей мультиметрів із різних класів.

Таблиця 1.1 – Характеристики популярних моделей мультиметрів

Модель	Клас точності	True RMS	Інтерфейс передачі даних	Додаткові функції	Ціна (орієнт.)
DT-830B	±1.0%	Ні	Немає	Базові функції	6–10 USD
UNI-T UT61E+	±0.1%	Так	USB	Ємність, частота, температура	50–70 USD
Brymen BM869s	±0.03%	Так	USB	True RMS, LoZ, data logging	150–180 USD

Модель	Клас точності	True RMS	Інтерфейс передачі даних	Додаткові функції	Ціна (орієнт.)
Fluke 87V	$\pm 0.05\%$	Так	Так (опційно)	Промислові вимірювання	350–400 USD
Aneng M118A	$\pm 0.5\%$	Так	Bluetooth	Робота зі смартфоном, автоHold	25–35 USD

Як видно з таблиці, технічні характеристики мультиметрів значною мірою залежать від їхнього цільового призначення. Прості моделі забезпечують базові потреби в навчанні та побуті, тоді як професійні — підходять для складних завдань у сфері електроніки, енергетики та автоматизації.

Таким чином, класифікація портативних мультиметрів дозволяє обрати оптимальний прилад залежно від завдань, бюджету та умов експлуатації. Розуміння основних характеристик мультиметрів є необхідним етапом при проектуванні будь-якої вимірювальної системи або її поєднанні з мікроконтролерами у вбудованих рішеннях.

1.2. Принципи вимірювання основних електричних величин

В схемі мультиметра, коли він використовується для вимірювання напруги, формується спеціальне вимірювальне коло, яке дає змогу точно визначати різницю потенціалів між двома точками зовнішнього кола. Основу цього кола становлять високоомний вхід, аналогово-цифровий перетворювач (АЦП), а також допоміжні електронні компоненти, що забезпечують надійність і захист пристрою [2-5].

Принцип роботи мультиметра при вимірюванні напруги:

Коли користувач під'єднує щупи мультиметра до вимірюваної точки, напруга з зовнішнього кола прикладається до входу мультиметра. Цей вхід повинен мати дуже великий внутрішній опір (часто понад 10 МОм), щоб не створювати помітного навантаження на досліджувану схему рисунок 1.4.

Далі, напруга проходить через:

					ДП.МТІР.9702577.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		16

— захисні елементи — на вході мультиметра розташовано діоди або варистори, які захищають чутливі компоненти від перенапруг (наприклад, при випадковому підключенні до високої напруги або струму).

— дільник напруги — резистивна схема, яка зменшує рівень вхідної напруги до безпечного значення для вимірювальної частини приладу. цей дільник автоматично перемикається залежно від вибраного діапазону вимірювання.

— буферний підсилювач (неінвертувальний операційний підсилювач) — електронний компонент, який запобігає впливу дільника або зовнішнього джерела на чутливу вимірювальну схему. він стабілізує сигнал та передає його з мінімальними спотвореннями.

— аналогово-цифровий перетворювач (АЦП) — ключовий елемент цифрового мультиметра. він перетворює аналоговий сигнал напруги у цифровий код, який потім обробляється мікроконтролером.

— мікроконтролер та дисплей — після перетворення сигналу, мікроконтролер обчислює точне значення напруги з урахуванням калібрувальних коефіцієнтів і виводить його на екран у зручній формі (вольти, мілівольти тощо).

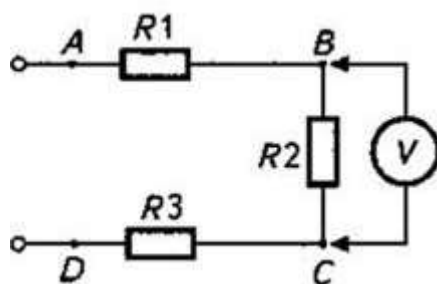


Рисунок 1.4 - Принцип роботи мультиметра при вимірюванні напруги

Таким чином, вимірювальне коло мультиметра — це комбінація високого опору, захисних елементів, дільників напруги, буферних підсилювачів, АЦП та цифрового оброблення. Його головне завдання — забезпечити точне, безпечне та стабільне вимірювання напруги в широкому діапазоні умов.

Принцип вимірювання струму суттєво відрізняється від принципу вимірювання напруги, оскільки тут прилад має стати частиною електричного кола. Тобто струм повинен протікати через елементи вимірювального кола мультиметра – рисунок 1.5. Для цього користувач вмикає прилад послідовно з елементом кола, в якому потрібно визначити силу струму.

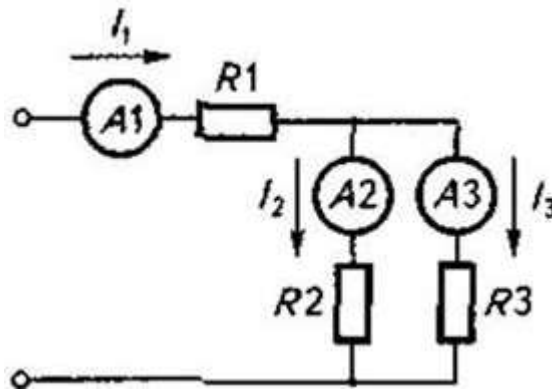


Рисунок 1.5 - Приклад схеми вимірювання струму

Коли користувач перемикає мультиметр у режим вимірювання струму (наприклад, мА або А), в його внутрішньому колі активується схема, яка включає дуже малий шунтовий резистор. Струм із зовнішнього кола проходить через цей резистор, і за законом Ома ($U = I \cdot R$) на ньому з'являється невелика напруга, пропорційна струму.

Основні елементи вимірювального кола мультиметра в режимі вимірювання струму:

- шунт (точний резистор низького опору) — основний елемент, через який протікає вимірюваний струм. на ньому формується падіння напруги, яке і є вимірюваним сигналом. значення опору ретельно підібране: достатньо мале, щоб не спотворювати роботу зовнішнього кола, і достатньо велике, щоб створити вимірювану напругу.

- аналогова схема вимірювання напруги — напруга з шунта передається на підсилювальний каскад, зазвичай це диференціальний операційний підсилювач, який дозволяє точно зчитувати дуже малі напруги.

— аналогово-цифровий перетворювач (ацп) — після підсилення сигнал надходить на ацп, який перетворює його у цифрове значення.

— мікроконтролер — отримує цифровий сигнал від АЦП, обчислює силу струму з урахуванням опору шунта та калібрувальних коефіцієнтів.

— захисні елементи — у колі вимірювання струму також є запобіжники, які захищають мультиметр від перевантаження. якщо через шунт протікає надмірний струм, запобіжник перегорає, щоб запобігти пошкодженню приладу.

Отже, у режимі вимірювання струму мультиметр функціонує як точний амперметр, у якому сила струму розраховується шляхом непрямого вимірювання напруги на шунті. Основні елементи вимірювального кола — шунт, підсилювач, АЦП працюють разом, забезпечуючи надійне, безпечне та точне вимірювання сили струму.

У режимі вимірювання опору мультиметр працює за активним методом, тобто самостійно подає на невідому ділянку схеми малу тестову напругу або струм, а потім вимірює відповідну відповідь (струм або напругу), щоб за законом Ома ($R = U / I$) обчислити опір – рисунок 1.6.

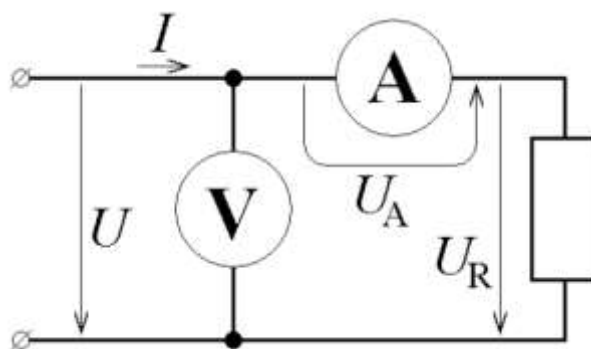


Рисунок 1.6 - Приклад схеми вимірювання опору

Принцип дії мультиметра при вимірюванні опору:

Коли користувач перемикає мультиметр у режим вимірювання опору, прилад вимикається з зовнішнього джерела і починає працювати автономно. Через досліджуваний резистивний елемент мультиметр пропускає контрольний

струм, який генерується внутрішнім джерелом живлення (батареею або стабілізованим джерелом струму). Після цього прилад вимірює напругу, що виникає на резисторі, або струм, що протікає крізь нього, залежно від конструкції. Далі за формулою опору він обчислює результат і виводить його на екран.

Основні елементи вимірювального кола мультиметра в режимі вимірювання опору:

- внутрішнє джерело напруги або струму — формує стабільний сигнал (зазвичай малий струм у межах мікроамперів або міліамперів), який подається на досліджуваний елемент. це дає змогу уникати значного нагріву опору чи пошкодження.

- комутатор діапазонів (вимірювальна матриця резисторів) — перемикає рівень тестового сигналу залежно від очікуваного діапазону опору. наприклад, для великих опорів використовується більша напруга, а для малих — менша.

- вимірювальний резистор (еталон) — у деяких схемах використовується відомий резистор, із яким порівнюється вимірюваний. це дозволяє точніше обчислити реальне значення опору.

- аналогово-цифровий перетворювач (АЦП) — вимірює напругу на досліджуваному елементі після подачі тестового струму. перетворює сигнал у цифровий код для обробки.

- мікроконтролер — виконує обчислення опору на основі відомих значень струму (або напруги) та вимірюної напруги (або струму). у ньому закладені калібрувальні коефіцієнти та компенсація похибок.

- захисні елементи — на вході можуть бути розрядники або діоди, які захищають схему у випадку помилкового підключення мультиметра до джерела напруги під час вимірювання опору.

Додатково слід враховувати, що у режимі вимірювання опору обов'язкова відсутність живлення у вимірюваному колі, інакше може виникнути хибне

					ДП.МТІР.9702577.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						20
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

вимірювання або пошкодження мультиметра. Крім того, для перевірки обривів кіл або діодів мультиметр часто має окрему функцію перевірки цілісності (звуковий сигнал), яка працює на тому ж принципі.

Таким чином, у режимі вимірювання опору мультиметр працює як активне джерело сигналу і вимірювальний пристрій одночасно. Завдяки поєднанню джерела тестового струму, АЦП, еталонних елементів і мікроконтролера, пристрій здатен точно визначити опір резисторів, провідників, контактів або електронних компонентів у різних діапазонах.

1.3. Принципи вимірювання додаткових величин (ємність, індуктивність)

У режимі вимірювання ємності, мультиметр визначає величину електричної ємності конденсатора, тобто його здатність накопичувати електричний заряд при заданій напрузі. Цей процес базується на вимірюванні часових характеристик заряджання або розряджання конденсатора, а саме — наскільки швидко змінюється напруга на його обкладках під дією струму від внутрішнього джерела мультиметра.

Принцип дії мультиметра при вимірюванні ємності:

Коли користувач перемикає мультиметр у режим вимірювання ємності, прилад подає на конденсатор тестовий струм або напругу від внутрішнього джерела живлення. У відповідь напруга на конденсаторі поступово зростає (якщо заряджання) або зменшується (якщо розряджання). Мультиметр вимірює час, за який напруга досягає певного контрольного рівня, і, враховуючи цей час, струм і напругу, обчислює ємність за відомою формулою:

$$C = \frac{I \cdot t}{U}$$

або, в разі фіксованої напруги та відомого опору:

					ДП.МТІР.9702577.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		21

$$C = \frac{t}{R}$$

Основні елементи вимірювального кола мультиметра в режимі вимірювання ємності:

1. Внутрішнє джерело струму або напруги — подає контрольований сигнал для заряджання або розряджання конденсатора. Його параметри ретельно регулюються, щоб забезпечити стабільність вимірювання.

2. Таймер або лічильник часу — вимірює, скільки часу потрібно для досягнення певного рівня напруги на конденсаторі. Це ключовий параметр для розрахунку ємності.

3. Комутатор режимів (ключі) — керує підключенням конденсатора до джерела живлення та до вимірювального кола, забезпечуючи контрольований процес заряджання й розряджання.

4. Аналоговий компаратор або АЦП — слідкує за рівнем напруги на обкладках конденсатора. Коли напруга досягає заданого значення, компаратор фіксує момент зупинки таймера.

5. Мікроконтролер — керує всім процесом: формує сигнал, запускає таймер, зчитує результати з компаратора чи АЦП і обчислює ємність за вбудованим алгоритмом.

6. Захисні елементи — запобігають пошкодженню приладу в разі підключення розряджених, поляризованих або заряджених конденсаторів. Зазвичай включають обмежувальні діоди та резистори.

Додатково:

– Перед вимірюванням конденсатор потрібно повністю розрядити, інакше залишкова енергія може дати неправильний результат або навіть пошкодити мультиметр.

– Деякі мультиметри не вимірюють поляризовані електролітичні конденсатори, або вимірюють лише в межах до десятків мікрофарад.

					ДП.МТІР.9702577.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		22

– У професійних мультиметрах для точного вимірювання можуть використовуватись високоточні RC-генератори або мостові схеми, але в побутових — найчастіше часова оцінка заряджання.

Отже, у режимі вимірювання ємності мультиметр працює як таймерно-аналітичний прилад, що визначає ємність на основі часу заряджання конденсатора. Завдяки комбінації джерела живлення, таймера, компаратора й мікроконтролера він забезпечує зручне і достатньо точне визначення параметрів конденсаторів у типовому електронному обладнанні.

У режимі вимірювання індуктивності, мультиметр визначає здатність котушки індуктивності протидіяти зміні струму через неї. Це фізична властивість, яка проявляється у створенні електрорушійної сили самоіндукції при зміні струму в колі. Мультиметр вимірює індуктивність, аналізуючи динаміку струму або напруги у відповідь на зміну вхідного сигналу — зазвичай короткий імпульс струму або змінний сигнал.

Принцип дії мультиметра при вимірюванні індуктивності:

Коли користувач перемикає мультиметр у режим вимірювання індуктивності, прилад подає на котушку контрольований сигнал — імпульсний або синусоїдальний струм. У відповідь індуктивний елемент створює змінну напругу, яка залежить від швидкості зміни струму та величини індуктивності. Мультиметр вимірює часові характеристики цього процесу або фазове зрушення між струмом і напругою, після чого обчислює індуктивність за відповідними формулами.

Основні елементи вимірювального кола мультиметра в режимі вимірювання індуктивності:

1. Генератор тестових імпульсів або змінного струму – створює електричний сигнал, який подається на котушку. Це може бути прямокутний імпульс або синусоїда визначеної частоти. Характеристики сигналу підібрані так, щоб створити зміну струму, достатню для надійного вимірювання.

2. Комутатор або перемикач режимів – забезпечує правильне підключення котушки до схеми генерації сигналу та до вимірювального кола.

					ДП.МТІР.9702577.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		23

3. Вимірювальна схема струму і напруги – фіксує, як змінюється струм через котушку та напруга на її виводах під час проходження тестового сигналу. Це може бути диференціальний підсилювач або інша аналогова схема.

4. Аналогово-цифровий перетворювач (АЦП) – перетворює змінну напругу та/або струм у цифрову форму для подальшої обробки.

5. Мікроконтролер – аналізує сигнали (наприклад, час зростання струму, фазове зрушення або частоту резонансу в RC/LR-колі) і обчислює індуктивність на основі відомих формул:

- для імпульсного методу:

$$L = \frac{U \cdot t}{I}$$

- або з фазовим зсувом у змінному струмі.

6. Захисні елементи – запобігають пошкодженню мультиметра при підключенні котушки з залишковим магнітним потоком чи при короткому замиканні.

Додатково:

– У деяких мультиметрах замість прямого вимірювання індуктивності використовується метод вимірювання параметрів резонансного кола (LC), де індуктивність обчислюється за частотою резонансу.

– Дешевші мультиметри зазвичай вимірюють індуктивність у межах від кількох мікрогенрі до кількох мілігенрі, оскільки великі індуктивності складно точно протестувати короткими імпульсами.

– Для точних вимірювань важливо, щоб котушка була від'єднана від зовнішнього кола та не мала феромагнітного насичення.

Отже, у режимі вимірювання індуктивності мультиметр функціонує як електричний аналізатор часу відгуку або змінного сигналу, який оцінює реакцію котушки на зміни струму. Завдяки генератору тестових сигналів, вимірювальним схемам та мікроконтролеру, пристрій забезпечує автоматичне визначення індуктивності з виведенням результату на дисплей.

					ДП.МТІР.9702577.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		24

1.4. Аналіз джерел похибок вимірювань та напрямки їх зменшення

Мультиметри є універсальними електровимірювальними приладами, що широко застосовуються як у побуті, так і в професійній електроніці. Попри високу точність сучасних приладів, результати вимірювань можуть бути спотворені через наявність систематичних та випадкових похибок. У статті наведено класифікацію основних джерел похибок для кожного режиму вимірювання, а також запропоновано методи їх зменшення.

2. Загальні джерела похибок мультиметрів

Незалежно від режиму вимірювання, на точність мультиметра впливають апаратні та експлуатаційні фактори (табл. 1.1).

Таблиця 1.1 — Загальні джерела похибок мультиметра та шляхи їх зменшення

Джерело похибки	Причина	Шлях зменшення
Похибки АЦП	Квантування, нелінійність	Високоточні АЦП, фільтрація, калібрування
Термодрейф елементів	Зміна параметрів при нагріванні	Термокомпенсація, стабілізація температури
Паразитні ємності та індуктивності	Монтаж, довгі з'єднання	Оптимізація плати, екранування
Контактний опір щупів	Окислення, забруднення	Очищення щупів, компенсація в схемі

3. Джерела похибок за режимами вимірювання – таблиця 1.2.

3.1. Вимірювання напруги

Основними джерелами похибок є вхідний опір, наведення та зсув нуля. Зменшення досягається фільтрацією, підсиленням сигналу, автонуль-корекцією.

3.2. Вимірювання струму

Типовими похибками є падіння напруги на шунті, самонагрівання, паразитна індуктивність. Зменшення можливе завдяки якісним шунтам, температурній компенсації та короткому розташуванню ланцюга вимірювання.

Таблиця 1.2 — Джерела похибок при вимірюванні напруги та струму

Режим	Джерело похибки	Шлях зменшення
Напруга	Зсув нуля АЦП	Автоніль, корекція в мікроконтролері
	Паразитні наведення	Екранування, аналогова фільтрація
Струм	Зміна опору шунта при нагріві	ТКС-компенсовані шунти, розрахунок за температурою
	Індуктивність шунта	Мінімізація розмірів, спеціальна топологія

3.3. Вимірювання опору – таблиця 1.3.

Важливими є перехідні опори, залишкова напруга та вплив сторонніх кіл. Зменшити похибку можна використанням 4-провідної схеми або внутрішньою компенсацією.

3.4. Вимірювання ємності

Типові похибки пов'язані з залишковим зарядом, паразитними впливами, витоком струму. Рекомендується автоматична розрядка та калібрування за еталонами.

3.5. Вимірювання індуктивності

Похибки виникають через вплив паразитних ємностей, зовнішніх полів та нерозмагнічений стан сердечника. Допомагають екранування та вимірювання в резонансних схемах.

Таблиця 1.3 — Джерела похибок при вимірюванні пасивних елементів

Величина	Джерело похибки	Шлях зменшення
Опір	Контактний опір	Вимірювання щупів, компенсація
	Напруга в колі	Вимірювання у знеструмленому стані
Ємність	Залишковий заряд	Розрядка перед вимірюванням
	Паразитна індуктивність	Оптимізація монтажу
Індуктивність	Паразитна ємність	Калібрування, екранування
	Магнітна гістерезис	Розмагнічення, стабільні сердечники

Комплексне врахування джерел похибок дозволяє значно підвищити точність вимірювань мультиметра. Найбільш ефективними підходами є апаратна компенсація, автоматичне калібрування та використання прецизійних компонентів. Подальше вдосконалення мультиметрів повинно орієнтуватися на інтелектуальні алгоритми обробки сигналів та самодіагностику апаратних похибок.

1.5. Огляд сучасних компонентів та технологій, що використовуються в портативних мультиметрах та постановка задачі

У сучасній електроніці все більшої популярності набуває поєднання традиційних вимірювальних приладів, таких як мультиметри, із мікроконтролерними системами. Такий підхід дозволяє значно розширити функціональність вимірювань, автоматизувати збирання даних і забезпечити їх обробку в реальному часі. Завдяки інтеграції мультиметра з мікроконтролером, вимірювальний процес стає частиною більш складної електронної системи, яка може автономно реагувати на зміну електричних параметрів.

Однією з ключових причин такого об'єднання є прагнення до автоматизації процесів вимірювань. У багатьох випадках мультиметр використовується не для одноразового ручного зчитування параметрів, а як постійне джерело даних, які передаються до мікроконтролера для подальшої обробки. Це особливо важливо в системах дистанційного моніторингу, пристроях інтернету речей (IoT) і в умовах лабораторних або польових вимірювань, де людське втручання обмежене.

Існує кілька варіантів технічної реалізації інтеграції мультиметра з мікроконтролером. Найпростішим з них є використання мультиметрів, що мають цифрові інтерфейси передачі даних, такі як USB, RS-232 або Bluetooth. Наприклад, моделі UT61E+ (виробник UNI-T) або BM869s (Brymen) підтримують передачу результатів вимірювань на зовнішні пристрої, що

					ДП.МТІР.9702577.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		27

дозволяє мікроконтролеру зчитувати ці дані через послідовний порт або адаптер. У такому варіанті мікроконтролер не займається обробкою аналогових сигналів, а лише приймає вже оброблену інформацію.

Більш гнучкий та економічно ефективний підхід полягає у відтворенні функцій мультиметра безпосередньо засобами мікроконтролера. У цьому випадку вимірювання напруги, струму, опору або частоти здійснюються через вбудовані або зовнішні компоненти. Наприклад, для вимірювання напруги використовується внутрішній аналогово-цифровий перетворювач (АЦП) мікроконтролера, для вимірювання струму – спеціалізовані мікросхеми, такі як INA219 або ACS712, а для вимірювання температури – термістори або цифрові датчики типу DS18B20.

Подібні рішення дозволяють створювати власні цифрові мультиметри на основі Arduino, ESP32 чи STM32, доповнюючи їх OLED-дисплеями, модулями бездротового зв'язку або реєстраторами даних. Такі системи можуть працювати автономно, від батареї, передавати дані до хмари або локального сервера, а також взаємодіяти з іншими пристроями в мережі.

Варто навести приклади застосування. Однією з популярних конфігурацій є використання ESP32 разом із датчиком струму INA219 для вимірювання енергоспоживання сонячної панелі. Іншим прикладом є створення компактного цифрового мультиметра з відображенням даних на OLED-дисплеї, реалізованого на базі Arduino Nano. Також поширеною практикою є підключення серійного порту мультиметра до STM32 з метою автоматичного логування напруги або струму в процесі роботи промислового обладнання.

Разом із перевагами, існують і певні технічні виклики, які слід враховувати під час інтеграції. Наприклад, для забезпечення електробезпеки часто потрібна гальванічна розв'язка між мультиметром і мікроконтролером. Також потрібно враховувати специфіку форматів передавання даних, які можуть бути нестандартними. У разі використання вбудованих АЦП варто зважати на їхню точність і стійкість до шумів, що особливо важливо при низьковольтних вимірюваннях.

					ДП.МТІР.9702577.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		28

У перспективі поєднання мультиметрів з мікроконтролерами відкриває шлях до створення інтелектуальних вимірювальних пристроїв нового покоління. Завдяки такій інтеграції стає можливим не лише фіксувати фізичні параметри, а й автоматично на них реагувати – наприклад, регулювати живлення або змінювати режим роботи системи. Це особливо актуально для розробки автономних вимірювальних стендів, пристроїв діагностики електроніки, а також мобільних сервісних рішень.

Таким чином, поєднання мультиметрів із мікроконтролерами не лише збагачує функціональність вимірювань, але й сприяє розвитку інтелектуальних систем управління та моніторингу.

Особливості мультиметрів, розроблених провідними виробниками (Таблиця 1.4):

Fluke Corporation — світовий лідер у виробництві високоточних мультиметрів для професіоналів. Їхні портативні прилади мають ударостійкий корпус, широкий функціонал (вимірювання напруги, струму, опору, частоти, температури), а також високу точність. Fluke підтримує широкий спектр інтерфейсів передачі даних — Bluetooth, USB, RS-232, Ethernet (у деяких моделях). Це дає змогу підключати прилади до ПК чи мобільних пристроїв, збирати, зберігати і аналізувати результати вимірювань у реальному часі, інтегрувати в автоматизовані системи.

Kuman — бренд бюджетних DIY-наборів мультиметрів на базі Arduino. У комплекті зазвичай немає вбудованих інтерфейсів передачі даних мультиметра, проте користувачі можуть додавати Bluetooth, Wi-Fi або USB-модулі для реалізації безпроводної або проводової комунікації. USB-з'єднання в основному використовується для програмування контролера.

JYETech пропонує доступні DIY-набори з базовим функціоналом, без вбудованих інтерфейсів передачі даних. Передача інформації зазвичай не передбачена, але можна додавати зовнішні модулі зв'язку (Bluetooth, UART).

Gikfun (DFRobot) — пропонує більш просунуті DIY-набори, у деяких моделях є вбудований Bluetooth або можливість підключення Wi-Fi-модулів для

					ДП.МТІР.9702577.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						29
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

бездротової передачі даних. USB-підключення можливе через контролер Arduino. Проводові інтерфейси типу RS-232 зазвичай відсутні.

Elenco Electronics — виробник освітніх наборів, орієнтованих на навчання. Їхні мультиметри зазвичай не мають комунікаційних інтерфейсів (ані безпроводних, ані проводових), що спрощує пристрої і знижує вартість.

Таблиця 1.4 -Порівняння функцій і комунікаційних можливостей

Функція / Набір	Kuman DIY Multimeter	JYETech DIY Kit	Gikfun DIY Kit	Elenco Educational Kit	Fluke Professional Meter
Дисплей	LCD без підсвітки	LCD з підсвіткою	LCD або OLED	LCD базовий	Яскравий LCD/OLED з підсвіткою
Вимірювання напруги	Так	Так	Так	Так	Дуже точне
Вимірювання струму	Обмежене (низькі струми)	Обмежене	Розширене (вищі струми)	Обмежене	Широкий діапазон
Вимірювання опору	Так	Так	Так	Так	Дуже точне
Вимірювання частоти	Обмежене або відсутнє	Частково	Так	Відсутнє	Повна підтримка
Додаткові функції	Програмування (Arduino)	Кнопки керування	Bluetooth, модульність	Навчальні матеріали	Автоматичний вибір діапазону, захист, збереження даних
Бездротові інтерфейси	Відсутні,	Відсутні	Вбудований або додатковий Bluetooth, Wi-Fi	Відсутні	Bluetooth
Проводові інтерфейси	USB (для програмування)	Відсутні	USB, UART	Відсутні	USB, RS-232, Ethernet (деякі моделі)
Живлення	Батарейки (9 В)	Батарейки	Акумулятор/батарея	Батарейки	Акумулятор з зарядкою
Призначення	Початківці,	Студенти	DIY ентузіасти	Навчання	Професіонали
Ціна	Доступна (10-30 \$)	Доступна (~15-40 \$)	Середня (30-60 \$)	Доступна (~20-40 \$)	Висока (200-1000 \$)

Таким чином, фірма Fluke випускає професійні мультиметри з широким набором комунікаційних інтерфейсів: Bluetooth, USB, RS-232, Ethernet, що дозволяє використовувати їх у складних системах автоматизованого збору

даних. Фірма Gikfun — найкращий вибір для DIY з можливістю бездротової передачі даних через вбудований або додатковий Bluetooth/Wi-Fi. Фірми Kuman і JYETech — бюджетні набори, де USB застосовується головню для програмування, а передачу даних можна реалізувати через додаткові модулі, а Elenco випускає навчальні набори без інтерфейсів передачі даних, орієнтовані на базове навчання.

Не дивлячись на пропозиції провідних фірм, структуру портативного та її реалізацію пропонується виконати для двох режимів роботи – ручного та автоматичного. Недоліки ручного режиму в автоматичному режимі полягають в тому, вимірюється одна фізична величина, а вимірювання інших недоступне (потрібне механічне переключення). Тому, в наступних розділах передбачається розробка портативного мультиметра, що працює в режимі як ручного управління, так і автоматичного. При цьому в автоматичному режимі є можливість контролю електричних параметрів в різних критичних точках електричної схеми. Крім цього, даний підхід суттєво збільшує універсальність застосування даного приладу.

					ДП.МТІР.9702577.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		31

2. ПРОЕКТУВАННЯ ПОРТАТИВНОГО МУЛЬТИМЕТРА

2.1. Вибір архітектури та обґрунтування вибору основних компонентів мультиметра

Структурні схеми вимірювальних приладів мають важливе значення для розуміння принципу їх роботи та внутрішньої організації. Вони відображають основні компоненти приладу, такі як вхідний сигнал, основні вузли та компоненти приладу, інтерфейси та індикаційні пристрої, а також показують, як ці елементи взаємодіють між собою для здійснення вимірювання фізичних величин. Завдяки таким схемам можна з'ясувати, як працює прилад і як він обробляє інформацію [4-6].

Основне призначення структурних схем полягає в тому, щоб полегшити процес проектування, обслуговування та діагностики вимірювальних приладів. Вони надають наочне уявлення про внутрішню організацію системи, що дозволяє зрозуміти принцип роботи приладу, а також сприяє швидкому виявленню і усуненню несправностей. Структурні схеми також використовуються для аналізу вимірювальної системи, що допомагає виявити, який елемент може бути відповідальний за помилку в вимірюваннях або несправність.

Крім того, вони є корисним інструментом при розробці нових приладів або вдосконаленні існуючих. Структурні схеми дозволяють оптимізувати розташування компонентів і покращити взаємодію між ними. У загальному випадку, такі схеми є необхідним елементом для технічного обслуговування, налагодження, калібрування та ремонту вимірювальних приладів.

При розробці структурної схеми слід врахувати можливості механічного та автоматичного переключення режимів роботи мультиметра та підключення відповідних комунікаційних інтерфейсів відповідно до задач поставлених в розділі 1.5. Виходячи з цих завдань в структурній схемі (рисунок 2.1) передбачено можливість як ручного управління вимірюваннями – блок (Схема ручного управління вимірювальними каналами та діапазонами), так і

					ДП.МТІР.9702577.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						32
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

автоматичного – блок (Схема автоматичного управління вимірювальними каналами). Після цього вихідний сигнал або з першої, або з другої схеми подається на аналоговий вхід аналого-цифрового перетворювача, який входить в склад мікроконтролера. Оброблений сигнал відображається в дисплеї. При цьому є можливість його передачі при використанні мультиметра в складі автоматизованих систем.

Додатково в схему введено блок - Схема автоматичного вибору діапазону вимірювань. Це обумовлено необхідністю в автоматичному режимі правильно обирати діапазон, щоб не погіршити точність вимірювання та не втратити результати вимірювань. Як видно зі структурної схеми, центральним вузлом мультиметра є мікроконтролер, який забезпечує процес аналого-цифрового перетворення, управління вимірювальними каналами, відображення результатів вимірювання у дисплеї та надає можливості для передачі вимірювальної інформації по дротовому чи бездротовим інтерфейсам.



Рисунок 2.1 – Структурна схема портативного мультиметра

Для створення портативного мультиметра ключовим завданням є вибір мікроконтролера, який здатен забезпечити високу точність вимірювань, зручність обміну даними з іншими пристроями, а також простоту взаємодії з користувачем. У цьому контексті особливу увагу необхідно приділити таким характеристикам, як розрядність і точність аналогово-цифрового перетворювача (АЦП), адже саме від них залежить здатність мультиметра точно вимірювати фізичні величини – зокрема напругу, струм і опір. Важливо також, щоб мікроконтролер мав технічну можливість підключення дисплеїв (найчастіше через SPI або I2C), адже в портативному пристрої без екрану користувач не зможе швидко й зручно ознайомлюватися з результатами вимірювань.

Ще одним важливим критерієм є наявність інтерфейсів зв'язку. У сучасних умовах мікроконтролери для мультиметрів повинні підтримувати як дротові (UART, SPI, I2C, USB), так і бездротові засоби передачі даних (Wi-Fi або Bluetooth), оскільки дедалі більше вимірювальних пристроїв інтегруються в системи дистанційного моніторингу та Інтернету речей. Не менш важливою є енергоефективність, адже портативний мультиметр, що працює від акумулятора, має споживати мінімум енергії для забезпечення тривалого часу автономної роботи. Результати порівняльного аналізу поширених моделей мікроконтролерів приведені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Характеристики популярних мікроконтролерів

МК / Параметри	Розрядність АЦП	К-сть каналів АЦП	Підтримка дисплея	Інтерфейси зв'язку	Бездротові зв'язок	Примітки
STM32F303	12 або 16 біт	до 24	SPI, I2C	UART, SPI, I2C, USB	Hi	Висока точність
ESP32 (Espressif)	12 біт	до 18	SPI, I2C, паралельний	UART, SPI, I2C, USB	Wi-Fi, Bluetooth	Багато функцій,
ATSAMD21G18	12 біт	до 20	SPI, I2C	UART, USB	Hi	точний АЦП
NRF52840 (Nordic)	12 біт	8	SPI, I2C	UART, USB	Bluetooth 5, Thread	Енергоощадний,

МК / Параметри	Розрядність АЦП	К-сть каналів АЦП	Підтримка дисплея	Інтерфейс и зв'язку	Бездротовий зв'язок	Примітки
RP2040	12 біт	3	SPI, I2C	UART, USB	Ні	простий АЦП

Розглядаючи конкретні моделі мікроконтролерів, варто відзначити STM32F303 від STMicroelectronics. Цей чип вирізняється високою точністю завдяки 16-бітному АЦП, що робить його особливо придатним для приладів, де потрібна прецизійна обробка аналогових сигналів. Хоча він не має вбудованих засобів бездротового зв'язку, натомість забезпечує стабільну роботу, точність та підтримку різноманітних інтерфейсів, що дозволяє інтегрувати його в складні вимірювальні системи.

Альтернативою з більш широкими комунікаційними можливостями є ESP32 від компанії Espressif. Цей мікроконтролер має 12-бітний АЦП, який, хоч і поступається STM32F303 за точністю, зате забезпечує повноцінну підтримку Wi-Fi та Bluetooth. Це дозволяє створювати багатофункціональні мультиметри, здатні передавати дані в мобільні додатки або хмарні сервіси, що є особливо актуальним для IoT-застосувань. Завдяки підтримці підключення дисплеїв та численним периферійним інтерфейсам ESP32 добре підходить для реалізації сучасного портативного вимірювального пристрою.

Ще одним збалансованим варіантом є ATSAMD21G18 від Microchip. Цей контролер також має 12-бітний АЦП, відзначається низьким енергоспоживанням та підтримує USB-зв'язок, що робить його зручним для реалізації мультиметрів, які передають або зберігають дані безпосередньо на комп'ютері. Якщо ж основна мета полягає у створенні наденергоощадного пристрою з можливістю зв'язку через Bluetooth, доцільно розглянути NRF52840 від Nordic. Цей мікроконтролер забезпечує базову точність вимірювань, проте має вбудовану підтримку Bluetooth 5.0 та інших бездротових протоколів, що дає змогу легко інтегрувати мультиметр у бездротову екосистему [6-9].

					ДП.МТІР.9702577.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		35

І нарешті, для аматорських або навчальних цілей варто звернути увагу на RP2040 від Raspberry Pi. Він є доступним і простим у використанні, має вбудований 12-бітний АЦП, підтримує USB, SPI, I2C та UART, однак кількість каналів АЦП обмежена, а бездротового зв'язку немає. Це означає, що він менш придатний для професійних задач, зате чудово підходить для прототипування або створення простих мультиметрів з базовим функціоналом.

Загалом, вибір мікроконтролера залежить від балансу між точністю вимірювань, потребами в комунікації та енергоспоживанням. Якщо пріоритетом є максимальна точність, варто віддати перевагу STM32F303. Якщо ж важливішими є універсальність, бездротовий зв'язок і обробка даних, оптимальним вибором буде ESP32. Враховуючи, що портативні мультиметри, в основному, є бюджетним варіантом, то в ролі мікроконтролера обираємо ESP32 – рисунок 2.2.



Рисунок 2.2 – Мікроконтролер ESP32

Наступним кроком є вибір монітору. ESP32 дозволяє підключати різні типи дисплеїв, і вибір оптимального залежить від цілей застосування. Найпоширенішими є OLED, TFT, LCD та E-Paper екрани. Наприклад, OLED-дисплеї, як SSD1306 або SH1106, вирізняються компактністю, низьким енергоспоживанням та зручним підключенням через інтерфейс I²C. Вони підходять для невеликих пристроїв, де потрібно відображати просту графіку або

					ДП.МТІР.9702577.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		36

текст, ідеально працюючи з ESP32 завдяки наявності підтримки в популярних бібліотеках.

Інший варіант — TFT-дисплеї, зокрема на контролерах ILI9341 або ST7735. Вони забезпечують кольорове відображення, підтримку графіки та більший розмір екрану, що робить їх корисними для візуалізації складніших інтерфейсів. Проте потребують більше пінів для підключення і споживають більше енергії.

Також існують LCD-дисплеї, які часто використовують символічний формат відображення (наприклад, 16x2 чи 20x4). Завдяки простоті і добрій читабельності на яскравому світлі, вони залишаються актуальними у проектах, де не потрібна графіка. Застосування адаптера I²C спрощує підключення до ESP32.

Для пристроїв з автономним живленням доцільно використовувати Е-Ререр дисплеї, оскільки вони зберігають зображення навіть після вимкнення живлення. Але варто враховувати, що оновлення зображення на таких екранах досить повільне.

У більшості випадків найкращим вибором стає OLED-дисплей на I²C, зокрема SSD1306 – рисунок 2.3.



Рисунок 2.3 - 0,96-дюймовий OLED SSD1306 Дисплей I2C 128 x 64

Він забезпечує достатню функціональність, має низьке енергоспоживання, не перевантажує апаратні ресурси ESP32 та легко інтегрується в проекти завдяки

					ДП.МТІР.9702577.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		37

поширеним бібліотекам. Якщо ж необхідна кольорова графіка або більший екран, тоді доречніше обрати TFT-дисплей.

Таким чином в даному розділі розроблено структурну схему портативного мультиметра, обґрунтовано вибір мікроконтролера та монітора. В наступних розділах потрібно розробити вимірювальні канали, які використовуються в ручному та втоматичному режимах.

2.2. Розробка принципових електричних схем вимірювальних кіл в режимі ручного управління

Механічний перемикач режимів у портативному мультиметрі є ключовим елементом, що забезпечує вибір типу та діапазону вимірювання. Його основне призначення полягає у перемиканні між режимами вимірювання різних фізичних величин, таких як напруга, струм, опір, а також умикання допоміжних функцій на кшталт прозвонювання, перевірки діодів або вимірювання частоти, ємності й температури. У деяких моделях також передбачено можливість тестування транзисторів. Крім вибору функцій, перемикач дозволяє користувачеві вручну встановити відповідний піддіапазон вимірювання, якщо мультиметр не підтримує автоматичне масштабування.

Цей компонент повинен бути достатньо надійним, щоб витримати тисячі циклів перемикання без втрати працездатності. Надійність контакту є критично важливою, оскільки навіть незначне збільшення опору або поява перешкод при перемиканні може суттєво вплинути на точність вимірювань. Контакти перемикача повинні забезпечувати стабільне з'єднання з мінімальним опором і водночас бути захищеними від механічного зносу.

Кожне положення перемикача має чітко фіксуватись, що забезпечується спеціальними механічними засобами — зазвичай це клацання або відчутний опір, який не дає ручці перемикача залишатись у проміжному стані. Завдяки цьому користувач завжди впевнений, що вибраний саме той режим, який

					ДП.МТІР.9702577.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		38

потрібен. Конструкція перемикача також повинна бути стійкою до ударів, вібрацій і випадкових механічних впливів, що особливо важливо для польових або майстерень умов.

З міркувань безпеки перемикач має витримувати робочу напругу, яка може сягати 600 або навіть 1000 вольт, залежно від призначення мультиметра та категорії вимірювання. При цьому важливо дотримуватись міжнародних стандартів, зокрема ІЕС 61010-1, які визначають вимоги до електричної ізоляції та захисту користувача. Крім того, корпус перемикача і сам механізм мають бути надійно ізольовані, аби виключити пробої або витоки струму.

Форма перемикача зазвичай розрахована на зручність користування однією рукою. У деяких сучасних моделях мультиметрів механічний перемикач може бути інтегрований із системою електронного зчитування положення — наприклад, за допомогою потенціометра або цифрового енкодера, що дозволяє мікроконтролеру точно визначати вибраний режим.

Таким чином, механічний перемикач у мультиметрі — це не просто елемент керування, а складний і важливий вузол, який відповідає як за функціональність, так і за безпеку та довговічність вимірювального приладу.

Використання роторного перемикача Alpha SR2612F у конструкції портативного мультиметра є цілком виправданим як з точки зору функціональності, так і з огляду на надійність, конструктивну сумісність та економічність – рисунок 2.4.

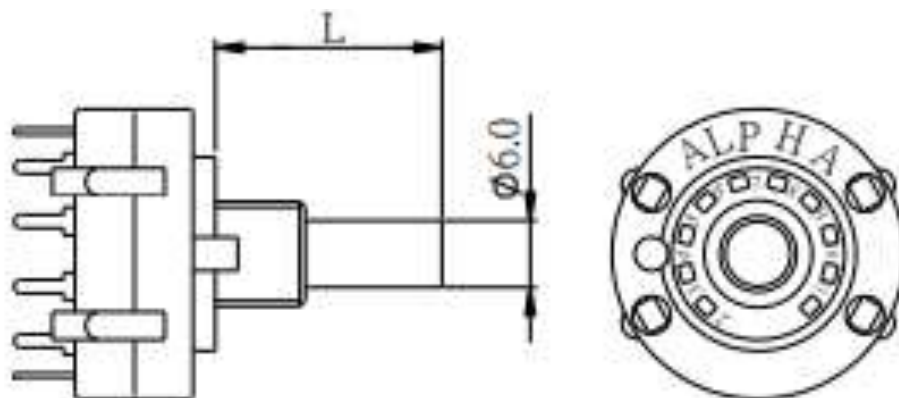


Рисунок 2.4 – Роторний механічний перемикач

					ДП.МТІР.9702577.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		39

Alpha SR2612F — це багатопозиційний механічний роторний перемикач, який розрахований на 12 фіксованих положень, хоча може конфігуруватися й на меншу кількість кроків. Його конструкція дозволяє чітко фіксувати кожне положення, що є критично важливим у мультиметрах, де помилка у виборі режиму може призвести до некоректних вимірювань або навіть до пошкодження пристрою. Механічна фіксація відбувається з характерним клацанням, що забезпечує тактильний і звуковий зворотний зв'язок для користувача. Схема підключень контактів приведена на рисунку 2.5.

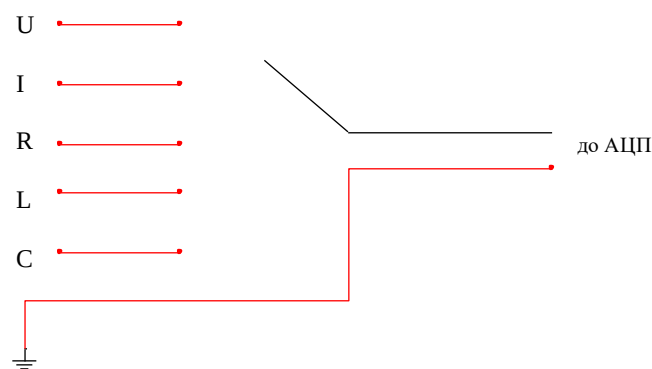


Рисунок 2.5 – Схема перемикачів Alpha SR2612F

Важливим аргументом на користь Alpha SR2612F є його компактні розміри та зручна вісь управління, що дозволяє інтегрувати перемикач у корпус стандартного розміру без зайвих ускладнень. Це особливо важливо для ручних або кишенькових мультиметрів, де простір усередині корпусу обмежений.

Електричні характеристики цього перемикача цілком відповідають вимогам до селектора в мультиметрі: номінальний струм і напруга дозволяють безпечно перемикати аналогові сигнали, а низький контактний опір (зазвичай не більше 10–20 мОм) забезпечує мінімальний вплив на точність вимірювань. Додатково до цього, перемикач має довгий механічний ресурс — понад 10 000 циклів перемикачів, що є стандартним мінімумом для приладів повсякденного використання.

					ДП.МТІР.9702577.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		40

З точки зору виготовлення й експлуатації, Alpha SR2612F є доступним і широко поширеним компонентом, що полегшує серійне виробництво або ремонт пристроїв. Наявність на ринку, сумісність з монтажем на друковану плату (ТНТ або вертикальний монтаж), а також наявність різних модифікацій із фіксованими або безфіксаторними положеннями дозволяє гнучко інтегрувати цей перемикач у дизайн мультиметра залежно від потреб.

Таким чином, Alpha SR2612F є обґрунтованим вибором для реалізації механічного перемикача режимів вимірювання в портативному мультиметрі завдяки своїй надійності, чіткості перемикання, компактності, довговічності та відповідності вимогам до точних аналогових приладів.

При вимірюванні напруги, що не перевищує 300 В, за допомогою АЦП мікроконтролера ESP32, слід скористатися резистивним дільником напруги, оскільки безпосереднє підключення такої високої напруги до входу мікроконтролера є небезпечним і неприпустимим. АЦП ESP32 працює з аналоговими сигналами в межах 0–3.3 В, тому вхідну напругу потрібно зменшити приблизно у 100 разів, щоб безпечно подавати її на мікроконтролер.

Для цього застосовується подільник напруги, який складається з двох послідовно з'єднаних резисторів. Один резистор (R1) підключається до джерела високої напруги (до 300 В), другий (R2) — до землі. Напруга між цими двома резисторами (на резисторі R2) зменшується до рівня, придатного для обробки АЦП.

Припустимо, ми хочемо, щоб на виході дільника при вхідних 300 В було не більше ніж 3 В (із запасом до 3.3 В). У такому випадку співвідношення резисторів має бути приблизно:

$$\frac{R_2}{R_1 + R_2} = \frac{3}{300} = \frac{1}{100}$$

Це означає, що опір R1 повинен бути в 99 разів більшим за R2. Наприклад, можна взяти такі значення R1 = 990 кОм, R2 = 10 кОм.

У такому випадку максимальна напруга на вході ESP32 становитиме:

$$V_{\text{вих}} = 300 \cdot \frac{10}{990 + 10} = 3.0 \text{ В}$$

					ДП.МТІР.9702577.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		41

Таке співвідношення безпечно для ESP32. Рекомендується використовувати резистори з високою напругою пробою (наприклад, 0.5–1 Вт) і перевірити їх параметри, щоб уникнути пробою при пікових перенапругах.

Оскільки АЦП ESP32 чутливий до шумів, бажано встановити RC-фільтр для згладжування сигналу. Його можна реалізувати за допомогою серійного резистора (наприклад, 1–10 кОм) між виходом дільника та входом ESP32 і конденсатора (100 нФ) між входом АЦП та землею.

Для підключення до АЦП рекомендується використовувати один з аналогових входів АЦП, наприклад, GPIO34, GPIO35, GPIO32 або GPIO33, оскільки ці входи не використовуються Wi-Fi і мають стабільні результати.

Додатково, для захисту мікроконтролера, між входом АЦП і шиною живлення (3.3 В) доцільно підключити діоди Шотткі або TVS-діоди, щоб обмежити перенапругу у випадку збоїв або пробою резисторів.

Таким чином, вимірювання напруги до 300 В мікроконтролером ESP32 здійснюється через резистивний подільник (наприклад, 990 кОм і 10 кОм), з подальшим фільтруванням та захистом перед подачею сигналу на аналоговий вхід. Такий підхід дозволяє безпечно і точно вимірювати високі напруги без перевищення меж вхідного діапазону АЦП.

Для вимірювання струму за допомогою мікроконтролера ESP32 доцільно використовувати шунт – це прецизійний резистор малого опору, через який протікає вимірюваний струм. На цьому резисторі формується падіння напруги, яке пропорційне силі струму. Цю напругу далі подають на аналоговий вхід АЦП ESP32 після попереднього підсилення.

Оскільки в цьому випадку планується вимірювати струми до 5 ампер, рекомендовано використовувати шунт з опором у межах 0.01–0.05 Ом. Наприклад, резистор на 0.02 Ом забезпечить падіння напруги 100 мВ при струмі 5 А (за законом Ома). Це напруга, яку можна легко підсилити до рівня, зручного для АЦП.

Оскільки ESP32 має АЦП з роздільною здатністю до 12 біт і максимальну напругу входу близько 3.3 В, напруга зі шунта зазвичай є замалою для точного

					ДП.МТІР.9702577.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		42

вимірювання. Тому між шунтом і входом АЦП потрібно встановити інструментальний підсилювач, який дозволить підняти сигнал, наприклад, від 0–100 мВ до 0–3 В.

Один з найзручніших варіантів – це мікросхеми операційних підсилювачів типу INA219 або INA333, які спеціально розроблені для вимірювання струму через шунт і видають напругу, пропорційну струму, або навіть готові цифрові значення через інтерфейс I2C. Якщо ж використовується дискретна схема, то можна зібрати інструментальний підсилювач на базі ОП (операційного підсилювача).

Підключення до АЦП ESP32 здійснюється наступним чином:

- вихід підсилювача (або датчика струму, якщо використовується, наприклад, ACS712) підключається до одного з аналогових входів ESP32, наприклад, GPIO34, GPIO35, GPIO32 або GPIO33 — вони підтримують тільки аналоговий вхід АЦП;
- на вхід ESP32 бажано встановити RC-фільтр, наприклад, резистор 10 кОм і конденсатор 0.1 мкФ до землі, щоб згладити шум;
- не слід подавати на АЦП напругу вище 3.3 В, щоб уникнути пошкодження мікроконтролера.

У підсумку, базова схема вимірювання струму включає:

- шунт малого опору (0.02 Ом);
- інструментальний підсилювач;
- RC-фільтр перед входом АЦП;
- підключення до аналогового входу ESP32.

Вимірювання опорів допомогою ESP32, передбачає використання схем з резистивним подільником напруги. У цій схемі до джерела живлення 3.3 В послідовно підключають два резистори: один із відомим номіналом, наприклад 47 кОм, а другий — той, значення якого потрібно визначити. Між ними утворюється точка, напруга в якій залежить від співвідношення опорів обох резисторів.

					ДП.МТІР.9702577.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		43

$$V_{\text{out}} = V_{\text{cc}} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

Цю напругу подають на аналоговий вхід ESP32, наприклад на GPIO34, що дозволяє зчитати її за допомогою вбудованого АЦП. Схема дільника напруги приведена на рисунку 2.6.

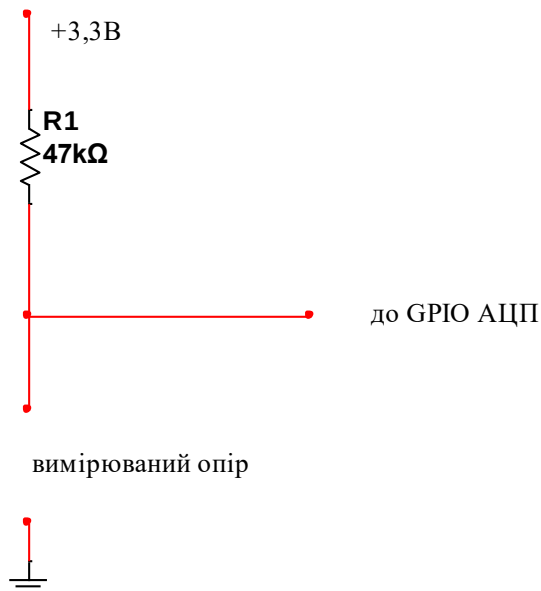


Рисунок 2.6 – схема підключення невідомого опору для визначення його номіналу

Далі, використовуючи формулу, яка враховує значення еталонного резистора та виміряну напругу, обчислюють значення невідомого опору:

$$V_{\text{out}} = V_{\text{cc}} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

Для забезпечення точності й зменшення шумів рекомендується встановити фільтруючий конденсатор між аналоговим входом і землею, а також обмежувальний резистор перед входом мікроконтролера. Такий підхід дозволяє надійно вимірювати опори в діапазоні до 100 кОм, перетворюючи їх на напругу, з якою вже може працювати ESP32. Результати вимірювань покривають широкий діапазон напруги на вході АЦП, що забезпечує достатню точність навіть при використанні 12-бітного перетворення.

					ДП.МТІР.9702577.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		44

Для вимірювання ємності за допомогою АЦП мікроконтролера ESP32 використовується непрямий метод, який полягає у спостереженні за процесом заряджання або розряджання конденсатора через відомий резистор. Суть такого підходу полягає в тому, що при подачі напруги на RC-ланцюг (резистор та конденсатор, з'єднані послідовно), напруга на конденсаторі зростає не миттєво, а поступово — за експоненціальним законом. АЦП дозволяє зчитувати напругу на конденсаторі у реальному часі, і на основі темпу її зміни можна обчислити ємність.

Процес виглядає так: через резистор подається напруга на конденсатор, один із виводів якого під'єднано до землі, а другий — до аналогового входу мікроконтролера. Початок заряджання ініціюється цифровим виходом ESP32, після чого програмно запускається серія вимірювань напруги на вході АЦП. Коли напруга на конденсаторі досягає певного порогу (наприклад, 63% від максимальної напруги, що відповідає одній постійній часу), система фіксує проміжок часу, за який це сталося. Знаючи значення опору та час заряджання до певної напруги, можна обчислити ємність за формулою $C = t / RC = t / R$.

Такий підхід добре працює для невеликих ємностей, оскільки АЦП мікроконтролера працює швидко, але з обмеженою роздільною здатністю часу. Для прикладу, з резистором 100 кОм можна точно вимірювати ємності до приблизно 1 мкФ. За вищих значень конденсатор заряджатиметься надто повільно, що ускладнить точне вимірювання через обмеження таймерів і нестабільність живлення. Щоб підвищити точність вимірювань, часто додають буфер на операційному підсилювачі між конденсатором і входом АЦП, а також стабілізують джерело напруги живлення. Отже, принцип вимірювання ємності базується на аналізі зміни напруги в RC-колі, що дає змогу з достатньою точністю визначати малі ємності за допомогою ESP32.

Вимірювання індуктивності за допомогою АЦП мікроконтролера ESP32 здійснюється непрямим способом — через аналіз реакції індуктивного елемента на зміну струму в колі. Для цього найчастіше використовують LC- або RL-

					ДП.МТІР.9702577.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		45

ланцюги, де індуктивність викликає затримку зміни струму або напруги, яку можна зафіксувати за допомогою аналогового входу мікроконтролера.

Одним із поширених методів є створення RL-ланцюга, в якому котушка підключається послідовно з відомим резистором до джерела напруги. У момент подачі напруги на це коло через цифровий вихід ESP32, струм у колі починає зростати не миттєво, а поступово, згідно з експоненційним законом. Напруга на резисторі при цьому зростає, і її можна спостерігати на вході АЦП. Саме характер цієї зміни дає змогу обчислити індуктивність.

Щоб здійснити вимірювання, мікроконтролер подає імпульс на RL-ланцюг, а через АЦП фіксує напругу на резисторі в часі. Після аналізу швидкості наростання напруги (або струму через резистор) визначають постійну часу, яка залежить від значення індуктивності.

Щоб зменшити вплив шуму й покращити точність, бажано додавати RC-фільтр на вході АЦП або буфер на операційному підсилювачі, а також застосовувати стабілізоване джерело живлення. В результаті, вимірювання індуктивності за допомогою ESP32 базується на аналізі часових характеристик напруги в RL-колі, а АЦП використовується для відстеження змін напруги, на основі яких визначаються параметри індуктивного елемента.

Таким чином, в даному розділі розглянуто питання принципів формування вхідних вимірювальних кіл за допомогою роторного механічного перемикача та причини введення в схему додаткових елементів для вимірювання основних параметрів електричних кіл.

2.3. Розробка принципових електричних схем вимірювальних кіл в режимі автоматичного управління

Основним завданням даного розділу буде розробка підходів та принципів апаратної реалізації процесу автоматизованого підключення фізичних величин до аналогового входу АЦП мікроконтролера ESP 32 та апаратної реалізації схеми

					ДП.МТІР.9702577.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		46

автоматичного вибору діапазону вимірювання. Апаратна реалізація суттєво збільшує швидкодію процесу вимірювань.

При розробці аналогового комутатора в ролі базового електронного ключа було вибрано мікросхему ADG509 – рисунок 2.6. Використання ADG509 як базового аналогового ключа обґрунтоване тим, що він використовується в багатьох системах збору аналогових даних, зокрема в проектах з мікроконтролерами типу ESP32, де необхідно комутувати декілька аналогових сигналів до обмеженої кількості входів АЦП. ADG509 є двоканальним 4:1 аналоговим мультиплексором, тобто дозволяє підключити до двох аналогових входів по чотири сигнали — загалом вісім каналів — і вибірково передавати їх на вихід за допомогою цифрового керування [8-10].

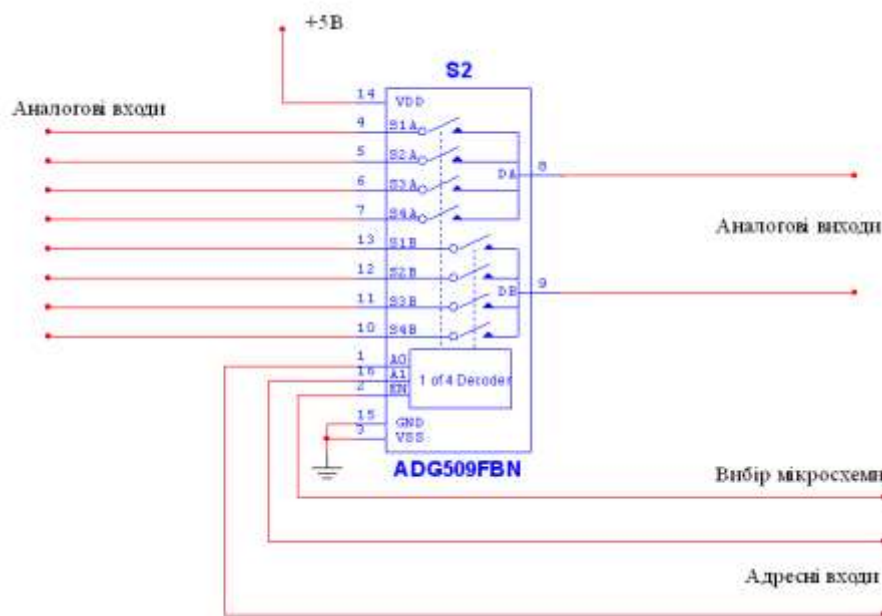


Рисунок 2.6 – Схема аналогового комутатора

Використання ADG509 як аналогового ключа при вимірюванні параметрів електричних кіл є доцільним завдяки його технічним характеристикам., які добре відповідають вимогам таких завдань. Низький опір у відкритому стані дозволяє не вносити суттєвих похибок у вимірювання, а малі струми витоку забезпечують точність при роботі з високим імпедансом. Завдяки цьому ADG509 не спотворює

вимірювані сигнали, що критично при дослідженні слабких або чутливих ділянок схеми.

Можливість програмного керування вибором активного каналу забезпечує гнучкість і масштабованість системи. Наприклад, при вимірюванні характеристик кількох резистивних, ємнісних або індуктивних елементів, один і той самий аналоговий вхід ESP32 може обслуговувати всі канали по черзі, що спрощує схему та зменшує кількість компонентів.

У підсумку, ADG509 є технічно обґрунтованим вибором для ролі аналогового ключа в задачах вимірювання параметрів електричних кіл, оскільки поєднує в собі надійність, точність, електричну ізоляцію каналів та гнучкість цифрового керування. Схема аналогового комутатора параметрів електричних кіл для схеми автоматичного управління вимірювальними каналами приведена на рисунку 2.7.

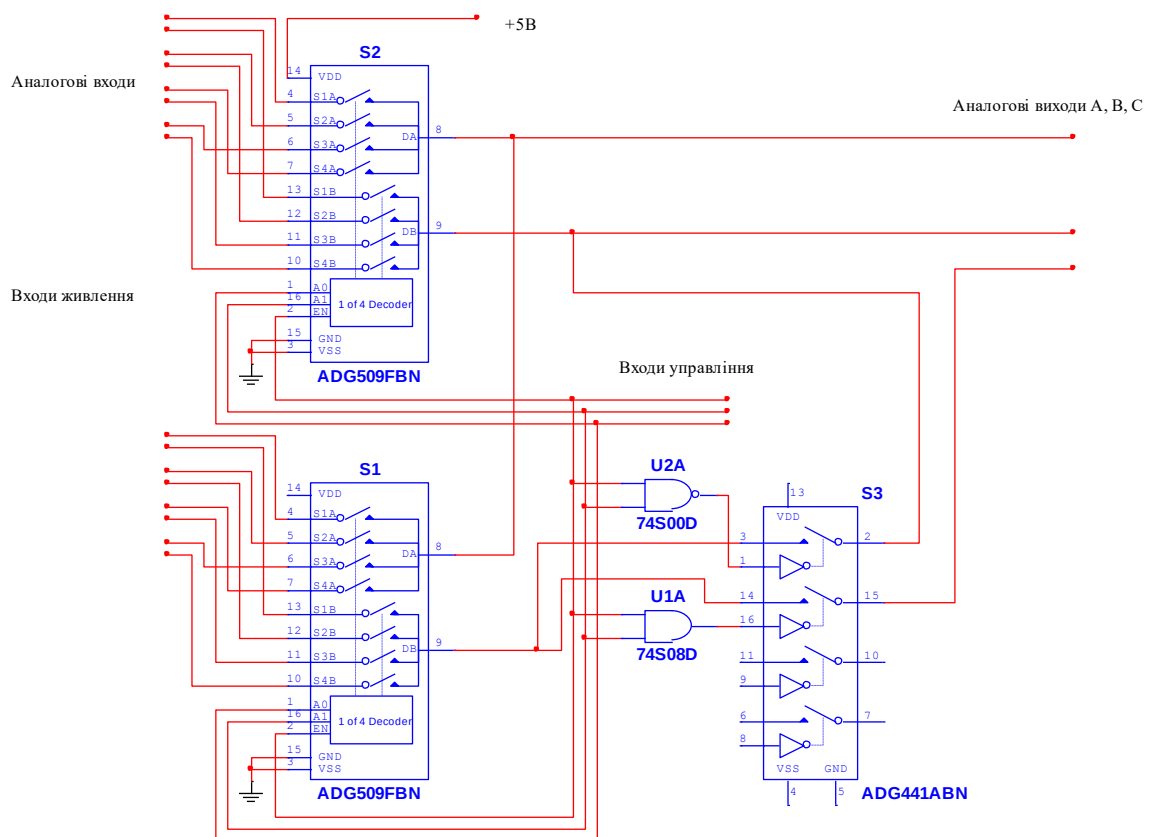


Рисунок 2.7 – Схема електронного підключення фізичних величин до вимірювальних компонентів та АЦП

Входи управління аналоговим комутатором (EN, A0, A1) забезпечують підключення мультиметра до різних ділянок електричного кола для вимірювання параметрів.

Введення в схему системи автоматичного визначення діапазону вимірювань обумовлено тим, що при вимірюванні параметрів на завжди можна передбачити їх діапазон змін. Структурна схема пристрою автоматичного визначення діапазону вимірювань приведена на рисунку 2.1. Згідно даної структури процес вимірювання пропонується виконувати в два етапи. На першому етапі схема управління встановлює для вхідного підсилювача режим, який відповідає найвищому діапазону вимірювання. Перший запуск АЦП формує вихідний код, який потрапляє на вхід блоку визначення діапазону вимірювань. У відповідності з отриманим кодом, даний блок коригує коефіцієнт підсилення вхідного підсилювача таким чином, щоб отримати результат вимірювання з найвищою для приладу точністю.

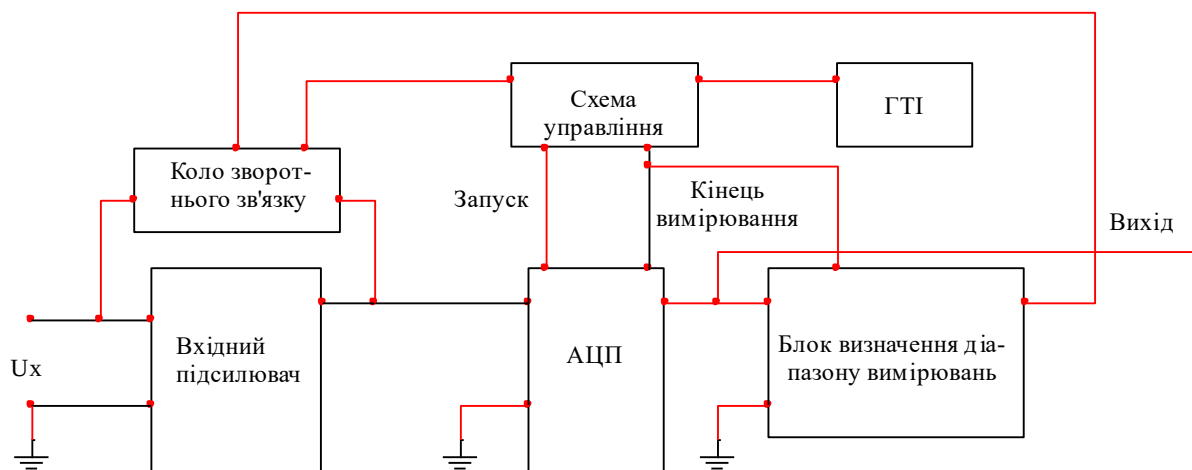


Рисунок 2.8 – Узагальнена структурна схема пристрою автоматичного визначення діапазону вимірювань напруги

Це обумовлено тим, що вимірювальні прилади (наприклад, мультиметри) мають найменшу похибку, коли результат вимірювання знаходиться всередині

або ближче до верхньої межі діапазону. Вищі діапазони можуть мати більшу похибку, оскільки прилад може бути менш чутливим у цих діапазонах. Ще однією особливістю, яка робить актуальним процес вимірювання на нижчому діапазоні є той факт, що на вищих діапазонах вимірювальні пристрої можуть бути більш вразливими до шумів, електромагнітних перешкод та інших зовнішніх факторів, що може також впливати на точність вимірювання.

Таким чином, процес вимірювання напруги проходить в два етапи. На першому етапі здійснюється визначення діапазону вимірювання, а на другому проходить власне вимірювання.

Схема визначення діапазону вимірювань напруги, побудована на основі аналізу показів АЦП (аналогово-цифрового перетворювача) та порівняння його вихідного коду з пороговими значеннями діапазонів, працює наступним чином. Спочатку, аналоговий сигнал, що підлягає вимірюванню, подається на вхід АЦП, який перетворює його в цифрове значення. Цей цифровий код відображає величину напруги на вході в межах заданого діапазону.

Далі отриманий цифровий код порівнюється з наборами порогових значень, які відповідають різним діапазонам коду АЦП. Для цього використовуються цифрові компаратори, які можуть бути налаштовані на певні пороги. Якщо код, що виходить з АЦП, потрапляє в межі одного з діапазонів, компаратор видає сигнал, що вказує на те, в який діапазон потрапляє вимірювана напруга – рисунок 2.9.

Реалізація даної структури в середовищі NI Multisim проведена на рисунку 2.10. Визначення діапазону вимірювання напруги повинно змінити коефіцієнт підсилення вхідного підсилювача. Вхідний підсилювач, побудований по схемі інвертуючого підсилювача зі змінним коефіцієнтом підсилення, реагує на зміну діапазону вимірювань через зміну величини підсилення сигналу. Це досягається шляхом паралельного включення або виключення резисторів у схемі підсилювача – рисунок 2.11.

У такій схемі для зміни коефіцієнта підсилення використовуються додаткові резистори, які можна підключати або відключати від кола. Зміна

					ДП.МТІР.9702577.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		50

коефіцієнта підсилення дозволяє пристрою адаптуватися до різних діапазонів вимірюваних напруг.

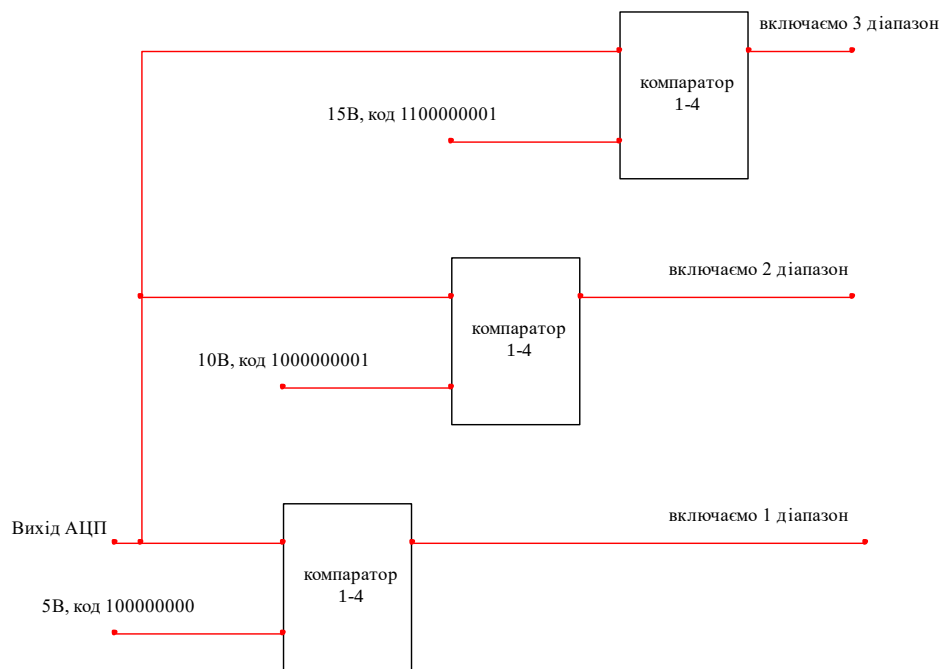


Рисунок 2.9 – Узагальнена структура блоку визначення діапазону вимірювань

При підвищенні напруги на вході або зміні діапазону вимірюваної напруги можна змінювати підсилення, щоб забезпечити оптимальну роботу системи та уникнути насичення або втрати інформації.

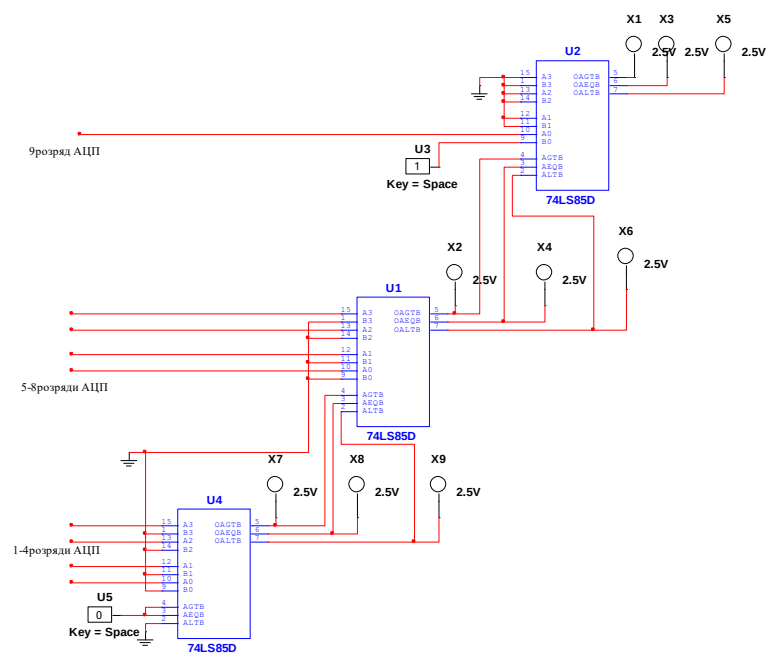


Рисунок 2.10 – Реалізація схеми автоматичного визначення діапазону вимірювань в середовищі NI Multisim

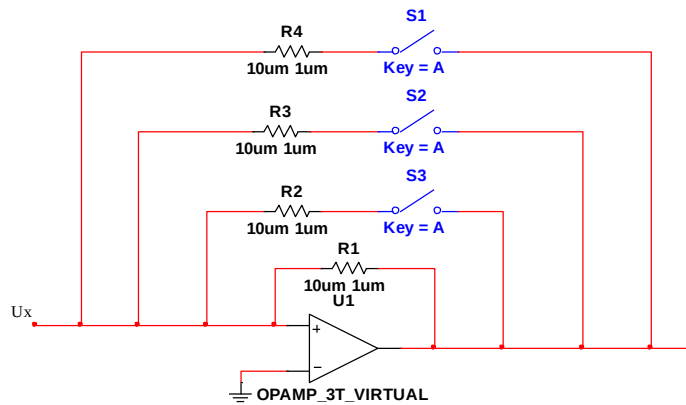


Рисунок 2.11 – Узагальнена схема зміни коефіцієнту підсилення вхідного підсилювача

Це дозволяє коригувати загальний опір, що визначає коефіцієнт підсилення інвертуючого підсилювача.

Таким чином, схема змінного підсилення, керована через перемикання резисторів, дозволяє адаптуватися до змін умов вимірювань, зберігаючи лінійність та точність сигналу на виході.

3. ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ОСОБЛИВОСТІ КАЛІБРУВАННЯ

3.1. Розробка алгоритму роботи програмного забезпечення

Розробка блок-схем алгоритмів є надзвичайно актуальною при створенні програмного забезпечення, особливо у випадках, коли важливо забезпечити логічну послідовність дій, зручність аналізу структури програми та спрощення процесу налагодження. Блок-схеми дозволяють візуально представити логіку алгоритму, що значно полегшує розуміння його роботи як для розробників, так і для користувачів. Це особливо важливо на етапах планування, моделювання та документування програмних рішень.

При розробці програмного забезпечення для мікроконтролерів використання блок-схем має свої особливості. Зокрема, алгоритми для таких пристроїв зазвичай мають обмеження в ресурсах, включаючи обсяг пам'яті, частоту роботи процесора та енергоспоживання. Тому блок-схеми, що розробляються для мікроконтролерів, повинні враховувати ці обмеження і містити лише найнеобхідніші логічні гілки та операції. Крім того, важливо враховувати особливості апаратної взаємодії, наприклад, обробку переривань, циклічне опитування сенсорів, роботу з таймерами або інтерфейсами зв'язку (I2C, UART тощо) [11-13].

Загалом, створення блок-схем дозволяє уникнути логічних помилок, прискорює реалізацію програмного коду.

На рисунку 3.1 приведена блок-схема організації процесу вимірювань електричних параметрів U , I , R , C , L портативним мультиметром в автоматичному режимі.

Приведена на рисунку блок-схема алгоритму охоплює автоматизований процес періодичного вимірювання електричних параметрів — напруги, струму, опору, ємності та індуктивності — з можливістю керування діапазоном вимірювань (реалізований апаратно), комутації каналів і передачею результатів за потреби.

					ДП.МТІР.9702577.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		53

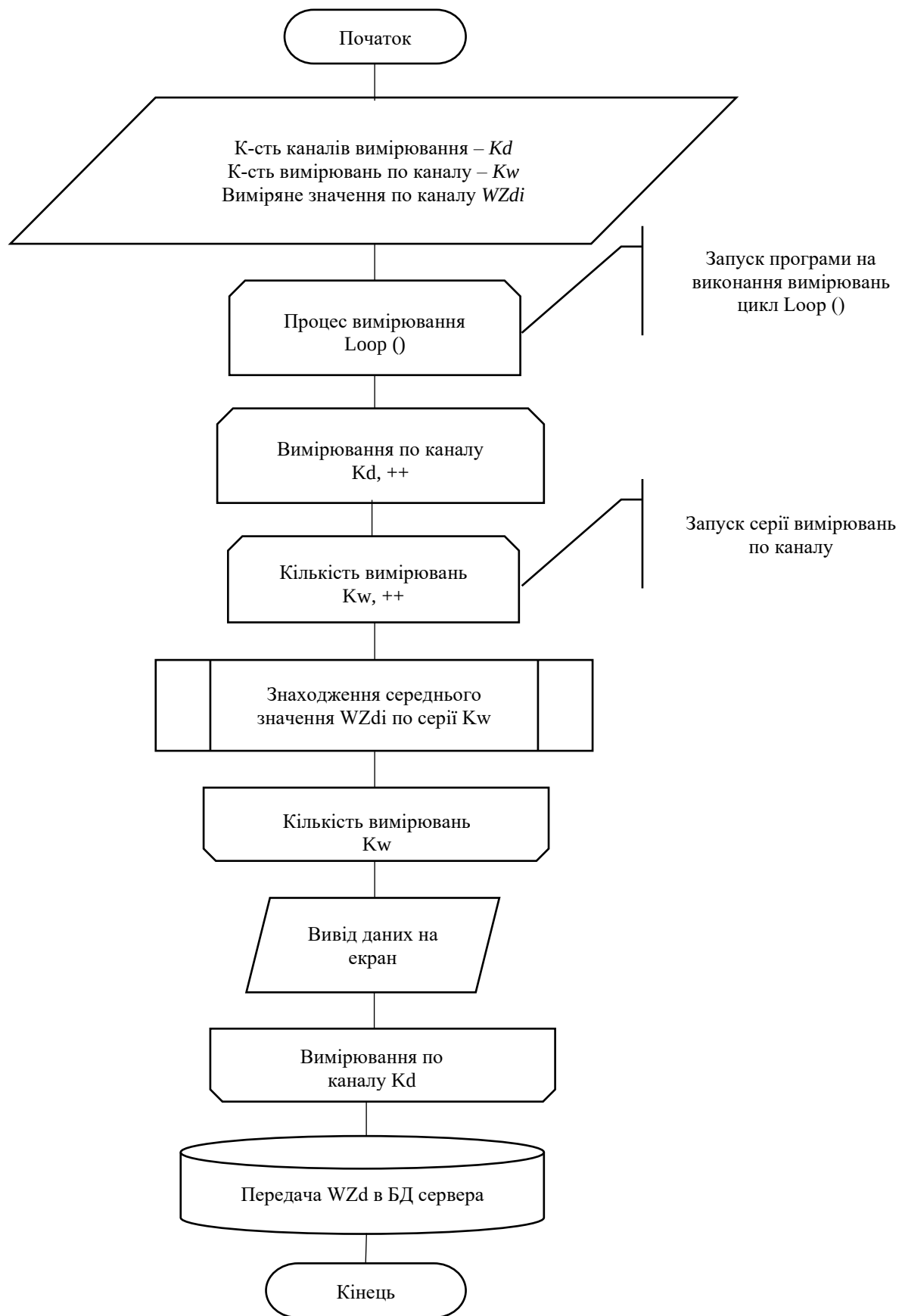


Рисунок 3.1 – Блок-схема алгоритму організації процесу вимірювань

Робота системи починається з ініціалізації мікроконтролера та налаштування внутрішнього таймера або зовнішнього сигналу, який визначає періодичність запуску вимірювального циклу. На початку кожного циклу мікроконтролер формує адресу потрібного вимірювального каналу та подає її у вигляді цифрового коду на вхід аналогового комутатора (наприклад, ADG509). Це дозволяє вибірково з'єднати конкретний канал з аналоговим входом АЦП.

Одразу після вибору каналу виконується підготовка вимірювального кола відповідно до типу електричного параметра, який потрібно виміряти. Мікроконтролер формує спеціальний код конфігурації, який через GPIO лінії активує необхідні елементи схеми: резистивні подільники — для вимірювання напруги, шунти — для струму, опорні резистори — для обчислення опору, генератори імпульсів — для оцінки ємності або індуктивності.

Ці елементи можуть перемикатись електронними ключами або комутаторами, що формують різні вимірювальні діапазони та схеми.

Після формування конфігурації здійснюється аналогове вимірювання. Сигнал з активного каналу надходить на АЦП, де перетворюється у цифрове значення. Мікроконтролер масштабує отримані дані відповідно до активного діапазону та типу вимірюваного параметра. Передбачається, що процес кожного вимірювання має здійснюватися 2 рази. В результаті першого вимірювання в найбільшому діапазоні визначається той діапазон, вимірювання в якому матиме мінімальну похибку (розділ 2.3). Для зменшення впливу шумів та усереднення випадкових похибок даних процес здійснюється K_w – раз. Після завершення даного виду вимірювань система управління мультиметра переходить до наступного вимірювального каналу і повторює описану послідовність дій. Таким чином, відбувається циклічний і безперервний процес сканування всіх доступних каналів і вимірювальних конфігурацій та формується масив інформації по всіх каналах.

Після цього система виконує оцінку, чи потрібно передавати результат вимірювання назовні. Даний процес деталізований недостатньо тому, що основним режимом роботи портативного мультиметра є ручний, а автоматичний

					ДП.МТІР.9702577.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		55

є лише можливістю універсалізації приладу для застосування в автоматичному режимі. Очевидно, що цей процес слід узгоджувати із замовником та вносити зміни в програмне забезпечення. Серед причин, які викликають необхідність передачі даних можуть бути наступні — виміряне значення виходить за допустимі межі, суттєво змінюється в часі, відповідає або якщо є запит із зовнішньої системи. У разі потреби мікроконтролер формує інформаційний пакет і надсилає його через доступний інтерфейс зв'язку, наприклад UART, I2C, SPI, Bluetooth або Wi-Fi.

Цей підхід дозволяє реалізувати автоматизований мультиметр або систему збору даних із гнучким перемиканням між каналами, автоматичним вибором діапазону та адаптивною передачею даних.

3.2. Налаштування середовища та розробка програмного скетчу

Для програмування мікроконтролера ESP32, потрібно виконати кілька послідовних кроків у середовищі Arduino IDE, яке є популярним інструментом для створення прошивок для цього модуля. Спочатку необхідно завантажити та встановити Arduino IDE з офіційного сайту, обравши версію, сумісну з операційною системою комп'ютера. Після встановлення слід додати підтримку плат ESP32. Для цього в налаштуваннях IDE у розділі «Додаткові URL-адреси менеджера плат» вставляється посилання на пакет від Espressif (https://raw.githubusercontent.com/espressif/arduino-esp32/gh-pages/package_esp32_index.json), а потім через менеджер плат у розділі «Інструменти» встановлюється пакет «esp32» - рисунок 3.1. Далі потрібно підключити плату ESP32 до комп'ютера за допомогою USB-кабелю, який підтримує передачу даних, і вибрати відповідну модель плати, наприклад, «ESP32 Dev Module», у меню «Інструменти» - рисунок 3.2.

					ДП.МТІР.9702577.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		56

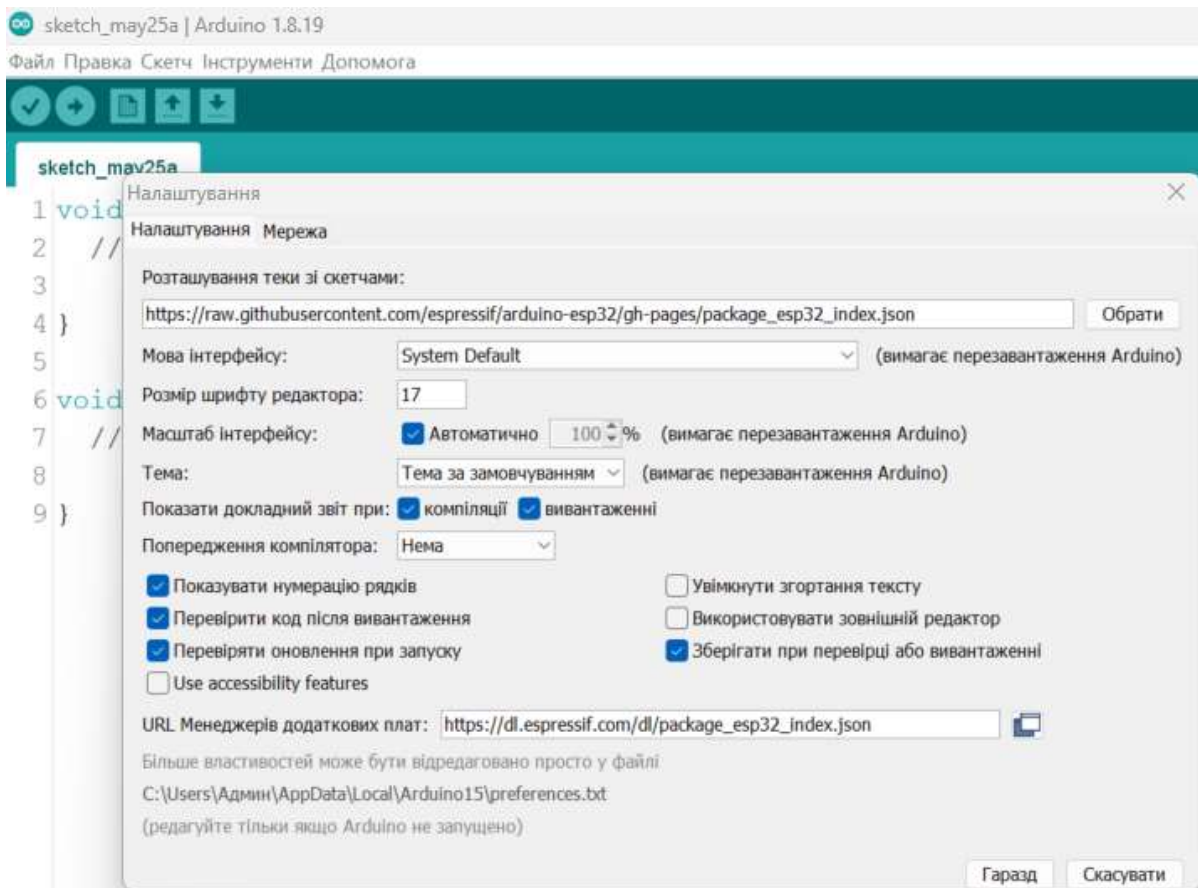


Рисунок 3.1 – Підключення бібліотеки ESP32 до Arduino IDE

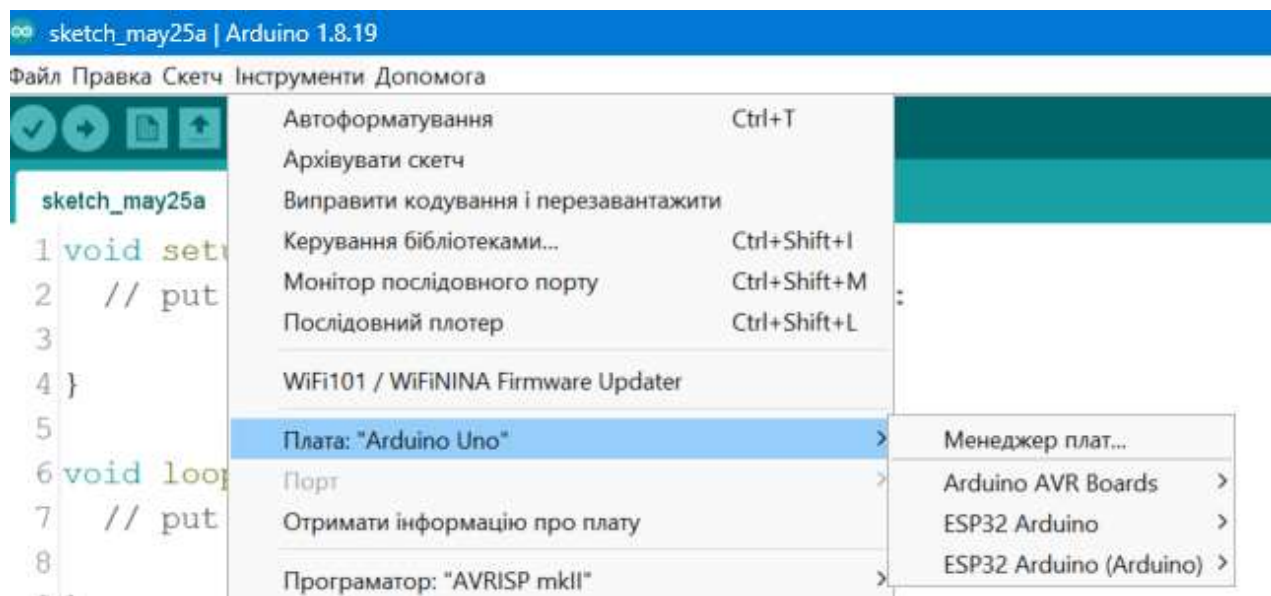


Рисунок 3.2 – Підключення плати ESP32

Після налаштувань середовища, наступним кроком є розробка програмного скетчу. Узагальнена структура скетчу складається з кількох розділів і має наступний вид (рис. 3.3):

```
// 1. Підключення бібліотек
#include <SomeLibrary.h>

// 2. Оголошення глобальних змінних
int ledPin = 13;
unsigned long previousMillis = 0;

// 3. Функція налаштування (setup)
void setup() {
    // код, який виконується один раз при запуску/перезавантаженні
    pinMode(ledPin, OUTPUT);    // налаштування піну як вихід
    Serial.begin(9600);        // ініціалізація серіального порту
}

// 4. Основна функція (loop)
void loop() {
    // основний код, який виконується безперервно
    digitalWrite(ledPin, HIGH); // вмикання
    delay(1000);                // пауза
    digitalWrite(ledPin, LOW);  // вимикання
    delay(1000);                // пауза
}
```

Рисунок 3.3 – Узагальнена структура програмного скетчу

В цілому він буде складатися з ряду фрагментів. Спочатку реалізує циклічне опитування п'яти аналогових вимірювальних каналів ($U I R C L$) з використанням аналогового комутатора мультиметра, що підключений до ESP32. Кожен канал послідовно підключається до вбудованого АЦП ESP32. Для кожного каналу виконується два вимірювання:

- перше вимірювання проводиться через 0.1 секунди після вибору каналу та використовується для формування сигналу на вихід, який підключений

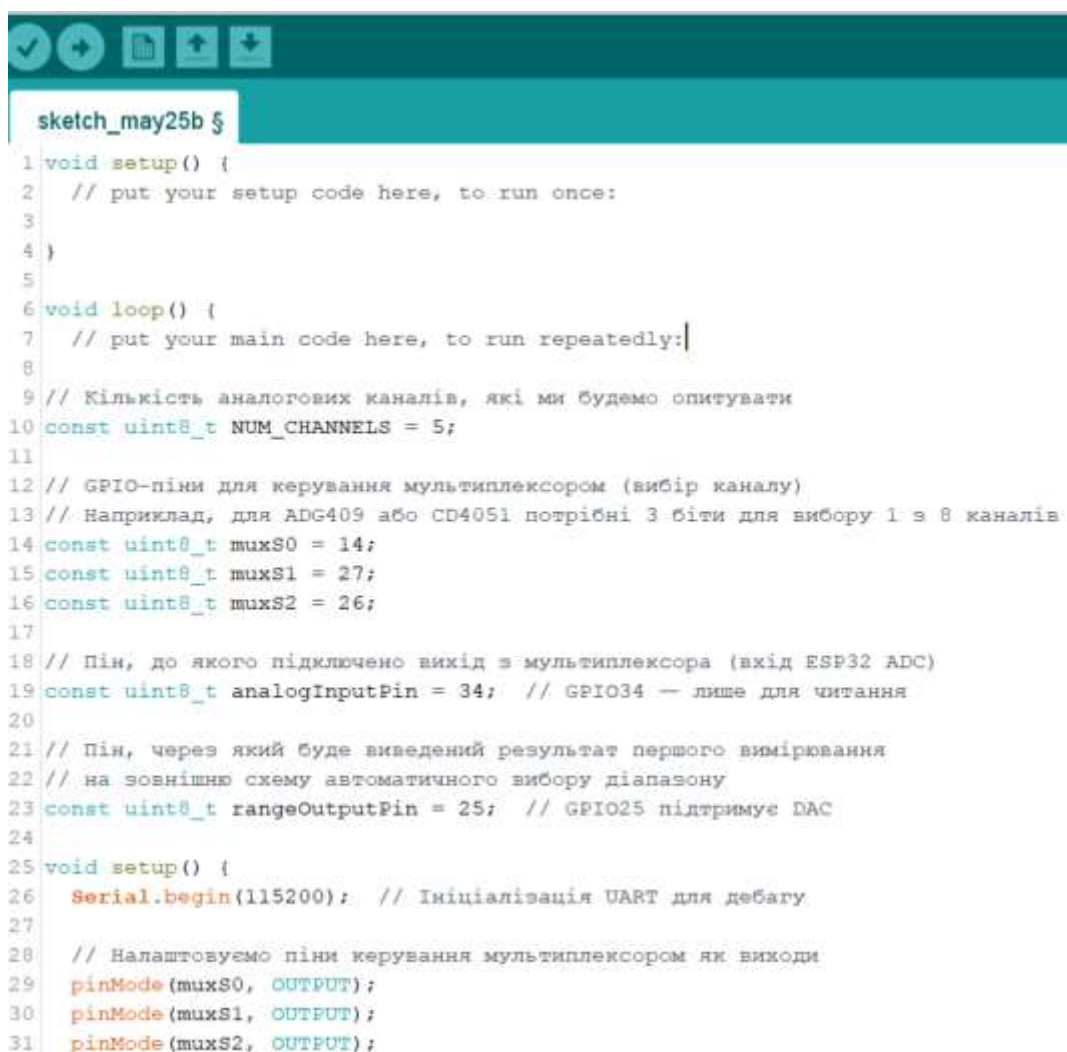
					ДП.МТІР.9702577.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		58

до схеми автоматичного визначення діапазону (наприклад, перемикання опорних резисторів).

- друге вимірювання виконується ще через 0.1 секунди і є основним для аналізу чи збереження.

- після завершення циклу каналів (від 0 до 4), процес знову повторюється безперервно в основному циклі loop().

Фрагмент програми приведено на рисунку 3.4, а детальніший код на рисунку 3.5.



```
sketch_may25b $
1 void setup() {
2   // put your setup code here, to run once:
3
4 }
5
6 void loop() {
7   // put your main code here, to run repeatedly:
8
9   // Кількість аналогових каналів, які ми будемо опитувати
10  const uint8_t NUM_CHANNELS = 5;
11
12  // GPIO-піни для керування мультиплексором (вибір каналу)
13  // Наприклад, для ADG409 або CD4051 потрібні 3 біти для вибору 1 з 8 каналів
14  const uint8_t muxS0 = 14;
15  const uint8_t muxS1 = 27;
16  const uint8_t muxS2 = 26;
17
18  // Пін, до якого підключено вихід з мультиплексора (вихід ESP32 ADC)
19  const uint8_t analogInputPin = 34; // GPIO34 — лише для читання
20
21  // Пін, через який буде виведений результат першого вимірювання
22  // на зовнішню схему автоматичного вибору діапазону
23  const uint8_t rangeOutputPin = 25; // GPIO25 підтримує DAC
24
25  void setup() {
26    Serial.begin(115200); // Ініціалізація UART для дебагу
27
28    // Налаштовуємо піни керування мультиплексором як виходи
29    pinMode(muxS0, OUTPUT);
30    pinMode(muxS1, OUTPUT);
31    pinMode(muxS2, OUTPUT);
```

Рисунок 3.4 – Створення програмного скетчу в середовищі Arduino IDE

```

const uint8_t NUM_CHANNELS = 5; // Кількість аналогових каналів, які ми будемо опитувати
// GPIO-пини для керування мультимплексором (вибір каналу)
const uint8_t muxS0 = 14; // для аналогового комутатора потрібні 3 біти для вибору 1 з 8 каналів
const uint8_t muxS1 = 27;
const uint8_t muxS2 = 26;
// Пін, до якого підключено вихід з мультимплексора (вихід ESP32 ADC)
const uint8_t analogInputPin = 34; // GPIO34 — лише для читання

// Пін, через який буде виведений результат першого вимірювання
// на зовнішню схему автоматичного вибору діапазону
const uint8_t rangeOutputPin = 25; // GPIO25 підтримує DAC
void setup() {
    Serial.begin(115200); // Ініціалізація UART для дебагу
    pinMode(muxS0, OUTPUT); // Налаштовуємо пини керування мультимплексором як виходи
    pinMode(muxS1, OUTPUT);
    pinMode(muxS2, OUTPUT);
    pinMode(rangeOutputPin, OUTPUT); // Пін для виводу сигналу на зовнішню схему
}

```

Рисунок 3.5 – Фрагмент коду, що ілюструє управління аналоговим комутатором та схемою автоматичного визначення діапазону вимірювань

Фрагмент основного циклу опитування каналів приведено на рисунку 3.6.

```

void loop() {
    for (uint8_t channel = 0; channel < NUM_CHANNELS; channel++) {
        // Вибірємо активний канал на аналоговому комутаторі
        selectMuxChannel(channel);
        delay(5); // Коротка затримка для стабілізації сигналу на виході мультимплексора

        // Через 100 мс виконуємо перше вимірювання (попереднє)
        delay(100); // 0.1 секунди
        uint16_t adcValue1 = analogRead(analogInputPin);

        // Масштабуємо 12-бітне значення ADC (0-4095) до 8 біт (0-255)
        // і виводимо його на зовнішню схему (наприклад, через DAC)
        uint8_t pwmOut = map(adcValue1, 0, 4095, 0, 255);
        dacWrite(rangeOutputPin, pwmOut); // Аналоговий вихід на GPIO25 або 26

        // Через ще 100 мс проводимо друге, основне вимірювання
        delay(100); // Ще 0.1 секунди
        uint16_t adcValue2 = analogRead(analogInputPin);

        // Виводимо результати в UART для діагностики
        Serial.print("Канал ");
        Serial.print(channel);
        Serial.print(": ADC1=");
        Serial.print(adcValue1);
        Serial.print(", ADC2=");
        Serial.println(adcValue2);
    }
}

```

Рисунок 3.6 – Фрагмент скетчу, що реалізує основний цикл опитування каналів

					ДП.МТІР.9702577.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		60

Основні функції, що використовувались в даних фрагментах приведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 - Основні функції, що використовувались в розглянутих вище фрагментах

Функція	Призначення
<code>analogRead(pin)</code>	Зчитує 12-бітне значення АЦП з аналогового піну ESP32 (0...4095).
<code>map(val, 0, 4095, 0, 255)</code>	Масштабує значення ADC до 8-бітного діапазону.
<code>dacWrite(pin, value)</code>	Виводить аналогове значення (через внутрішній ЦАП ESP32) на пін. Працює тільки на GPIO25 або GPIO26.
<code>digitalWrite(pin, val)</code>	Встановлює логічний рівень на вихідному піні.
<code>bitRead(val, bit)</code>	Повертає значення окремого біта.

Процедура передачі даних з ESP32 по UART починається з правильного підключення. Для цього використовуються апаратні UART-інтерфейси мікроконтролера. Найчастіше за замовчуванням використовують UART0, де передача (TX) здійснюється через пін GPIO1, а прийом (RX) — через GPIO3. Важливо враховувати, що UART0 також використовується для підключення до монітора порту під час розробки, тому за потреби можна скористатися UART1 або UART2 з перепризначенням пінів.

У програмному коді першим кроком є ініціалізація UART у функції `setup()`. Для цього використовується команда `Serial.begin(115200)`, яка встановлює швидкість передачі даних, наприклад 115200 бод.

Після виконання вимірювання значень АЦП, програма формує текстовий рядок, який містить інформацію про номер активного каналу, а також результати двох вимірювань. Цей рядок може виглядати так: CH=2,ADC1=1234,ADC2=2345. Для формування такого повідомлення застосовується об'єкт *String*, до якого додаються значення змінних.

Сформоване повідомлення передається через UART за допомогою команди `Serial.println()`. Ця команда надсилає рядок до UART-порту та

автоматично додає символ нового рядка в кінці, що полегшує обробку повідомлень на стороні приймача.

На стороні приймача (наприклад, комп'ютера, іншого мікроконтролера або Arduino) UART-порт приймає ці текстові повідомлення. Приймач може зчитувати рядки, розпізнавати ключові поля (наприклад, CH, ADC1, ADC2) і використовувати ці дані для подальшої обробки або збереження — наприклад, у файл CSV або для відображення на екрані.

Таким чином, передача результатів вимірювань по UART забезпечує простий і надійний спосіб зв'язку між ESP32 та іншими пристроями, зручний як для моніторингу, так і для подальшого аналізу даних.

Передача результатів вимірювань з ESP32 по Wi-Fi починається з підключення мікроконтролера до бездротової мережі. У програмі задаються назва мережі (SSID) та пароль, після чого ESP32 встановлює з'єднання з маршрутизатором. Коли з'єднання успішно встановлено, пристрій отримує локальну IP-адресу, яка використовується для обміну даними.

Далі організовується один із способів передачі даних. Найчастіше використовують або HTTP-клієнт, який надсилає дані на сервер (наприклад, у вигляді POST-запиту), або вебсервер, запущений на самому ESP32, який дозволяє іншим пристроям (наприклад, браузеру або клієнтському додатку) періодично запитувати останні результати вимірювань.

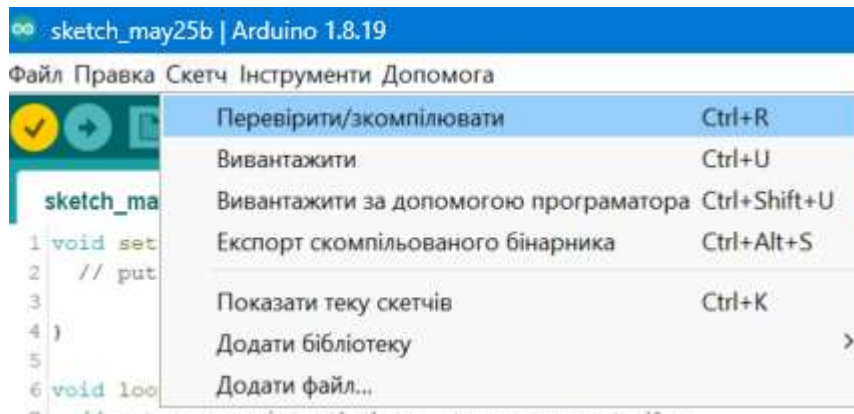
У випадку з HTTP-клієнтом, після кожного вимірювання ESP32 формує запит з результатами (наприклад, у форматі JSON або URL-параметрів) і надсилає його на заздалегідь визначену адресу сервера. Якщо використовується вебсервер, то результати зберігаються у змінній, і при кожному запиті клієнта ESP32 відповідає, надаючи свіжі дані.

Такий підхід дозволяє зручно передавати вимірювальну інформацію у хмару, на локальний ПК або мобільний пристрій без дротів, використовуючи стандартну Wi-Fi інфраструктуру.

Після написання скетчу в Arduino IDE спочатку необхідно перевірити його на наявність синтаксичних помилок. Для цього використовують головне меню –

					ДП.МТІР.9702577.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		62

рисуюнок 3.7 або натискають кнопку "Перевірити" (✓) у верхній частині вікна IDE. Система компілює код, не завантажуючи його на плату.



Рисуюнок 3.7 – Компіляція програмного коду

Якщо виникають помилки — вони відображаються у вікні компіляції внизу, і їх потрібно виправити.

Натискають кнопку "Завантажити" (→). Під час цього IDE компілює код ще раз і надсилає його на ESP32 через USB. Плата зазвичай автоматично перезавантажується після прошивки. Якщо цього не сталося, може знадобитися натиснути кнопку BOOT на ESP32 під час завантаження.

3.3. Особливості методики калібрування мультиметра

Процес калібрування засобів вимірювальної техніки (ЗВТ), що вимірюють електричні параметри, в Україні регламентується низкою нормативних документів, зокрема державними стандартами (ДСТУ), які гармонізовані з міжнародними та європейськими стандартами. Нижче наведено основні ДСТУ та інші нормативні документи, які стосуються калібрування ЗВТ електричних параметрів, з описом їхнього призначення:

ДСТУ 3989-2000 Метрологія. Калібрування засобів вимірювальної техніки. Основні положення, організація, порядок проведення та оформлення результатів. Цей стандарт установлює основні вимоги до організації та

					ДП.МТІР.9702577.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		63

проведення калібрування ЗВТ, включаючи засоби для вимірювання електричних параметрів. Він визначає порядок виконання калібрування, вимоги до простежуваності вимірювань, оформлення результатів (сертифікатів калібрування) та нанесення калібрувальних знаків.

ДСТУ EN ISO/IEC 17025:2019 Загальні вимоги до компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій. Цей стандарт є основним для акредитації калібрувальних лабораторій, які проводять калібрування ЗВТ електричних величин. Він визначає вимоги до компетентності лабораторій, включаючи технічні аспекти (наявність еталонів, простежуваність до національних або міжнародних еталонів), регламентує оформлення результатів калібрування, зокрема, із зазначенням невизначеності вимірювань.

Існують і інші стандарти, що так чи інакше пов'язані з калібруванням. Це, наприклад, ДСТУ OIML D 16:2008 Основні принципи метрологічного контролю, який визначає принципи метрологічного контролю, включаючи калібрування ЗВТ. ДСТУ 3968-2000 Метрологія. Тавра повірочні та калібрувальні, що регламентує вимоги до повірочних і калібрувальних тавр, які наносяться на ЗВТ після успішного калібрування.

Конкретні методики калібрування для ЗВТ електричних параметрів (наприклад, вольтметрів, амперметрів, мультиметрів) розробляються лабораторіями на основі ДСТУ 3989-2000 та ДСТУ EN ISO/IEC 17025:2019. Ці методики враховують специфіку вимірювальних приладів і включають оцінку невизначеності вимірювань.

Методика калібрування мультиметрів розробляється відповідно до вимог ДСТУ 3989-2000 та ДСТУ EN ISO/IEC 17025:2019 і залежить від типу мультиметра (аналогового чи цифрового), його технічних характеристик (діапазони вимірювань, похибки) та призначення. Нижче наведено узагальнений опис методики калібрування мультиметрів, які вимірюють електричні параметри (напругу, силу струму, опір тощо).

На першому етапі здійснюється підготовка до калібрування, яка передбачає ознайомлення з технічною документацією мультиметра (паспорт,

					ДП.МТІР.9702577.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		64

інструкція з експлуатації), де вказані номінальні діапазони вимірювань, класи точності та допустимі похибки. Здійснюється вибір методики калібрування, затвердженої акредитованою лабораторією, або розробка власної методики, що відповідає ДСТУ 3989-2000. Розглядаються умови проведення процесу калібрування – температура, вологість, рівень електромагнітних завад, що можуть вплинути на вимірювання. Важливим підготовчим етапом калібрування є вибір обладнання - еталонів (калібратори, джерела напруги, струму, опору) з підтвердженою простежуваністю до національних або міжнародних еталонів. При цьому невизначеність еталона має бути щонайменше в 4 рази меншою за похибку мультиметра.

На другому етапі здійснюється процес калібрування. Процес калібрування мультиметра передбачає перевірку його роботи в різних режимах (вимірювання напруги, струму, опору тощо). Для кожного режиму виконуються наступні кроки (на прикладі вимірювання постійної напруги):

- підключити мультиметр до еталонного джерела напруги (наприклад, калібратора);
- встановити на калібраторі значення напруги в межах діапазонів мультиметра (наприклад, 100 мВ, 1 В, 10 В, 100 В);
- зчитати покази мультиметра та порівняти їх із еталонними значеннями;
- розрахувати похибку:

$$\Delta = U_{\text{мультиметр}} - U_{\text{еталон}}$$

де Δ — похибка, $U_{\text{мультиметр}}$ — показ мультиметра, $U_{\text{еталон}}$ — значення еталона.

- перевірити, чи похибка відповідає заявленій у паспорті мультиметра.

Аналогічно до постійної напруги, але з урахуванням особливостей даного параметру проводяться калібрування мультиметра при оцінці інших параметрів..

На третьому етапі проводять оцінку невизначеності вимірювань відповідно до ДСТУ EN ISO/IEC 17025:2019. Дана процедура включає інформацію про невизначеність еталона (вказана в сертифікаті калібрування еталона),

					ДП.МТІР.9702577.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		65

невизначеність, пов'язана з мультиметром (роздільна здатність, дрейф), вплив зовнішніх умов (температура, електромагнітні завади).

Невизначеність розраховується за методикою, описаною в GUM (Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement).

					ДП.МТІР.9702577.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						66
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

ВИСНОВКИ

В результаті виконання кваліфікаційної роботи розглянуто особливості функціонування цифрових мультиметрів, схеми їх підключення для вимірювання параметрів струму, напруги, електричного опору та ємності в електричних колах. Встановлено, що комплекс задач, ручне та автоматизоване вирішення яких дозволить оперативно отримувати достовірні результати вимірювань електричних параметрів в різних точках електричних кіл забезпечить їх надійне функціонування та розширить функціональність.

У рамках кваліфікаційної роботи розроблено прототип портативного мультиметра, призначеного для вимірювання напруги, струму, опору, ємності та індуктивності. Для реалізації перемикання між різними вимірювальними каналами використано аналогові комутатори, які автоматично підключають вхідні сигнали до відповідних схем вимірювання.

У пристрої реалізовано алгоритм автоматичного визначення діапазону вимірювань, що базується на двоетапному аналізі вхідного сигналу — спочатку проводяться попередні вимірювання, після чого обирається оптимальний діапазон для точного результату.

Усі обчислення, керування схемами та обробка результатів виконуються мікроконтролером ESP32, який також забезпечує передачу даних через Wi-Fi. Це дає змогу надсилати результати вимірювань на віддалений сервер або інтерфейс користувача.

					ДП.МТІР.9702577.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		67

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Карпюк І.О., Воляннюк Т.Ф. Дорошенко О.В. – Інтеграція цифрових приладів в автоматизовані системи вимірювання та моніторингу. Проблемно-наукова міжгалузева конференція «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології (АКІТ - 2025)», Тернопіль, 2025 – с. 71-72.
2. Основи метрології та вимірювальної техніки / Лис, О.М., Якименко, М.В., Шинкаренко [та ін.]. - Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2021. – 424 с.
3. Цюцюра В. Д., Цюцюра С. В. Метрологія та основи вимірювань: К.:Знання-Прес, 2018. – 180с.
4. Що таке мультиметр: види та основні функції мультиметрів - [Електронний ресурс]: - Режим доступу - <https://simvolt.ua/shcho-take-multymetr-vydy-ta-osnovni-funktsii-multymetriv/>
5. Метрологія, вимірювання та контроль: Навчальний посібник / О.В. Бєлова, Ю.І. Гринюк, М.С. Ємельянов. - К.: Видавничий дім "Паливода А.С.", 2020. – 193с.
6. Метрологія та вимірювання: Навч.посіб. / М. Дорожовець, Р. Івах, В. Мотало [та ін.]; за наук. ред. Б.І. Стадника. - Львів: Вид-во Львівської політехніки, 2018. – 312 с.
7. Обробка результатів фізичних вимірювань: навч. посібник / І.Ф.Скіцько, О.І.Скіцько. - КПІ ім .Ігоря Сікорського. - Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. - 88 с. [Електронний ресурс]: - Режим доступу: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/25320/1/Obrobka_rezult._fizych._vymiriuvan.pdf
8. Програмування Arduino - [Електронний ресурс]. / Режим доступу - <https://forum.arduino.ua/viewforum.php?id=1>.

					ДП.МТІР.9702577.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		68

9. Теоретические основы информационно-измерительных систем: Учебник / В.П.Бабак, С.В.Бабак, В.С.Еременко и др.; под ред. чл.-кор. НАН Украины В.П.Бабака. – К., 2014. – 832с.
- 10.Основи метрології та електричних вимірювань : підручник / В. В. Кухарчук, В. Ю. Кучерук, Є. Т. Володарський, В. В. Грабко. – Херсон: Олді-плюс, 2013. – 538 с.
- 11.М.Дорожовець, В.Мотало, Б.Стадник та ін. Основи метрології та вимірювальної техніки: Підручник у 2-х т. Т.1. Основи метрології. — Львів.: Видавництво НУ «Львівська політехніка», 2005. — 532 с.
- 12.Поліщук Є.С., Дорожовець М.М., Стадник Б.І. та ін. Засоби та методи вимірювань неелектричних величин: Підручник. /За ред. Є.С.Поліщука. — Львів.: Видавництво «Бескид Біт», 2008. — 618 с.
- 13.R. Bartiromo, M. Vincenzi. Electrical Measurements in the Laboratory Practice. – Springer. - 2016. – 301p.

					ДП.МТІР.9702577.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		69