

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

КАРПЮК ІРИНА ОЛЕКСАНДРІВНА

Інтеграція цифрових мультиметрів в автоматизовані
системи контролю та моніторингу / Integration of digital
multimeters into automated control and monitoring systems

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

Кваліфікаційна робота

Виконала студентка групи
МТІР – 41 І.О. Карпюк

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.

ЗАВДАННЯ

НА ВИПУСКНУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Карпюк Ірині Олександрівні

(прізвище, ім'я по-батькові)

1. Тема випускної кваліфікаційної роботи

Інтеграція цифрових мультиметрів в автоматизовані системи контролю та моніторингу / Integration of digital multimeters into automated control and monitoring systems

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. Системи вимірювання та моніторингу електричних параметрів побудовані з використанням мікроконтролерів
3. Характеристики мікроконтролера ESP 32

4. Основні питання, які потрібно розробити:

1. Аналіз технологічного процесів побудови систем вимірювання та моніторингу параметрів електричних кіл.
2. Проектування системи інтеграції цифрових мультиметрів.
3. Програмно-апаратна системи вимірювання та моніторингу параметрів електричних кіл на основі інтеграції цифрових мультиметрів.

5. Перелік графічного матеріалу у роботі:

1. Структурна схема системи автоматизованого вимірювання та моніторингу електричних параметрів.
2. Структурна схема підключення цифрового мультиметра в режимі амперметра, вольтметра, омметра.
3. 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 технічних засобів та мікропроцесорної техніки	02.2025р. – 03.2025р.	
3	Апаратно-програмна реалізація автоматизованої системи на основі інтеграції цифрових мультиметрів	04.2025р. – 05.2025р.	

Студент

(підпис)

Карпюк І.О.

Керівник роботи

(підпис)

к.т.н., доц. Масляк Б.О.

РЕФЕРАТ

Робота виконана на 58 сторінках та містить 17 рисунків, 12 джерел за переліком посилань.

Мета роботи. Інтеграція цифрових мультиметрів в автоматизовані системи контролю та моніторингу.

Результати роботи. Проведено аналіз ринку цифрових мультиметрів, розглянуто їх характеристики та комунікаційні особливості. Враховуючи відносну квазістаціонарність електричних параметрів технологічних процесів (відсутність потреби у високій швидкодії вимірювань) та просторове підключення цифрових мультиметрів в структуру централізованої автоматизованої системи контролю та моніторингу введено проміжну ланку у вигляді мікроконтролера ESP32, що дозволяє легко масштабувати систему та мінімізувати надлишковий трафік збору інформації.

Для підсистеми нижнього рівня розроблено незалежні схеми підключення цифрового мультиметра та багатоканальний аналоговий комутатор, який дозволяє по чергово вимірювати електричні параметри у різних точках вимірювальних кіл.

На верхньому рівні управління реалізуються функції збору вимірних даних від мультиметрів при використанні Wi-Fi – з'єднання. Розроблено програмні скетчі реалізації основних функцій цифрових мультиметра та контролера.

Рекомендації по використанню результатів роботи. Розроблену автоматизовану систему контролю та моніторингу рекомендується застосовувати при потребі відслідковування параметрів електричних кіл у різних сферах.

Ключові слова. КОНТРОЛЬ, МОНІТОРИНГ, ЦИФРОВИЙ МУЛЬТИМЕТР, ДРОТОВИЙ ТА БЕЗДРОТОВИЙ ІНТЕРФЕЙС, МОНІТОРИНГ, СЕНСОР, МІКРОКОНТРОЛЕР, ПРОГРАМНИЙ СКЕТЧ.

ABSTRACT

The work is completed on 58 pages and contains 17 figures, 12 sources according to the list of references.

Purpose of the work. Integration of digital multimeters into automated control and monitoring systems.

Results of the work. An analysis of the market of digital multimeters was conducted, their characteristics and communication features were considered. Taking into account the relative quasi-stationarity of electrical parameters of technological processes (no need for high measurement speed) and spatial connection of digital multimeters, an intermediate link in the form of an ESP32 microcontroller was introduced into the structure of the centralized automated control and monitoring system, which allows you to easily scale the system and minimize excess information collection traffic.

For the lower-level subsystem, independent digital multimeter connection schemes and a multi-channel analog switch were developed, which allows you to alternately measure electrical parameters at different points of the measuring circuits.

At the upper level of management, the functions of collecting measured data from multimeters when using Wi-Fi - connection are implemented. Software sketches for implementing the main functions of digital multimeters and controllers have been developed. Recommendations for using the results of the work. The developed automated control and monitoring system is recommended for use when tracking parameters of electrical circuits in various areas is required.

Keywords. CONTROL, MONITORING, DIGITAL MULTIMETER, WIRED AND WIRELESS INTERFACE, MONITORING, SENSOR, MICROCONTROLLER, SOFTWARE SKETCH.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	7
Вступ	8
1. Аналіз ринку сучасних цифрових мультиметрів з підтримкою віддаленого контролю та моніторингу електричних параметрів	12
1.1. Основні характеристики цифрових мультиметрів	12
1.2. Аналіз інтерфейсів зв'язку цифрових мультиметрів	18
1.3. Особливості протоколів передачі даних (SCPI, Modbus)	25
1.4 Обґрунтування вибраного напрямку досліджень та постановка задачі	29
2. Архітектура автоматизованих систем контролю і моніторингу	31
2.1. Структура автоматизованих систем збору та обробки інформації	31
2.2. Обґрунтування та вибір вимірювальних підсистем	34
2.3. Особливості збору та обробки вимірювальних даних	42
3. Програмна інтеграція цифрових мультиметрів	46
3.1. Програмне управління процесами вимірювання мультиметрами	46
3.2. Програмні засоби дротової передачі даних контролеру ESP32	49
3.3. Організація бездротового трафіку від контролера до сервера	53
Висновки	56
Список використаних джерел	57

					ДП.МТІР.9500089.00.00.00.000 ПЗ				
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Інтеграція цифрових мультиметрів в автоматизовані системи контролю та моніторингу / <u>Integration of digital multimeters into automated control and monitoring systems</u>	Літ.	Арк.	Акрушів	
Розроб.		Карпюк І.Б.							
Перевірив.		Масляк Б.О.					6	58	
Консульт.						ЗУНУ.ФКІТ.МТІР-41			
Н. Контр.		Масляк Б.О							
Затверд.		Сегін А.І.							

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АС – автоматизована система

МК – мікроконтролер;

ТП – технологічний процес

ВК – вимірювальний канал

АЦП – аналого-цифровий перетворювач

ЦАП – цифро - аналоговий перетворювач

ПЗ – програмне забезпечення

					ДП.МТІР.9500089.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						7
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

ВСТУП

У сучасних умовах розвитку промислових, енергетичних та інформаційно-керуючих систем зростає потреба у високоточних, надійних і автоматизованих засобах вимірювання електричних параметрів. Цифрові мультиметри — універсальні прилади, які дають змогу здійснювати точні вимірювання напруги, струму, опору, частоти, температури та інших електричних величин. З огляду на активне впровадження концепцій Індустрії 4.0, Інтернету речей (IoT) та цифровізації технічної інфраструктури, інтеграція мультиметрів у автоматизовані системи контролю та моніторингу набуває особливої актуальності.

Сучасні цифрові мультиметри класифікуються за рівнем точності, функціональністю, умовами експлуатації та наявністю інтерфейсів передачі даних. На ринку представлений широкий спектр моделей — від базових ручних мультиметрів до прецизійних лабораторних приладів із функціями логування, віддаленого керування і вбудованим аналізом даних.

Провідним виробником у цій галузі є Fluke Corporation (США), яка випускає прилади промислового класу, зокрема лінійки Fluke 17x та Fluke 287/289, що відзначаються високою надійністю, точністю та підтримкою бездротової передачі даних через Fluke Connect. Keysight Technologies (США) пропонує мультиметри серій U1230–U1250 для портативного використання і 34460A–34465A для лабораторій, які підтримують SCPI-протоколи, інтерфейси LAN, USB і GPIB, що дозволяє інтегрувати їх у складні автоматизовані системи. Німецька компанія Rohde & Schwarz пропонує високоточні мультиметри серії HMC8012, які забезпечують надійність і сумісність із промисловими стандартами.

Компанія UNI-T (Китай) спеціалізується на приладах середнього класу, що поєднують функціональність і доступну вартість. Зокрема, моделі UT61 і UT181A мають можливості підключення до ПК, бездротового обміну даними та зручне програмне забезпечення. Brymen Technology (Тайвань) постачає

					ДП.МТІР.9500089.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		8

мультиметри, як-от BM869s, які поєднують надійність, точність і підтримку передачі даних через USB. А Gossen Metrawatt (Німеччина), відома приладами преміум-класу серії METRANIT, зосереджується на системах з підвищеними вимогами до безпеки, точності та повної цифрової інтеграції (Bluetooth, USB, вбудована пам'ять).

Ці тенденції свідчать про готовність вимірювального обладнання до цифрової трансформації. Проте ефективна інтеграція мультиметрів у конкретні автоматизовані системи потребує технічного обґрунтування вибору приладів, адаптації програмного забезпечення, розробки комунікаційної архітектури та забезпечення сумісності з іншими компонентами системи.

Метою кваліфікаційної роботи є розробка та обґрунтування технічних рішень щодо інтеграції цифрових мультиметрів у автоматизовані системи контролю та моніторингу з урахуванням вимог до точності, надійності, масштабованості та мережевої сумісності SCADA - системи.

SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) — це клас програмно-апаратних систем, призначених для диспетчерського управління, збору, обробки та візуалізації даних у реальному часі. Вони є ключовим елементом автоматизованих систем керування технологічними процесами на підприємствах різного профілю — від промисловості та енергетики до транспорту й інфраструктури. Сучасні SCADA-платформи підтримують гнучку інтеграцію з вимірювальним обладнанням, включно з цифровими мультиметрами, за допомогою стандартних протоколів обміну даними (Modbus, OPC UA, MQTT, DNP3, REST API). Завдяки цьому вони стають придатними для створення інтегрованих систем контролю та моніторингу, де мультиметри виступають джерелами первинних вимірювальних даних. Серед найбільш поширених та функціонально потужних SCADA-платформ можна виділити:

- Siemens SIMATIC WinCC — промислова платформа, що забезпечує масштабованість від локальних панелей оператора до розподілених систем управління. Має глибоку інтеграцію з обладнанням Siemens і підтримує OPC, Modbus TCP/RTU, SNMP тощо.

					ДП.МТІР.9500089.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		9

- Wonderware (AVEVA System Platform) — універсальна SCADA/HMI-платформа з широкими можливостями для об'єктно-орієнтованого проектування, візуалізації та аналітики. Підтримує OPC UA, .NET API, REST-запити, що дозволяє інтегрувати нестандартне обладнання.

- Ignition (Inductive Automation) — відкрита SCADA-платформа на базі Java, що вирізняється гнучкою архітектурою, доступом через вебінтерфейс, підтримкою MQTT, REST API, OPC UA. Ідеально підходить для IoT-інтеграцій та невеликих систем збору даних.

- NI LabVIEW + DSC Module — середовище для розробки віртуальних приладів, яке з використанням додаткових модулів дозволяє реалізувати SCADA-функції для малих і середніх систем. Має підтримку інтерфейсів VISA, USB, RS-232, що зручно для інтеграції мультиметрів.

- Open Source SCADA-платформи:
 - OpenSCADA — модульна платформа з відкритим кодом, що підтримує стандартні протоколи, скрипти та бази даних;
 - ScadaBR — базується на Java і підходить для малих систем, особливо в освітніх або дослідницьких цілях.

Завдяки своїй відкритості, модульності та підтримці сучасних протоколів, SCADA-платформи забезпечують основу для побудови інтегрованих автоматизованих систем із цифровими мультиметрами, дозволяючи здійснювати централізований контроль, реєстрацію, аналітику та формування звітів на основі отриманих вимірювальних даних.

Ці системи дозволяють створити повнофункціональні SCADA-рішення з мінімальними витратами. Вони особливо корисні у навчанні, прототипуванні, НДР, а також у промислових умовах, де потрібна специфічна адаптація до нестандартного обладнання — наприклад, цифрових мультиметрів з серійним або USB-інтерфейсом.

Для досягнення поставленої мети сформульовано такі завдання:

- провести аналіз сучасних цифрових мультиметрів, їх класифікації та функціональних можливостей;

					ДП.МТІР.9500089.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		10

- дослідити мережеві можливості мультиметрів і визначити вимоги до інтерфейсів і протоколів передачі даних;
- розробити архітектуру системи моніторингу з цифровими мультиметрами;
- реалізувати фрагмент системи на основі доступних апаратних і програмних рішень;
- провести експериментальні дослідження точності, стабільності та функціональності запропонованої системи.

Об'єктом дослідження є процеси вимірювання та контролю електричних параметрів у технічних системах із застосуванням цифрових мультиметрів.

Предметом дослідження виступають методи та засоби інтеграції цифрових мультиметрів у автоматизовані системи збору, передачі, обробки та візуалізації даних, включно з технічними і програмними рішеннями.

У ході дослідження використовувалися методи аналізу технічної документації, порівняльного аналізу апаратних і програмних рішень, моделювання архітектури систем, експериментального вимірювання, а також елементи системного підходу.

Кваліфікаційна робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. У першому розділі проведено теоретичний аналіз сучасних засобів вимірювання та підходів до їх автоматизованого використання. У другому розділі розглянуто принципи побудови систем моніторингу з цифровими мультиметрами та обґрунтовано вибір технічних засобів. У третьому розділі описано реалізацію інтеграції мультиметра в систему моніторингу, включаючи апаратну та програмну частини. Даний розділ також присвячено результатам дослідження точності вимірювальної інформації, оцінці ефективності запропонованого рішення та аналізу отриманих результатів.

					ДП.МТІР.9500089.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		11

1. АНАЛІЗ РИНКУ СУЧАСНИХ ЦИФРОВИХ МУЛЬТИМЕТРІВ З ПІДТРИМКОЮ ВІДДАЛЕНОГО МОНІТОРИНГУ

1.1. Основні характеристики цифрових мультиметрів

Автоматизовані системи моніторингу та контролю призначені для забезпечення безперервного спостереження за станом об'єктів, процесів або середовищ та оперативного управління ними на основі отриманих даних. Основна мета таких систем — підвищення ефективності, безпеки та надійності керованих процесів, а також зниження впливу людського фактору. Вони широко застосовуються в промисловості, енергетиці, транспорті, сільському господарстві, екологічному моніторингу та інших сферах.

Цілі автоматизованих систем моніторингу та контролю полягають у забезпеченні своєчасного виявлення відхилень від нормальних режимів роботи, запобіганні аварійним ситуаціям, оптимізації технологічних процесів, забезпеченні зворотного зв'язку для прийняття рішень, а також накопиченні даних для подальшого аналізу, прогнозування та прийняття стратегічних рішень. Основними задачами, які вирішують такі системи є:

- безперервне зчитування показів сенсорів або засобів вимірювання;
- фільтрацію та первинну обробку сигналів;
- передачу даних до централізованої системи управління або хмарного середовища;
- виявлення аномалій, порушень або критичних ситуацій;
- візуалізацію інформації для оператора;
- архівування та аналітику зібраних даних;
- реалізацію алгоритмів автоматичного реагування або керування.

Основними типами архітектур, які використовуються при побудові автоматизованих систем є централізована єдиний обчислювальний центр, який приймає, обробляє та зберігає дані з усіх сенсорів. Особливість децентралізованої структури полягає у розподілі функцій обробки між

					ДП.МТІР.9500089.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		12

локальними вузлами, які можуть автономно приймати рішення. Ієрархічна структура передбачає розподіл на рівні: польові пристрої (сенсори, виконавчі механізми), локальні контролери (PLC, RTU), рівень SCADA/IoT-платформи;

Хмарні або гібридні — з використанням хмарних сервісів для зберігання та обробки даних з можливістю масштабування, аналітики та віддаленого доступу.

Методи збору інформації базуються на використанні різноманітних сенсорів, пристроїв збору даних (DAQ), контролерів (наприклад, PLC або IoT-контролери), які здійснюють зчитування фізичних величин і перетворення їх у цифрову форму. Передача даних може здійснюватися через дротові (RS-485, Ethernet) або бездротові (Wi-Fi, LoRa, ZigBee, NB-IoT) канали.

Методи обробки інформації включають фільтрацію шумів, усереднення, нормалізацію, виявлення трендів, діагностику стану, машинне навчання для виявлення аномалій або прогнозування, а також побудову моделей процесів у реальному часі. Часто використовуються системи візуалізації (SCADA, HMI, IoT-дашборди), а також бази даних для архівування (SQL, NoSQL, TSDB).

Цифрові мультиметри є ключовими вимірювальними приладами в таких системах, які знаходять широке застосування.

До основних метрологічних характеристик цифрових мультиметрів належать їхня розрядність, яка безпосередньо впливає на роздільну здатність і точність відображення результатів вимірювань, а також базова точність, що кількісно визначає максимально допустиму похибку вимірювання за певних умов. Важливими є також діапазони вимірювань, що визначають межі вимірюваних величин, та вхідний опір, особливо при вимірюванні напруги, оскільки він впливає на точність результату, мінімізуючи вплив приладу на досліджуване коло.

Що стосується можливостей комунікації, сучасні цифрові мультиметри оснащуються різноманітними інтерфейсами зв'язку, такими як RS-232, USB, GPIB (IEEE-488) та Ethernet. Ці інтерфейси забезпечують фізичне підключення приладу до комп'ютерів або інших компонентів автоматизованих систем. Для

					ДП.МТІР.9500089.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		13

обміну даними використовуються різні протоколи передачі даних, які стандартизують формат і послідовність обміну інформацією, забезпечуючи сумісність між пристроями. Наявність інтерфейсів зв'язку також надає можливість дистанційного керування мультиметром, дозволяючи програмно змінювати режими роботи та діапазони вимірювань.

Завдяки цим комунікаційним можливостям стає можливим автоматизований збір та обробка даних, коли результати вимірювань у реальному часі передаються до керуючої системи для подальшого аналізу, візуалізації або використання в алгоритмах керування. Цифрові мультиметри, таким чином, можуть виступати в ролі важливих сенсорів у системах моніторингу та контролю, надаючи необхідну інформацію про стан технологічних процесів або електричних мереж. Для полегшення інтеграції розробляється спеціалізоване програмне забезпечення, що включає драйвери та бібліотеки функцій для взаємодії з конкретними моделями мультиметрів [8-12].

Ключовими критеріями вибору мультиметрів для їх інтеграції в автоматизовану систему є:

- інтерфейси передачі даних: USB, RS-232, Ethernet або Bluetooth для підключення до ПК або контролера.
- підтримка SCPI або MODBUS: для програмного управління в автоматизованих системах.
- безперервний моніторинг: режим логування, автоматичне зчитування показів.
- точність вимірювань: не нижче ніж 0.05...0.1% для напруги/струму.
- категорія безпеки CAT III або вище: для надійної роботи в реальному середовищі.
- можливість калібрування та підтримка метрологічного контролю.
- можливість інтеграції у стенди або шафи (форм-фактор).

					ДП.МТІР.9500089.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		14

В таблиці 1.1 приведені моделі мультиметрів середнього класу, які були запропоновані для їх інтеграції в складі автоматизованої системи моніторингу та контролю.

Таблиця 1.1 - Рекомендовані моделі мультиметрів середнього класу (з інтерфейсами)

Модель	Інтерфейс	Особливості	Орієнтовна ціна
Brymen BM869s	USB (через адаптер)	Висока точність, логування	~250–300\$
UNI-T UT8803E	USB, RS232	SCPI-команди, інтерфейс під АСК	~300–400\$
OWON B41T+	Bluetooth	Віддалений моніторинг через додаток	~150\$
Siglent SDM3045X	USB, Ethernet, SCPI	Настільний, точність 4½ розряди	~500\$
Keysight U1233A / U1273A	Bluetooth (з адаптером)	Надійність, SCPI через адаптер	~300–600\$
PeakTech 3440	USB	Логування, базовий SCPI	~250\$

На рисунку 1.1 приведено зображення цифрового мультиметра SIGLENT SDM3045X. Даний мультиметр SIGLENT SDM3045X — це точний настільний цифровий мультиметр із розрядністю 4½, який завдяки своїм функціональним і комунікаційним можливостям добре підходить для інтеграції в автоматизовані системи вимірювань та контролю.

Цей прилад підтримує стандартні інтерфейси зв'язку, зокрема USB, LAN (Ethernet) та GPIB (через опціональний адаптер), що дозволяє підключати його до комп'ютерів, серверів або систем автоматичного тестування. Завдяки підтримці SCPI-команд (Standard Commands for Programmable Instruments) SDM3045X може бути легко запрограмований для віддаленого управління, збору даних і автоматизованого виконання вимірювань у складі стендів, лабораторних комплексів або промислових установок.

У мультиметрі реалізовано веб-інтерфейс, через який можна переглядати поточні значення, керувати режимами вимірювань та зчитувати дані без потреби в складному програмуванні. Також пристрій підтримує передачу даних у

реальному часі, що важливо для застосувань, де необхідне безперервне моніторування або реєстрація параметрів [1, 2].

Завдяки високій точності, широкому діапазону вимірювань та підтримці багатьох типів вимірювань (напруга, струм, опір, частота, температура тощо), SDM3045X може бути використаний як універсальний інструмент у різноманітних автоматизованих системах — від калібрувальних стендів до контролю якості на виробництві.



Рисунок 1.1 - Мультиметр SIGLENT SDM3045X

Інтеграція цифрових мультиметрів передбачає їх об'єднання за допомогою інтерфейсів. Особливості функціонування інтерфейсу RS-232 полягають в тому, що за його допомогою інформація передається по одній лінії послідовно, біт за бітом, використовуючи два основні сигнали: передача (TX) і прийом (RX). Інтерфейс базується на рівнях напруги ± 12 В, де позитивна напруга відповідає логічному "0", а негативна — логічній "1". Він не підтримує одночасний обмін у двох напрямках (half-duplex або full-duplex), потребує налаштування швидкості (baud rate), біта парності та кількості стоп-бітів. Його конструкція досить проста — як правило, використовується 9-контактний або 25-контактний роз'єм.

					ДП.МТІР.9500089.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		16

USB (Universal Serial Bus) — це високошвидкісний серійний інтерфейс, який забезпечує гнучке підключення численних периферійних пристроїв до комп'ютера або хоста. Основу конструкції складають чотири лінії: живлення (Vcc і GND) та диференціальна пара для передачі даних (D+ і D–). Принцип роботи базується на топології "зірки", де всі пристрої підключаються до центрального хоста через хаби. USB підтримує автоматичне виявлення пристроїв (Plug and Play), живлення периферії, а також різні режими передачі даних (Low, Full, High, Super Speed). Передача даних організована у вигляді пакетів, а зв'язок ініціюється завжди з боку хоста.

GPIO, або IEEE-488, — це паралельний інтерфейс, спеціально розроблений для підключення та керування науковими та вимірювальними приладами. Його конструкція передбачає використання 24 ліній: 8 — для передачі даних, решта — для керування (наприклад, сигналів ATN, EOI, DAV). GPIO забезпечує передачу байтів одночасно по восьми лініях (паралельно), що дозволяє досягати високої швидкості обміну даними на коротких відстанях. Всі пристрої мають унікальні адреси, і один з них виконує роль контролера, який ініціює обмін та керує шиною. Особливістю інтерфейсу є підтримка підключення до 15 пристроїв на одній шині.

Інтерфейс Ethernet призначений для передавання даних у комп'ютерних мережах і базується на пакетній комутації та підтримує як дротові, так і бездротові варіанти. Його конструкція включає фізичний рівень (кабелі типу twisted pair, оптоволокно), мережеві карти (NIC) та комутатори. Принцип роботи базується на стандарті IEEE 802.3 і передбачає передачу даних у вигляді кадрів (фреймів), які містять MAC-адреси відправника й одержувача, контрольну суму та службову інформацію. Ethernet працює за принципом CSMA/CD (Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection) у старих версіях, а сучасні реалізації використовують комутатори для повнодуплексного зв'язку без колізій. Інтерфейс дозволяє будувати масштабовані, надійні та швидкі мережі з пропускнуою здатністю від 10 Мбіт/с до 100 Гбіт/с і вище.

					ДП.МТІР.9500089.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		17

Якщо система буде працювати в специфічних умовах (цех, польові умов) важлива ударостійкість і захист. Для багатоканальних систем краще розглядати модульні мультиметри або мультиплексори (наприклад, Keysight 34970A з вхідними модулями). Для довготривалих вимірювань слід враховувати особливості енергоспоживання та нагріву корпусу.

1.2. Аналіз інтерфейсів зв'язку цифрових мультиметрів

Інтерфейси цифрових мультиметрів призначені для забезпечення зв'язку приладу з зовнішніми пристроями, зокрема комп'ютерами, контролерами, лабораторними стендами та іншими компонентами автоматизованих систем. Основне їхнє призначення — передача вимірювальних даних, дистанційне керування режимами роботи мультиметра, синхронізація з іншими пристроями та інтеграція в більш складні системи збору й аналізу інформації.

Функції інтерфейсів включають:

- передачу результатів вимірювань у цифровому вигляді для подальшої обробки або збереження;
- прийом команд керування від зовнішніх програмних або апаратних засобів (наприклад, запуск вимірювань, зміна режиму, калібрування);
- синхронізацію дій у складі багатоканальних або мультисенсорних систем;
- обмін діагностичною та службовою інформацією, наприклад, про стан приладу, помилки або статус підключення.

Інтерфейси цифрових мультиметрів можна класифікувати за такими ознаками:

За типом з'єднання:

- провідні (дротові): USB, RS-232, GPIB (IEEE-488), LAN (Ethernet).
- бездротові: Wi-Fi, Bluetooth (рідше, зазвичай у портативних мультиметрах).

					ДП.МТІР.9500089.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		18

За способом передачі даних:

- серійні інтерфейси (RS-232, USB, GPIB) — передають дані послідовно, один біт за раз.
- паралельні інтерфейси — зустрічаються рідко, зазвичай у старих або спеціалізованих пристроях.
- За призначенням:
 - локальні інтерфейси (USB, RS-232) — для підключення до одного ПК або контролера на невеликій відстані.
 - мережеві інтерфейси (LAN, Wi-Fi) — для підключення до локальної мережі або хмари, що дозволяє розміщення приладів у розподілених системах.

За рівнем підтримки стандартизованих протоколів:

- інтерфейси з підтримкою SCPI-протоколу (наприклад, USB, GPIB, LAN) — дозволяють використовувати прилад у складі стандартних програмно-апаратних рішень.
- інтерфейси з власними протоколами — характерні для дешевших або спеціалізованих приладів.

Таким чином, інтерфейси цифрових мультиметрів є критично важливою частиною їхньої функціональності в сучасних умовах, де все більшу роль відіграє автоматизація вимірювань, віддалений моніторинг, контроль та інтеграція в цифрові системи.

В таблиці 1.2 приведена інформація про порівняння інтерфейсів цифрових мультиметрів за ключовими характеристиками, яка доповнює попередній текст. Ця таблиця дозволяє швидко порівняти можливості інтерфейсів і підібрати оптимальний варіант для конкретної автоматизованої системи — наприклад, при виборі між локальним USB-з'єднанням або мережевим Ethernet-доступом у промисловому середовищі.

Наступним нашим завданням буде розгляд особливостей функціонування найбільш популярних інтерфейсів серед категорії дротові та бездротові. До

					ДП.МТІР.9500089.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		19

найбільш популярних дротових інтерфейсів слід віднести послідовні USB (топологія зірка) та CAN (топологія шина).

Таблиці 1.2 - Порівняння інтерфейсів цифрових мультиметрів за ключовими характеристиками

Інтерфейс	Тип з'єднання	Макс. відстань передачі	Швидкість обміну	Підтримка SCPI	Призначення / особливості
USB	Провідний	~5 м	Висока до 480 Мбіт/с для USB 2.0)	Так	Найпоширеніший інтерфейс для підключення до ПК; легко реалізується.
RS-232	Провідний	~15 м (можна більше з ретрансляторами)	Низька (~115 кбіт/с)	Так (частково)	Використовується у старих приладах; простий надійний протокол.
GPIB (IEEE-488)	Провідний	~20 м (до 15 пристроїв у колі)	Середня (~1 Мбіт/с)	Так	Стандартний інтерфейс; стабільна робота з великою кількістю пристроїв.
LAN (Ethernet)	Провідний	До 100 м (локальна мережа), більше з маршрутизаторами	Висока (до 100 Мбіт/с і більше)	Так	Дає змогу інтегрувати прилад у віддалені або розподілені системи; підтримує веб-інтерфейси.
Wi-Fi	Бездротовий	До 100 м (у межах покриття мережі)	Висока (~10–100 Мбіт/с, залежно від стандарту)	Може бути	Дає бездротову гнучкість; використовується в IoT-рішеннях або мобільних стендах.
Bluetooth	Бездротовий	~10–30 м	Низька–середня (~1 Мбіт/с)	Рідко	Застосовується в портативних мультиметрах для швидкого зв'язку з мобільними пристроями.

Процес фізичної передачі інформації по інтерфейсу USB (Universal Serial Bus) починається з ініціалізації з'єднання між хостом (наприклад, комп'ютером) і периферійним пристроєм (наприклад, мишею або флешкою). Коли пристрій підключається до порту USB, подається живлення і відбувається фізичне встановлення контакту через диференціальну пару дротів — D+ і D–. Структура інтерфейсу та схема підключення приведені на рисунках 1.2 та 1.3.

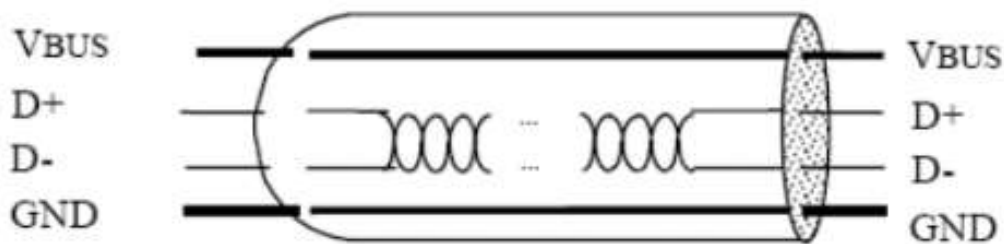


Рисунок 1.2 - USB кабель: Vbus – напруга живлення шини; D+ – додатня лінія даних; D- – від’ємна лінія даних; GND – земля.

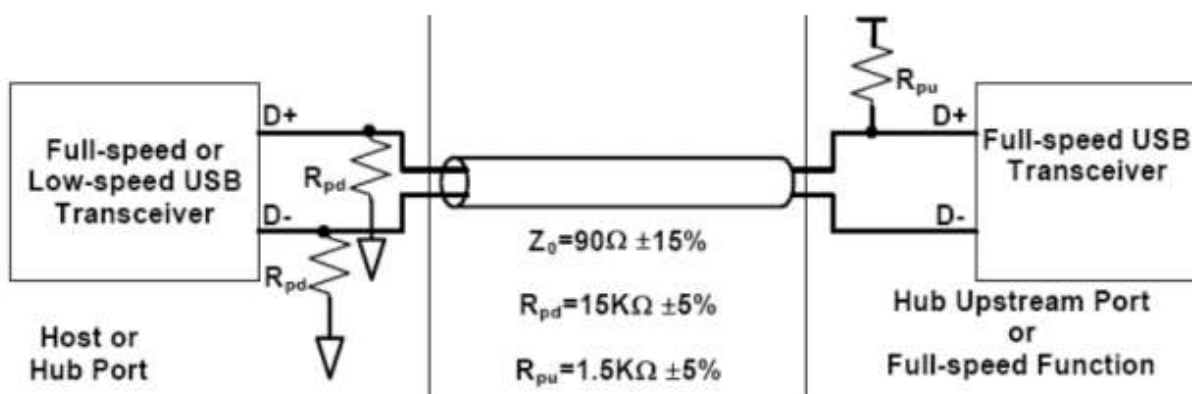


Рисунок 1.3 - Схема підключення USB-пристроїв

Хост починає передачу, посылаючи спеціальний сигнал скидання, щоб виявити новий пристрій. Потім відбувається процес синхронізації та конфігурації — визначення швидкості (Low, Full, High або SuperSpeed) і присвоєння унікальної адреси пристрою.

Фізично дані передаються у вигляді серії електричних імпульсів по лініях D+ і D-. USB використовує диференціальний сигнал, де інформація кодується у вигляді зміни напруги між цими двома лініями, що зменшує вплив електромагнітних завад. Для забезпечення синхронізації передається спеціальний синхронізаційний префікс (sync field), після якого йдуть ідентифікатор пакета (PID), адреса, дані і контрольна сума (CRC).

У момент передачі один пристрій (хост або пристрій) виступає ініціатором, а інший — приймачем. Передача відбувається у вигляді пакетів, які можуть бути даними, командами або відповідями. Після завершення кожного пакета

передбачено підтвердження прийому, наприклад, пакет АСК. Пакет АСК (від англ. *Acknowledgment* — підтвердження) в USB призначений для підтвердження успішного прийому даних.

Коли один пристрій (хост або периферійний пристрій) передає пакет даних іншому, приймач після коректного отримання пакета перевіряє його цілісність за допомогою контрольної суми (CRC). Якщо перевірка проходить успішно, приймач надсилає пакет АСК у відповідь, повідомляючи відправника, що дані отримано без помилок.

Якщо АСК не отримано (через помилку, втрату пакета або відсутність відповіді), відправник може повторити передачу. Це частина механізму надійності USB-протоколу.

Цей процес відбувається з високою швидкістю та контрольованою структурою, що дозволяє забезпечити надійну і безперервну передачу даних у цифровій формі між пристроями.

У системі CAN усі вузли (пристрої) підключені до спільної двопровідної шини, що складається з ліній CAN_H і CAN_L. Фізичне з'єднання реалізується як топологія шини, де обидві лінії проходять через усі вузли, а на кінцях шини встановлюються термінатори з опором 120 Ом для запобігання відбиттям сигналу. Усі вузли рівноправні — кожен із них може як передавати, так і приймати повідомлення.

Передача повідомлень у CAN організована у вигляді кадрів (фреймів), які мають чітку структуру та передаються послідовно у часі. Комунікація починається тоді, коли один із вузлів має потребу передати дані. Він формує повідомлення і починає передачу зі стартового біта. Цей біт є домінантним (логічний 0), і його поява сигналізує іншим вузлам про початок передачі. Принцип роботи апаратної частини інтерфейсу приведено на рисунку 1.4.

					ДП.МТІР.9500089.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						22
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

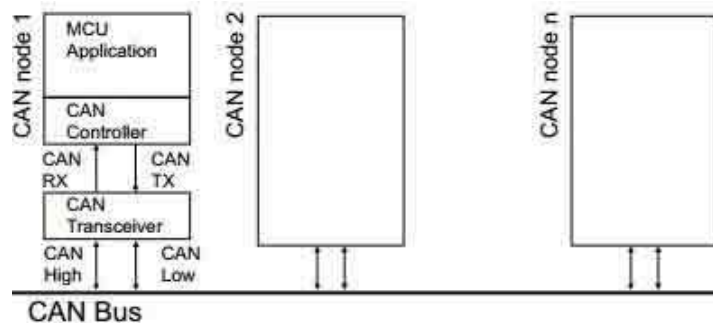


Рисунок 1.4 - Принцип роботи апаратної частини інтерфейсу CAN

Одразу після стартового біта передається ідентифікатор (ID) повідомлення. Ідентифікатор — це не адреса конкретного вузла, як у багатьох інших мережах, а ідентифікатор типу повідомлення, який також визначає пріоритет. Чим менше значення ідентифікатора, тим вищий пріоритет повідомлення. Якщо кілька вузлів починають передавати одночасно, вони здійснюють арбітраж: кожен передає ID і при цьому слухає шину. Якщо вузол виявляє, що на шині з'явився домінантний біт, коли він передав рецесивний, то він розуміє, що програв арбітраж, і припиняє передачу.

Після ідентифікатора передаються керуючі біти, які визначають формат кадру та кількість байтів у полі даних. Потім іде поле даних, яке може містити до 8 байтів корисної інформації. За полем даних передається CRC (контрольна сума) для перевірки цілісності повідомлення. Далі йде АСК-поле — у ньому всі вузли, які правильно отримали повідомлення, передають домінантний біт, підтверджуючи успішний прийом. Якщо ніхто не підтвердив — відправник повторить передачу. Нарешті, передається кінець кадру, що складається з кількох рецесивних бітів.

Усі вузли слухають шину постійно, і якщо ідентифікатор повідомлення відповідає потрібному типу даних, вони зчитують і обробляють інформацію. Таким чином, замість прямої адресації, CAN використовує фільтрацію за ID, а повідомлення може бути отримане кількома адресатами одночасно.

Після завершення кадру шина знову переходить у стан очікування (рецесивний рівень), і будь-який інший вузол може ініціювати нову передачу.

До найбільш популярних бездротових інтерфейсів слід віднести Wi-Fi та Bluetooth. Враховуючи основний недолік інтерфейсу Bluetooth – коротка відстань передачі повідомлень, розглянемо особливості використання інтерфейсу Wi-Fi [8, 9].

Апаратна реалізація Wi-Fi базується на спеціалізованих компонентах, які забезпечують бездротову передачу даних. Основним елементом є Wi-Fi-модуль, що включає радіочастотний приймач і передавач, які працюють у діапазонах частот 2.4 ГГц або 5 ГГц (а в сучасних стандартах, таких як Wi-Fi 6E, також 6 ГГц). Цей модуль зазвичай інтегрований у чип, наприклад, від компаній Qualcomm, Broadcom чи Intel, і містить антену для прийому та передачі сигналів. Антена може бути вбудованою або зовнішньою, залежно від пристрою, наприклад, смартфона, ноутбука чи роутера. У роутерах також є процесор для обробки даних, пам'ять для зберігання прошивки та інтерфейси (Ethernet або USB) для підключення до мережі.

Принцип передачі інформації в Wi-Fi ґрунтується на використанні радіохвиль для обміну даними між пристроями. Дані, які потрібно передати, кодуються в цифровому вигляді та модулюються на радіочастотний сигнал за допомогою методів, таких як QAM (квадратурна амплітудна модуляція). Сигнал передається через повітря, а приймач на іншому пристрої демодулює його, перетворюючи назад у цифрові дані. Wi-Fi використовує стандарти IEEE 802.11 (наприклад, 802.11n, 802.11ac, 802.11ax), які визначають швидкість, канали та методи доступу до середовища, такі як CSMA/CA (множинний доступ із контролем несучої та уникненням колізій). Для підвищення ефективності застосовуються технології MIMO (багатоканальний вхід-вихід), які дозволяють одночасно передавати кілька потоків даних через різні антени, та OFDMA (ортогональний частотний поділ), що оптимізує використання частотного спектра.

Передача даних захищається шифруванням, наприклад, за протоколами WPA2 або WPA3, що забезпечує конфіденційність і безпеку. Wi-Fi також підтримує мережеву взаємодію через точки доступу (роутери), які координують

					ДП.МТІР.9500089.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		24

обмін даними між пристроями в локальній мережі та підключенням до Інтернету. Таким чином, Wi-Fi забезпечує швидке, гнучке та безпечне бездротове з'єднання.

Таким чином, в даному розділі було здійснено аналіз особливостей використання дротових та бездротових інтерфейсів.

1.3. Протоколи передачі даних

Передача інформації за протоколом MODBUS реалізується за принципом запиту та відповіді між двома типами пристроїв: ведучим (master) і підлеглим (slave). Зазвичай ведучим є контролер або комп'ютер, який ініціює обмін, а підлеглим — пристрій, наприклад сенсор або модуль виконавчого механізму, що відповідає на запит.

На початку обміну ведучий пристрій налаштовує параметри зв'язку, такі як швидкість передачі, кількість бітів, парність та інші фізичні характеристики з'єднання. Після цього він формує кадр запиту, у якому вказує адресу пристрою, код функції (наприклад, читання або запис регістрів), адресу цільового регістру, кількість даних, а також додає контрольну суму CRC для перевірки цілісності.

Сформований запит передається по спільній шині зв'язку, наприклад RS-485, до всіх підлеглих пристроїв. Кожен підлеглий отримує цей запит, але лише той, чия адреса збігається із вказаною у запиті, реагує на нього. Такий пристрій перевіряє правильність запиту, а потім виконує вказану операцію, наприклад зчитує дані з пам'яті [7].

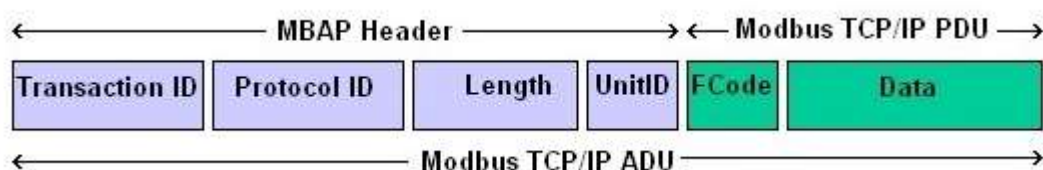
Після цього підлеглий формує відповідь, в якій міститься адреса пристрою, код виконаної функції, запрошені дані та знову ж таки контрольна сума CRC. Ця відповідь передається назад до ведучого пристрою, який перевіряє її на помилки, обробляє отриману інформацію і, за потреби, ініціює наступний обмін.

					ДП.МТІР.9500089.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		25

Таким чином, комунікація між пристроями за протоколом MODBUS є послідовною, контрольованою і чітко структурованою, що дозволяє надійно передавати дані навіть у складних промислових умовах.

Start	Address	Function	Data	LRC	End
1 char :	2 chars	2 chars	0 up to 2x252 char(s)	2 chars	2 chars CR,LF

a)



б)

Рисунок 1.5 – Структура повідомлення по протоколу MODBUS для дротових інтерфейсів -а) та бездротових – б)

Передача інформації за протоколом SCPI (Standard Commands for Programmable Instruments) відбувається у вигляді текстового обміну командами між комп'ютером або контролером, який виконує роль передавача, та вимірювальним приладом, що є приймачем. Такий протокол активно використовується в лабораторній практиці та промислових вимірюваннях, зокрема для керування осцилографами, мультиметрами, генераторами сигналів та іншими високоточними електронними пристроями. Команди SCPI мають зрозумілу ієрархічну текстову форму, і завдяки цьому протокол є надзвичайно зручним для автоматизованих систем.

Перед початком обміну даними контролер встановлює фізичне з'єднання з приладом через відповідний інтерфейс, наприклад USB, Ethernet, GPIB або послідовний порт. Після встановлення з'єднання комп'ютер формує та надсилає команду у вигляді звичайного тексту — наприклад, *IDN?, яка використовується для отримання ідентифікаційної інформації про пристрій. Прилад, у свою чергу,

приймає цю команду, розпізнає її зміст і формує відповідь, наприклад у вигляді рядка з найменуванням виробника, моделі та версії прошивки.

Якщо контролер надсилає команду, яка містить запит на вимірювання, наприклад MEASure:VOLTage?, то прилад виконує вимірювання напруги і повертає числове значення у вигляді тексту. У випадку команд, які змінюють стан пристрою (тобто не містять знаку питання), прилад просто виконує дію і не надсилає відповіді, якщо це не передбачено.

Весь процес обміну є послідовним: комп'ютер надсилає одну або кілька команд підряд, прилад виконує їх по черзі та повертає відповіді. Якщо обмін містить помилку, наприклад некоректно сформовану команду, прилад повідомляє про це за допомогою стандартного повідомлення або коду помилки. Отримані відповіді контролер зчитує, обробляє і, за потреби, зберігає або виводить на екран.

Після завершення передачі команд з'єднання може бути закрито або залишено активним для наступних запитів. Завдяки простоті синтаксису та широкій підтримці, SCPI став одним із найзручніших інструментів для реалізації гнучкого і зрозумілого програмного керування вимірювальними приладами.

Контролер, що працює з приладами через SCPI-протокол, містить центральний обчислювальний блок, який зазвичай представлений мікропроцесором або мікроконтролером. Саме він відповідає за обробку SCPI-команд, формування запитів, аналіз відповідей і логіку керування пристроями. Цей процесор також може виконувати функції буферизації даних та керування потоками вхідної й вихідної інформації.

Для забезпечення зв'язку з приладами контролер обов'язково має інтерфейсні модулі зв'язку. Залежно від реалізації, це можуть бути порти USB, Ethernet, GPIB (IEEE-488) або UART/RS-232. Ці інтерфейси реалізовані або апаратно, або за допомогою додаткових чипів-перетворювачів, які забезпечують сумісність з різними фізичними стандартами.

Важливим компонентом контролера є блок пам'яті, що включає постійну пам'ять (наприклад, Flash або ROM) для зберігання прошивки із реалізацією

					ДП.МТІР.9500089.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		27

SCPI-команд, а також оперативну пам'ять (RAM) для тимчасового зберігання команд, відповідей та змінних у процесі виконання програм.

Контролер також має систему синхронізації — генератор тактових імпульсів, яка забезпечує стабільну роботу процесора та інших цифрових схем. Крім того, у складі пристрою можуть бути індикатори стану (світлодіоди), кнопки керування, а іноді й екран для відображення повідомлень або параметрів.

Протоколи MODBUS і SCPI мають суттєві відмінності у призначенні, структурі та можливостях, що впливає на доцільність їх використання в різних системах. MODBUS — це простий, переважно бінарний протокол, який історично використовується у промислових системах автоматизації для обміну даними між контролерами та виконавчими пристроями. Його основна функція — зчитування або запис значень до певних регістрів, тож він добре підходить для роботи з датчиками або простими пристроями, які не потребують складного керування.

SCPI, натомість, є текстовим протоколом, спеціально створеним для керування та інтеграції вимірювальних приладів, таких як цифрові мультиметри, генератори сигналів, осцилографи та інше лабораторне обладнання. Команди SCPI є уніфікованими, ієрархічно структурованими, легко читаються та дозволяють виконувати як прості, так і складні вимірювальні сценарії. Цей протокол дозволяє не лише ініціювати вимірювання, а й конфігурувати прилад, зчитувати результати, проводити автокалібрування чи перевірку статусу пристрою — усе це у вигляді інтуїтивно зрозумілих текстових запитів.

У той час як MODBUS може використовуватися з мультиметрами в окремих випадках, його функціональність у цьому контексті суттєво обмежена і часто вимагає додаткового трактування регістрів. SCPI ж, навпаки, є галузевим стандартом для мультиметрів і підтримується провідними виробниками. Крім того, SCPI краще підходить для реалізації автоматизованих систем керування, оскільки забезпечує повний доступ до функцій приладу, з високим рівнем контролю і точності.

					ДП.МТІР.9500089.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		28

Таким чином, для побудови автоматизованої системи інтеграції цифрових мультиметрів доцільно обрати саме SCPI. Цей протокол забезпечить максимальну функціональність, зручність програмного керування та сумісність із широким спектром сучасних вимірювальних приладів.

1.4 Обґрунтування вибраного напрямку досліджень та постановка задачі

Метою цього проєкту є створення автоматизованої системи для інтеграції цифрових мультиметрів, яка забезпечить централізоване керування вимірюваннями, збором даних, їх обробкою, а також калібруванням приладів. Система буде використовувати протокол для взаємодії з мультиметрами, а для передачі даних між приладами і сервером будуть застосовані контролери з бездротовим Wi-Fi-зв'язком.

Для реалізації цієї системи слід обґрунтувати вибір мультиметрів, що підтримують протоколи передачі даних. Мультиметри пропонується згрупувати в локальні групи, які фізично розміщені поряд. Для кожної такої групи передбачається використання контролера, який буде виступати проміжною ланкою між приладами та центральним сервером. Сервер, в свою чергу, буде відповідати за обробку, зберігання і керування даними.

Одним із перших завдань є інтеграція мультиметрів у локальні групи. Кожна група приладів буде підключена до ESP32, який зможе керувати ними через SCPI-протокол, забезпечуючи адресне управління кожним мультиметром.

Збір даних буде здійснюватися регулярно або за вимогою через SCPI-команди. Контролер збиратиме вимірювання з кожного мультиметра і передаватиме їх на сервер, де ці дані будуть оброблятися. При цьому передача даних здійснюватиметься через Wi-Fi, і буде використано один із протоколів, таких як MQTT, HTTP або WebSocket, залежно від потреб системи.

Центральний сервер виконуватиме функції зберігання і обробки даних. Він буде вибирати найефективніше сховище для даних (наприклад, бази даних для

					ДП.МТІР.9500089.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						29
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

часових рядів або SQL/NoSQL) і надавати можливість для фільтрації та аналізу отриманих результатів.

Однією з ключових складових системи є реалізація процедури калібрування мультиметрів. Це передбачає автоматизоване калібрування приладів за допомогою еталонних джерел або опорів, з подальшим фіксуванням результатів та відхилень. Також буде забезпечено контроль за періодичністю калібрування, що дозволить вчасно нагадувати користувачам про необхідність його виконання.

Для зручності користувачів передбачено розробку інтерфейсу, який дозволить моніторити стан приладів у реальному часі, переглядати дані про калібрування та виконувати необхідні налаштування для роботи мультиметрів.

Після реалізації цієї системи, користувачі отримають можливість централізовано керувати мультиметрами, забезпечуючи автоматизований збір та обробку вимірювальних даних. Всі отримані показники будуть зберігатися у базі даних для подальшого аналізу і використання, а також для створення звітів. Система дозволить виявляти відхилення в роботі приладів, виконувати калібрування автоматично або за запитом, а також надавати детальні графіки й звіти в реальному часі через веб-інтерфейс.

Це дозволить суттєво підвищити ефективність моніторингу приладів і забезпечити їх стабільну роботу, знижуючи ризики помилок і підвищуючи точність вимірювань.

					ДП.МТІР.9500089.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						30
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

2. ПРОЕКТУВАННЯ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ КОНТРОЛЮ І МОНІТОРИНГУ

2.1. Структура автоматизованих систем збору та обробки інформації

В розділі 1.1 було коротко розглянуто питання типових архітектури автоматизованих систем. Враховуючи, що завданням проекту є інтеграція цифрових мультиметрів, а це вимірювання напруги, струму та опору, то в подальшому при проектуванні як системи, так і її компонентів будемо вважати, що результатом інтеграції даних приладів має бути зібрана та оброблена даного виду інформація.

Автоматизовані системи моніторингу та контролю електричних параметрів, зокрема SCADA-системи, можуть реалізовуватись за різними архітектурними принципами, серед яких найпоширенішими є централізована, ієрархічна та децентралізована структури. Кожна з них має свої особливості, які впливають на вибір апаратного, програмного та математичного забезпечення, а також визначають доцільність їх використання в певних умовах [3-5].

Централізована архітектура передбачає наявність одного центрального вузла — сервера або головного контролера, до якого підключаються всі сенсори та виконавчі пристрої. Уся обробка інформації, прийняття рішень і керування відбуваються саме в цьому центрі. Завдяки такій простій структурі значно спрощується процес розробки системи, її впровадження та технічне обслуговування. Вартість такої системи порівняно невисока, адже периферійні пристрої можуть бути простими і не потребують власної обчислювальної потужності. Програмне забезпечення розміщується на одному сервері, що полегшує його оновлення та централізоване адміністрування. Математичні моделі, включаючи фільтрацію, діагностику та прогнозування, також реалізуються на центральному рівні, що дає змогу використовувати потужні аналітичні засоби. Особливою перевагою є простота масштабування системи, яка дозволяє без особливих труднощів інтегрувати додаткові пристрої – рисунок 2.1.

					ДП.МТІР.9500089.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						31
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		



Рисунок 2.1 – Структура централізованої автоматизованої системи

Проте така структура має обмеження — вона є вразливою до відмови центрального вузла, що може призвести до зупинки всієї системи. Цей підхід найкраще підходить для локальних об'єктів із невеликою кількістю вузлів, наприклад, лабораторних установок, підстанцій або окремих технологічних ділянок.

Ієрархічна структура будується за принципом розподілу функцій між різними рівнями — нижнім (сенсори та виконавчі механізми), середнім (локальні контролери або RTU) та верхнім (сервери SCADA або операторські станції). Така система дозволяє частково розвантажити центральний вузол, розподіливши логіку керування та обробки даних між різними рівнями. Програмне забезпечення в ієрархічних системах зазвичай має модульну структуру, де кожен рівень виконує свою функцію — від збору первинних даних до аналізу трендів і прийняття стратегічних рішень. Це дає змогу реалізовувати складні алгоритми з високим ступенем надійності та швидкою реакцією на події. Ієрархічна структура є оптимальною для об'єктів середнього та великого масштабу, з розгалуженою структурою і потребою у зональному резервуванні, наприклад, у

системах енергозабезпечення підприємств або в розподілених мережах –
 рисунок 2.2.

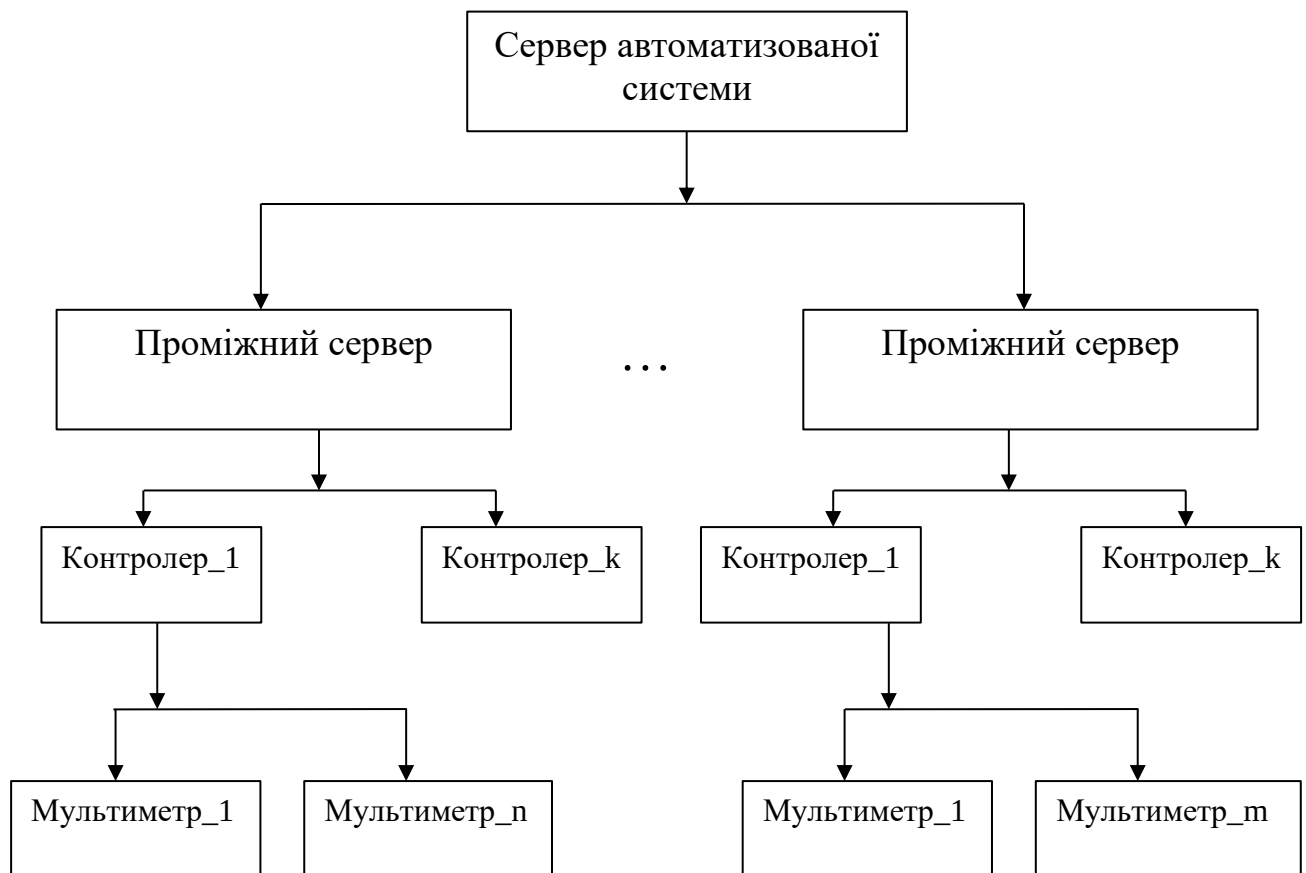


Рисунок 2.2 - Ієрархічна структура автоматизованої системи

На відміну від централізованої та ієрархічної, децентралізована структура ґрунтується на використанні автономних вузлів, кожен з яких має власний обчислювальний блок, локальну логіку керування і здатність приймати рішення незалежно від інших елементів системи. У таких системах вузли можуть взаємодіяти між собою напряму, без обов'язкового звернення до центрального сервера. Це забезпечує дуже високу відмовостійкість: вихід з ладу одного вузла не впливає на функціонування інших. Крім того, локальна обробка даних дозволяє мінімізувати затримки в реагуванні, що особливо актуально для систем реального часу. Проте децентралізована архітектура є складною в реалізації, потребує високої обчислювальної потужності кожного вузла та складного механізму синхронізації між пристроями. Вона є доцільною для великих,

географічно розподілених систем, таких як розумні електромережі (smart grid), мікромережі або системи Інтернету речей у сфері енергетики.

Порівнюючи ці підходи (таблиця 2.1), можна зробити висновок, що централізована архітектура є найбільш доцільною для невеликих, локалізованих систем із відносно стабільною топологією і жорсткими вимогами до централізованого управління.

Таблиця 2.1 - Порівняльна характеристика структур автоматизованих систем

Критерій	Централізована архітектура	Ієрархічна архітектура	Децентралізована архітектура
Апаратне забезпечення	Центральний сервер, прості сенсори	Контролери/RTU, сенсори, SCADA-сервер	Інтелектуальні вузли з локальною обробкою
Програмне забезпечення	Єдина платформа на сервері	Розподілене між рівнями	Децентралізовані програмні модулі на кожному вузлі
Математичне забезпечення	Центральна обробка моделей і прогнозів	Моделі частково реалізовані на різних рівнях	Повна локалізація алгоритмів на вузлах
Реакція на відмову	Високий ризик зупинки системи при збої сервера	Часткове резервування, локальна автономія	Висока відмовостійкість, автономне функціонування вузлів
Масштабованість	Обмежена	Висока	Дуже висока
Затримка реагування	Може бути значною при високому навантаженні	Помірна	Мінімальна
Складність впровадження	Низька	Середня	Висока
Вартість системи	Низька в початковій реалізації	Середня	Висока (через інтелектуальні вузли)
Оптимальні сфери застосування	Невеликі об'єкти, лабораторії, підстанції	Енергосистеми підприємств, середні й великі об'єкти	Smart Grid, IoT-мережі, мікромережі, автономні об'єкти

Її простота, низька вартість і уніфікованість роблять її оптимальним рішенням для задач із невисокими вимогами до масштабованості, але з потребою в централізованому зборі та обробці даних.

2.2. Обґрунтування та проектування вимірювальних підсистем

Для розробки автоматизованої системи вимірювань електричних параметрів з бездротовою передачею результатів важливо обґрунтовано підійти до вибору мультиметрів, що інтегруються в таку систему. Основними критеріями відбору є технічна сумісність, метрологічна точність, надійність і функціональна придатність приладів до роботи в автоматизованому середовищі.

Перш за все, мультиметри мають підтримувати сучасні інтерфейси обміну даними, зокрема USB, Ethernet, RS-232 або бездротові протоколи, як-от Wi-Fi чи Bluetooth. Це забезпечує можливість інтеграції приладу у розподілену систему збору даних і передачу результатів вимірювань без необхідності фізичного підключення до кожного пристрою. Особливо важливою є підтримка відкритих стандартів, таких як SCPI, що дозволяє дистанційно керувати приладом та автоматизувати процеси збору й обробки вимірювань за допомогою програмного забезпечення (наприклад, Python, LabVIEW або MATLAB).

Метрологічні характеристики приладу мають відповідати вимогам до точності вимірювання електричних параметрів — напруги, струму, опору тощо. Тому обираються мультиметри з достатньо високим класом точності, малою базовою похибкою та високою роздільною здатністю, наприклад 5½ або 6½ розрядів. Важливо також враховувати стабільність вимірювань при зміні температури або тривалому використанні, адже від цього залежить надійність системи в цілому [6].

Для ефективної роботи автоматизованої системи бажано, щоб мультиметр мав вбудовану функцію реєстрації вимірювань (data logging), що дозволяє зберігати результати з часовими мітками. Це необхідно для побудови трендів, виявлення відхилень і подальшої аналітики.

Функціональність мультиметра також є критичним фактором. Окрім базових вимірювань електричних параметрів, важливою може бути підтримка вимірювання температури за допомогою термопар, тесту діодів чи перевірки

					ДП.МТІР.9500089.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		35

безперервності. Наявність таких функцій розширює можливості системи й дозволяє контролювати не лише електричні, а й супутні параметри.

Не менш важливою є можливість калібрування мультиметра відповідно до вимог метрологічних служб. Прилади мають забезпечувати простежуваність результатів вимірювань до державних або міжнародних еталонів, що критично для відповідності технічним регламентам і стандартам. Бажаною є наявність сертифікатів калібрування або підтримка калібрування за ISO/IEC 17025.

Також слід враховувати надійність обладнання, тривалість гарантії, доступність сервісної підтримки та наявність документації. Для довготривалої експлуатації у виробничих або лабораторних умовах варто обирати мультиметри з перевіреною репутацією, які застосовуються в аналогічних задачах автоматизованих вимірювальних систем.

Нарешті, вибір повинен враховувати не лише вартість приладу, а й загальну вартість володіння (TCO), включаючи витрати на інтеграцію, обслуговування, калібрування та навчання персоналу. Такий системний підхід дозволяє створити надійну, точну та зручну у використанні автоматизовану систему вимірювань із можливістю бездротового передавання результатів у локальну мережу або хмарне середовище.

Даним вимогам відповідає розглянутий в розділі 1.1 мультиметр SIGLENT SDM3045X загалом відповідає вимогам, які висуваються до приладів для автоматизованої системи вимірювання електричних параметрів із бездротовою передачею даних. Він має роздільну здатність $4\frac{1}{2}$ розряди (66 000 відліків), що є достатнім для широкого кола прикладних задач, де не вимагається надвисока точність. Базова похибка вимірювання становить $\pm 0.025\%$, що забезпечує прийнятний рівень точності для контролю напруги, струму, опору й частоти.

Однією з ключових переваг цього мультиметра є наявність сучасних інтерфейсів — USB, LAN, RS-232 — що дозволяють легко інтегрувати прилад у програмно-керовані автоматизовані системи. Він підтримує протоколи SCPI, а також має драйвери для програм, таких як LabVIEW, MATLAB і Python, що

					ДП.МТІР.9500089.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		36

полегшує написання сценаріїв для автоматичного збору, обробки та передачі вимірювальних даних.

Мультиметр також підтримує функцію журналювання даних: зберігання результатів на USB-накопичувач або передача в реальному часі через мережеві інтерфейси. Це особливо важливо для побудови безперервного моніторингу або створення архіву вимірювань.

Проте, є деякі обмеження. SIGLENT SDM3045X не має вбудованої підтримки бездротових інтерфейсів, таких як Wi-Fi чи Bluetooth. Тому для реалізації бездротової передачі даних у системі потрібно використовувати зовнішні рішення — наприклад, проміжний шлюз у вигляді комп'ютера, маршрутизатора або одноплатного мікрокомп'ютера з LAN-інтерфейсом.

SIGLENT SDM3045X є хорошим вибором для побудови автоматизованої вимірювальної системи, особливо у випадках, коли потрібна середня точність, надійність, зручна інтеграція з програмним забезпеченням та помірна вартість приладу. За умови правильної побудови архітектури системи з використанням зовнішніх модулів для бездротової передачі, цей мультиметр цілком може стати ефективною складовою автоматизованої платформи збору електричних вимірювальних даних.

Для запропонованої в розділі 2.1 централізованої архітектури автоматизованої системи інтеграції мультиметрів пропонується використати в ролі проміжної ланки мікроконтролер ESP32, який виконує функції контролера для інтеграції декількох мультиметрів SIGLENT SDM3045X, що розміщені просторово поряд. Зв'язок між ESP32 та цими вимірювальними приладами пропонується здійснюється через дротові інтерфейси, що забезпечує надійність обміну даними, мінімальні затримки та стійкість до зовнішніх завад.

Вибір дротового інтерфейсу для передачі вимірювальних даних від SIGLENT SDM3045X до ESP32 ґрунтується на трьох головних потребах автоматизованої системи: гарантії стабільності зв'язку, високій пропускну здатності та передбачуваності затримок при обміні даними.

					ДП.МТІР.9500089.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						37
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Динамічні процеси в електричних колах, зокрема швидкі зміни напруги та струму, вимагають опитування мультиметра з підвищеною частотою. Дані режими можна забезпечити за допомогою дротових інтерфейси (Ethernet або USB High-Speed), що мають високу пропускну здатність та фіксовані часові інтервали між відправкою запиту й отриманням відповіді. Це дає змогу запланувати циклічні SCPI-запити із заданим кроком часу.

По-друге, дротове середовище більш стійке до електромагнітних та радіочастотних перешкод, що особливо актуально в промислових чи лабораторних умовах з великою кількістю силового обладнання. Захищений Ethernet-кабель або USB-шлейф із екраном мінімізує шум на лінії та гарантує цілісність даних, що критично при вимірюванні малих сигналів струму чи напруги.

Таким чином, використання Ethernet або USB High-Speed між мультиметром і ESP32 забезпечує високу швидкодію, детермінованість обміну та надійність передавання результатів вимірювань, що є ключовими для точного та оперативного контролю динамічних процесів в електричних колах [7].

ESP32 у варіанті S2/S3 — це сучасний мікроконтролер із двома ядрами Tensilica LX6, вбудованим Wi-Fi/Bluetooth і підтримкою USB Host, що відкриває прямий шлях до підключення периферійних пристроїв, зокрема мультиметрів SIGLENT SDM3045X – рисунок 2.3. ролі USB Host, ESP32 може «бачити» SDM3045X як USB Device і ініціювати обмін даними безпосередньо по USB кабелю, обходячись без додаткових адаптерів чи перетворювачів рівнів.



Рисунок 2.3 – Мікроконтролер ESP32 S3

Після фізичного з'єднання по USB кабелю ESP32 проводить так звану «енумерацію» приладу, підвантажує необхідні драйвери USB TMC (Test & Measurement Class) і встановлює канал для обміну SCPI-командами у вигляді ASCII-рядків. У цьому режимі ESP32 надсилає запити типу MEAS:VOLT:DC? чи MEAS:CURR:DC?, після чого SDM3045X миттєво записує результат у свій внутрішній буфер USB і відправляє назад на запит контролера.

Інтервал між відправкою команди та отриманням відповіді надійно фіксується на рівні мікроконтролера: зазвичай це десятки мілісекунд, що дозволяє організувати серії замірів із частотою десятки–сотні герц. ESP32 парсить отримані ASCII-рядки, перетворює їх у числові значення і може виконувати попередню обробку: фільтрацію шумів, усереднення чи перевірку діапазонів. Саме такою архітектурою забезпечується детермінований та безшовний потік даних від мультиметра до логіки контролера.

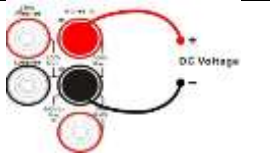
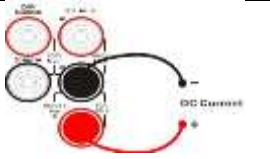
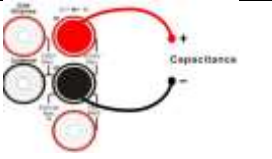
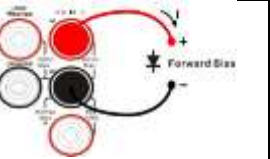
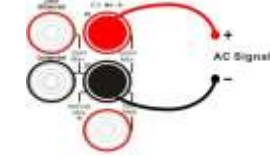
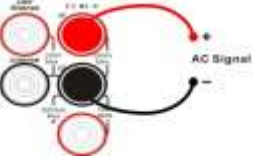
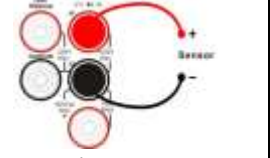
Далі, після потрібної квантизації та збирання пакетів даних, ESP32 передає оброблені результати на центральний сервер у хмарі через Wi-Fi: він формує HTTP-запит або публікує повідомлення в MQTT-брокер. Таким чином, поєднання USB Host у ESP32 та високошвидкісного USB кабелю гарантує стабільний і швидкий дірект-канал для опитування SIGLENT SDM3045X, а вбудований бездротовий інтерфейс відкриває шлях для масштабування мережі та віддаленого моніторингу.

Такий підхід дозволяє уникнути перешкод, характерних для бездротових технологій у вимірювальному контурі, й водночас зберігає переваги бездротової передачі даних на верхній рівень системи. Крім того, використання ESP32 як проміжного вузла дає змогу реалізувати локальну буферизацію даних, попередню обробку, перевірку коректності та адаптацію формату даних під вимоги серверної частини системи [8-9].

Для реалізації можливості підключення мультиметра до багатьох ділянок електричної схеми (наявність функцій вимірювання 8 параметрів – таблиця 2.1) розробимо схему аналогового комутатора, який під управлінням контролера буде здійснювати відповідних аналогових сигналів.

					ДП.МТІР.9500089.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						39
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Таблиця 2.1 – Схеми підключення виводів мультиметра SIGLENT SDM3045X до елементів електричного кола (верхній червоний вхід позначимо А, а нижній В)

 Постійна напруга	 Постійний струм	 Ємність	 Тестування діодів
 Частота	 Період сигналу	 Пошук обриву ел. схеми	 Вимірювання опору

Для моделювання електричної схеми аналогового комутатора використаємо ППП Multisim. NI Multisim 14 — це програмне забезпечення для схемотехнічного моделювання та аналізу електронних схем. Воно забезпечує зручне середовище для побудови, верифікації та симуляції аналогових, цифрових та змішаних схем. Multisim 14 має велику бібліотеку компонентів та інтегрується з іншими продуктами National Instruments, зокрема NI LabVIEW. Програма підтримує навчання та професійне проєктування, дозволяючи проводити аналізи за допомогою різних методів, таких як аналіз постійного струму, змінного струму, перехідних процесів

Схема аналогового комутатора, який передбачає підключення 8 вхідних сигналів в різних точках електричної схеми, розроблена в середовищі Multisim 14 і приведена на рисунку 2.4.

Таким чином, автоматизоване дистанційне вимірювання в кількох точках схеми досягається за допомогою поєднання:

- зовнішнього комутатора, що подає сигнали з різних точок схеми на вхід мультиметра,

- програмного керування SDM3045X для перемикання режимів вимірювання відповідно до параметрів вхідного сигналу (напруга, струм, частота тощо),
- та за потреби — використання тригерного входу для синхронізації вимірювання з подіями в системі.

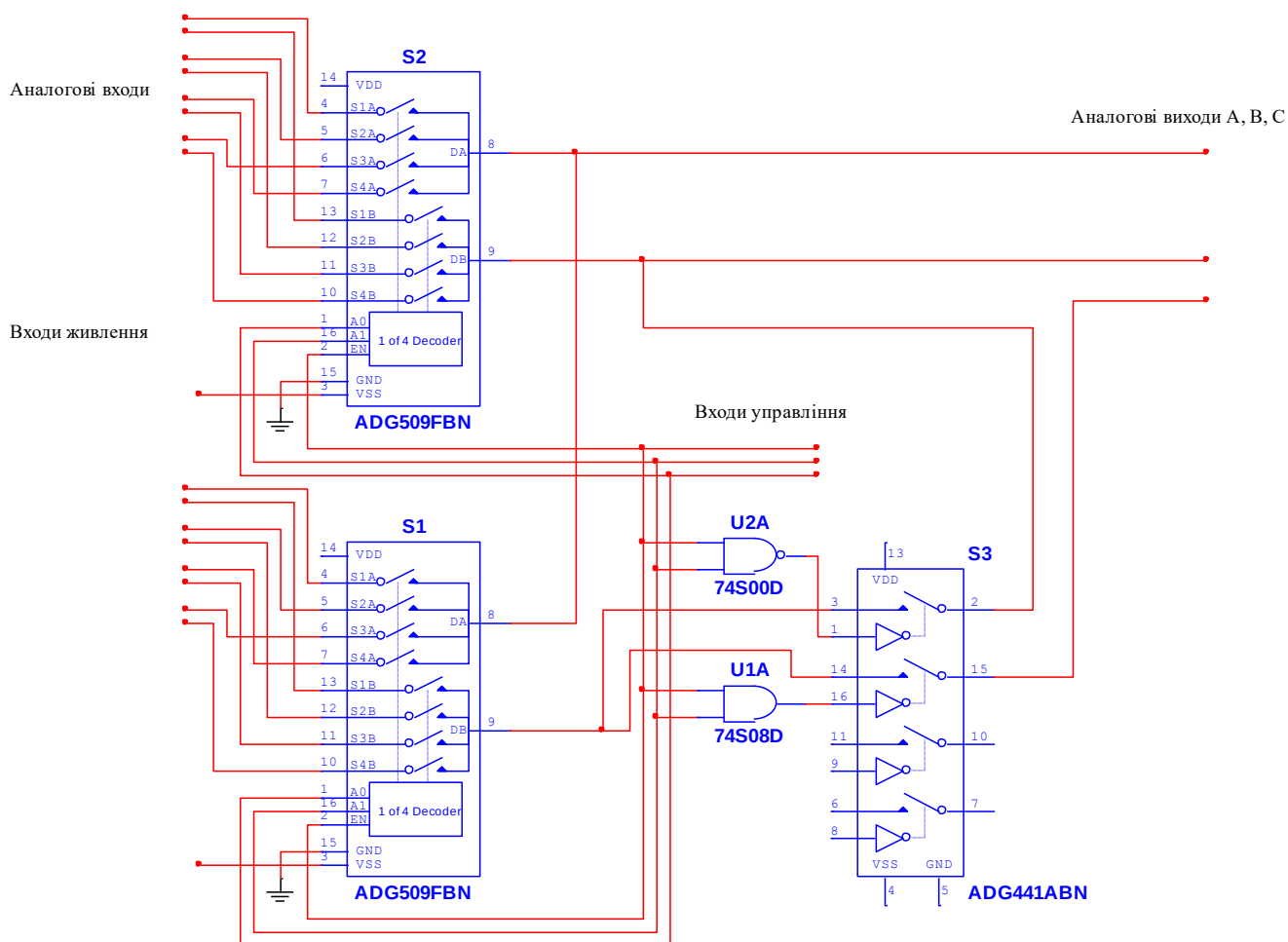


Рисунок 2.4 – Схема аналогового комутатора

Цей підхід дозволяє реалізувати повністю безконтактне і гнучке вимірювання в системах вимірювання електричних параметрів з метою тестування, діагностики або експлуатаційного моніторингу електронних пристроїв.

2.3. Особливості збору та обробки вимірювальних даних (опис механізмів підключення мультиметрів до ESP32 та їх опитування)

Для цього він оснащений кількома інтерфейсами, що відповідають промисловим стандартам. Користувач може керувати мультиметром не лише вручну через передню панель, а й за допомогою комп'ютера або мікроконтролера завдяки підтримці команд SCPI. Ці команди дають змогу програмно змінювати режими вимірювання, запускати процес зчитування, а також отримувати числові результати вимірів.

Основними засобами зв'язку приладу є інтерфейси LAN, RS-232 і USB. Через порт Ethernet можна встановлювати TCP-з'єднання та надсилати команди у вигляді текстових запитів. Прилад підтримує сучасні протоколи обміну, зокрема VXI-11 і LXI, що полегшує його інтеграцію в автоматизовані вимірювальні системи. Таке з'єднання зручно реалізується, якщо ESP32 або проміжний пристрій підтримує Ethernet-зв'язок і має відповідний мережевий інтерфейс.

Найбільш простим і надійним способом підключення мультиметра до ESP32 є використання послідовного порту RS-232. Оскільки ESP32 працює з логічними рівнями 3.3 В, а стандарт RS-232 передбачає ± 12 В, між ними потрібно встановити перетворювач рівнів, наприклад, MAX3232. Через такий адаптер ESP32 може безпосередньо надсилати SCPI-команди до мультиметра та отримувати відповіді у вигляді текстових рядків. Це забезпечує стабільний і простий обмін інформацією, який легко реалізувати навіть без операційної системи.

Хоча мультиметр має USB-порт, його використання у зв'язку з ESP32 є обмеженим, оскільки контролер не підтримує режим USB-хоста без додаткових апаратних модулів. Тому USB більше підходить для підключення до персонального комп'ютера або іншого пристрою з повноцінною підтримкою USB-хосту. У випадку, коли Ethernet також не використовується, саме через RS-232 ESP32 найзручніше отримуватиме дані від мультиметра, оброблятиме

					ДП.МТІР.9500089.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		42

результати та використовуватиме їх для подальшої обробки або передавання у хмару рисунок 2.5.



Рисунок 2.5 – Задня панель мультиметра, що забезпечує можливість дистанційного управління

На задній панелі мультиметра SIGLENT SDM3045X розташовані основні апаратні інтерфейси, які забезпечують як підключення до систем автоматизації, так і електроживлення приладу. Ці елементи дозволяють інтегрувати мультиметр у вимірювальні стенди, лабораторні комплекси або використовувати його в автономних сценаріях із віддаленим керуванням.

Центральним елементом підключення є термінали вимірювального входу, які дублюють ті, що знаходяться на фронтальній панелі. Вони призначені для підключення сигналів у 2- або 4-провідній схемі, зокрема при точних вимірюваннях опору. Це зручно для стаціонарних або автоматизованих вимірювальних стендів, де підключення здійснюється ззаду для зручнішої організації кабелів.

Поруч із вимірювальними входами розміщено послідовний порт RS-232, виконаний у вигляді стандартного 9-контактного роз'єму типу DB9. Через цей порт можна організувати простий дротовий зв'язок з мікроконтролерами або комп'ютерами для дистанційного керування приладом за допомогою SCPI-команд. Порт підтримує типову конфігурацію UART-зв'язку та є найпростішим для інтеграції з контролерами типу ESP32, за умови використання перетворювача рівнів сигналу.

					ДП.МТІР.9500089.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		43

Ще один важливий інтерфейс — це LAN-порт, що має вигляд стандартного мережевого роз'єму RJ45. Цей порт дозволяє підключити мультиметр до локальної мережі та забезпечує повноцінне дистанційне керування приладом по протоколу TCP/IP. За його допомогою користувач може надсилати SCPI-команди з будь-якого мережевого пристрою, включаючи ПК або мікроконтролер із модулем Ethernet. Підтримка протоколів LXI та VXI-11 робить цей інтерфейс зручним для лабораторних і виробничих систем.

Також на задній панелі присутній USB-порт типу B, який використовується для підключення до комп'ютера як USB-пристрій. Він підтримує протокол USBTMC (Test and Measurement Class), що забезпечує автоматичне розпізнавання приладу у вимірювальному ПЗ, зокрема LabVIEW, MATLAB або SCPI-терміналах. Пряме підключення до ESP32 через цей порт неможливе, оскільки він не підтримує USB-хост без спеціального розширення.

Окрім комунікаційних інтерфейсів, на задній панелі також знаходиться гніздо для підключення мережі живлення змінного струму, зазвичай зі стандартним роз'ємом IEC C14, а також перемикач живлення, що вмикає або вимикає мультиметр. Поруч часто є наклейка з серійним номером, інформацією про виробника та характеристики електроживлення приладу.

Загалом, задня панель SDM3045X є функціонально насиченою, і забезпечує всі необхідні засоби підключення для стаціонарної або дистанційної роботи мультиметра в умовах лабораторії, виробництва або вбудованих систем.

Таким чином, можливості дистанційного управління мультиметром та його дротові інтерфейси забезпечують передачу даних на контролер ESP32.

У системах автоматизованих вимірювань, коли під керуванням одного контролера ESP32 працює кілька мультиметрів, організація збору даних базується на принципі періодичного опитування кожного з приладів відповідно до індивідуального плану. У цьому випадку ESP32 виконує роль головного керуючого вузла, який регулярно надсилає запити на вимірювання, приймає результати та обробляє їх відповідно до призначення. Система спеціально

					ДП.МТІР.9500089.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		44

налаштована на те, щоб охопити як швидкоплинні, так і відносно стабільні сигнали, що потребують різної частоти вимірювання.

Кожен канал вимірювання в системі логічно описується за допомогою таблиці або внутрішньої структури, у якій зберігається інформація про номер каналу, тип вимірюваного сигналу, частоту опитування, а також про формат команди, яку необхідно надіслати відповідному мультиметру. Така структура дозволяє ESP32 керувати процесом збору даних в асинхронному режимі, при цьому кожен канал має власну незалежну періодичність запитів. Для динамічних сигналів, як-от змінна напруга чи струм, інтервали між опитуваннями встановлюються мінімальними — щоб вловити характер змін. Натомість для повільно змінних або стаціонарних параметрів, як температура чи постійна напруга, встановлюються значно більші інтервали, що дозволяє уникати зайвого навантаження на систему.

У кожен момент часу контролер перевіряє, чи настав час для наступного вимірювання для будь-якого з каналів. Якщо так — ESP32 встановлює зв'язок із відповідним мультиметром через визначений інтерфейс: UART (з використанням RS-232 і перетворювачів рівня) або Ethernet (через TCP-з'єднання). Після цього він надсилає SCPI-команду, яка ініціює вимірювання. У відповідь мультиметр надсилає цифрове значення вимірюваного параметра у вигляді текстового рядка. Контролер зчитує цю відповідь, прив'язує її до відповідного каналу, а також до мітки часу, після чого зберігає її в буфер або одразу передає далі — наприклад, у локальну базу даних або у хмару.

Таким чином, вся система функціонує як подієво-керована мережева архітектура, у якій кожен вимірювальний канал має власну логіку опитування, а ESP32 узгоджує ці процеси у реальному часі. Такий підхід забезпечує як високу точність відстеження швидких змін, так і ефективне використання ресурсів при роботі з повільними сигналами. У підсумку створюється гнучка й масштабована вимірювальна система, яка здатна адаптуватися до різних типів фізичних сигналів, не перевантажуючи ані контролер, ані комунікаційні канали.

					ДП.МТІР.9500089.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						45
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

3. ПРОГРАМНА ІНТЕГРАЦІЯ ЦИФРОВИХ МУЛЬТИМЕТРІВ

3.1. Програмне управління процесами вимірювання мультиметрами

Створення програми для мікроконтролера ESP32-S3 у середовищі Arduino IDE з організацією взаємодії мультиметра через інтерфейс RS232 та протокол UART включає кілька етапів, на яких потрібно налаштувати потрібні бібліотеки та правильно підключити мікроконтролер до мультиметра.

Першим етапом є підготовка середовища розробки. Першим кроком є встановлення середовища Arduino IDE [7]. На офіційному сайті Arduino потрібно завантажити та інстальювати середовище розробки програмного забезпечення. Після цього відкрийте IDE та в налаштуваннях додайте посилання для завантаження пакету для ESP32 - *Файл > Налаштування (File > Preferences)*. За необхідності, в полі *Додаткові адреси* для менеджера плат (Additional Boards Manager URLs) додайте посилання: https://raw.githubusercontent.com/espressif/arduino-esp32/gh-pages/package_esp32_index.json.

Після цього відкрийте IDE та в налаштуваннях додайте посилання для завантаження пакету для ESP32 - *Файл > Налаштування (File > Preferences)* – рисунок 3.1. В полі *Додаткові адреси* для менеджера плат (Additional Boards Manager URLs) додайте посилання: https://raw.githubusercontent.com/espressif/arduino-esp32/gh-pages/package_esp32_index.Json.

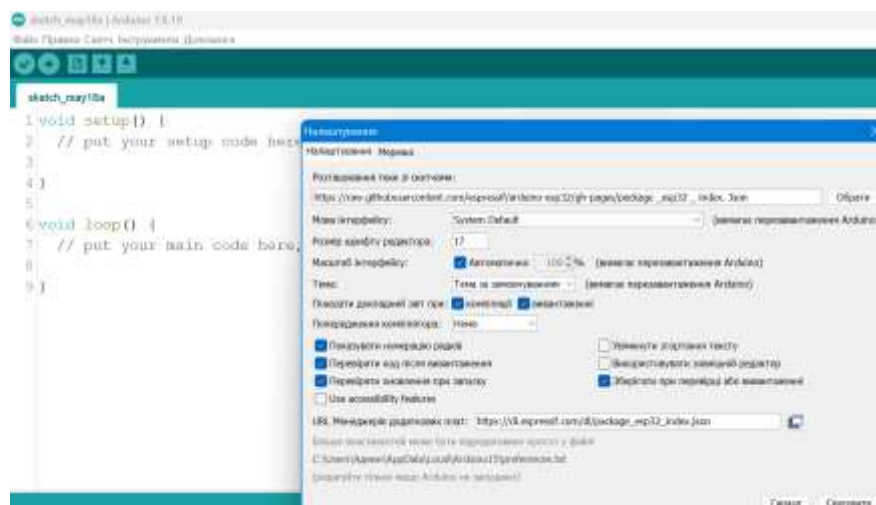


Рисунок 3.1 – Налаштування для завантаження бібліотеки для ESP32

					ДП.МТІР.9500089.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		46

У випадку встановлення пакета для ESP32-S3 потрібно відкрити Менеджер плат (Tools > Board > Board Manager). Знайдіть "ESP32" і натискайте «Встановити». Це дозволить вибрати модель плати ESP32-S3 з меню Інструменти > Плата (Tools > Board).

Для підключення плати та вибору порту у меню *Інструменти (Tools)* слід обрати плату: «ESP32-S3 Dev Module» - рисунок 3.2. У розділі Порт виберіть правильний COM-порт, до якого підключено ESP32-S3.

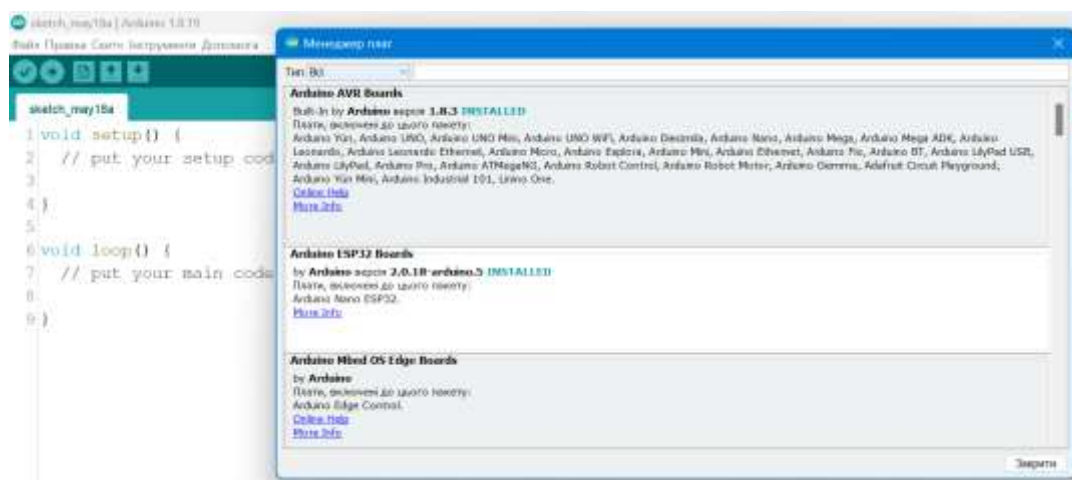
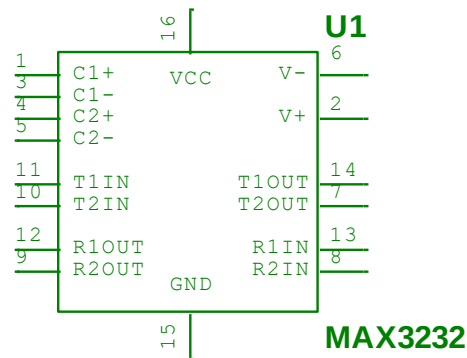


Рисунок 3.2 – Вибір плати мікроконтролера ESP 32

Наступним етапом буде апаратне підключення мультиметра через RS232 до плати ESP32-S3. Щоб підключити мультиметр SIGLENT SDM3045X до мікроконтролера ESP32-S3 через інтерфейс RS232, потрібно врахувати різницю в рівнях сигналів. Мультиметр використовує стандартні RS232-рівні напруги (± 12 В), тоді як ESP32-S3 працює з логікою 3.3 В. Тому між ними необхідно встановити перетворювач рівнів RS232 $\leftrightarrow$ TTL, наприклад на базі мікросхеми MAX232 – рисунок 3.3.

Мікросхема MAX232 використовується для перетворення рівнів напруги між логікою TTL (яку використовують мікроконтролери) та стандартом RS232, який застосовується в пристроях на кшталт комп'ютерів чи вимірювального обладнання. Вона має 16 виводів, кожен з яких виконує певну функцію.



а)

б)

Рисунок 3.3 –Перетворювач рівнів MAX232 – а) та її графічне позначення – б)

Живлення подається на вивід VCC, а вивід GND є загальною землею. Для генерації необхідних позитивних і негативних напруг (+10 В і -10 В), мікросхема використовує зовнішні зарядні конденсатори, які підключаються до виводів C1+, C1-, C2+ і C2-. Згенеровані напруги виводяться на контакти V+ і V-. Мікросхема MAX232 використовується для перетворення рівнів напруги між логікою TTL (яку використовують мікроконтролери) та стандартом RS232, який застосовується в пристроях на кшталт комп'ютерів чи вимірювального обладнання. Вона має 16 виводів, кожен з яких виконує певну функцію.

Живлення подається на вивід VCC, а вивід GND є загальною землею. Для генерації необхідних позитивних і негативних напруг (+10 В і -10 В), мікросхема використовує зовнішні зарядні конденсатори, які підключаються до виводів C1+, C1-, C2+ і C2-. Згенеровані напруги виводяться на контакти V+ і V-.

Передавання даних від мікроконтролера до пристрою здійснюється через TTL-входи T1IN і T2IN, а перетворений сигнал у стандарті RS232 з'являється на виходах T1OUT і T2OUT. У зворотному напрямку, сигнали з RS232-пристрою надходять на входи R1IN і R2IN, а мікросхема перетворює їх у TTL-рівень і подає на виходи R1OUT і R2OUT.

Таким чином, MAX232 дозволяє безпечно і надійно організувати обмін даними між пристроями з різними логічними рівнями, використовуючи просте підключення та кілька додаткових конденсаторів.

					ДП.МТІР.9500089.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						48
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Підключення здійснюється через стандартний кабель до роз'єму RS232 на мультиметрі, далі — до входу перетворювача, виходи якого з'єднуються з відповідними контактами UART на ESP32-S3. Для роботи необхідно узгодити швидкість передавання даних і параметри протоколу на обох пристроях — зазвичай це 9600 бод, 8 біт даних, без парності та керування потоком.

На мікроконтролері налаштовується послідовний порт, через який надсилаються SCPI-команди, наприклад *IDN? для отримання ідентифікаційної інформації. У відповідь мультиметр надсилає рядок з інформацією про модель та версію прошивки, що дозволяє переконатися у правильності підключення та зв'язку.

Для організації взаємодії між мультиметром та мікроконтролером через протокол UART потрібно підключити бібліотеки, які підтримують роботу з даним інтерфейсом. В середовищі Arduino для цього використовують стандартні бібліотеки для роботи з Serial або HardwareSerial. Однак для спеціалізованих функцій можна додати додаткові бібліотеки, наприклад:

- SoftwareSerial (якщо потрібно додаткове програмне UART)
- HardwareSerial (для використання апаратного UART, який є в ESP32)
- Бібліотеки для роботи з конкретними мультиметрами (якщо є специфічні протоколи).

Щоб додати бібліотеку, перейдіть у Меню: Інструменти > Бібліотеки > Керувати бібліотеками, і знайдіть потрібні бібліотеки. Зазвичай для роботи з UART достатньо стандартних бібліотек Arduino IDE.

Таким чином, в даному розділі розглянуто питання програмно-апаратної підготовки до програмної реалізації процесу інтеграції мультиметрів.

3.2. Програмні засоби дротової передачі даних контролеру ESP32

Метою даного розділу роботи є створення програмного забезпечення для ESP32, яке забезпечить отримання результатів вимірювання напруги, струму,

					ДП.МТІР.9500089.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		49

опору та ємності від мультиметра SIGLENT SDM3045X через інтерфейс RS-232 (UART). Управління здійснюється за допомогою SCPI-команд, які передаються з зовнішньої системи (наприклад, ПК або вбудованої системи), а ESP32 виступає як посередник.

Для правильного формування SCPI-команд до мультиметра SIGLENT SDM3045X, слід вказувати не лише тип вимірювання (наприклад, напруга, струм), а й конкретне підключення (канал). Мультиметр підтримує чотири типи підключення:

- Високочастотне (HI)
- Низькочастотне (LO)
- 2-дротове (2W)
- 4-дротове (4W)

Це слід вказувати як частину SCPI-команди, наприклад:

- MEAS:VOLT:DC? (@10) // Вимірювання постійної напруги на вході 10

Загальна структура функціонування системи виглядає наступним чином – рисунок 3.4.

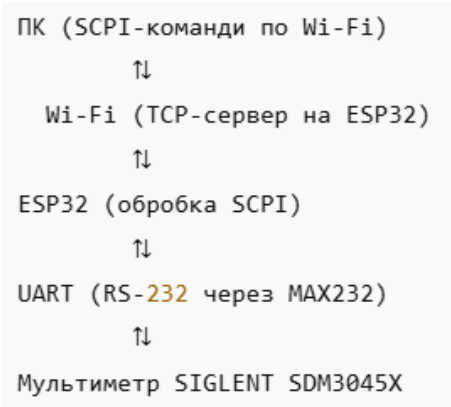


Рисунок 3.4 – Структура функціонування системи

Тобто ESP32 приймає SCPI-команди через Wi-Fi, розпізнає тип вимірювання та канал, пересилає відповідну команду до мультиметра та приймає його по UART.

Спрощений фрагмент програмного забезпечення автоматизованої системи, що передбачає передачу мультиметру команд вимірювання приведено на рисунку 3.5.

```
#include <WiFi.h>
#include <WiFiClient.h>
#include <WiFiServer.h>
// Параметри Wi-Fi мережі
const char* ssid = "YourSSID";
const char* password = "YourPassword";
WiFiServer server(5025); // Порт SCPI (часто 5025 або 5023)
HardwareSerial MultimeterSerial(2); // UART для мультиметра

void setup() {
  Serial.begin(115200);
  MultimeterSerial.begin(9600, SERIAL_8N1, RX_PIN, TX_PIN);

  WiFi.begin(ssid, password);
  while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
    delay(500);
    Serial.print(".");
  }
  Serial.println("\nWiFi connected");

  server.begin(); // Запуск TCP-сервера
}

void loop() {
  WiFiClient client = server.available(); // Очікуємо клієнта

  if (client) {
    Serial.println("Клієнт підключився");
    while (client.connected()) {
      if (client.available()) {
        String command = client.readStringUntil('\n');
        Serial.println("Отримано команду: " + command);
        // Відправляємо команду мультиметру
        MultimeterSerial.print(command);
        MultimeterSerial.print("\n");

        // Чекаємо і зчитуємо відповідь
        String response = MultimeterSerial.readStringUntil('\n');
        // Відправляємо відповідь назад клієнту
        client.println(response);
      }
    }
    client.stop();
    Serial.println("Клієнт відключився");
  }
}

#include <WiFi.h>
}
}
```

Рисунок 3.5 - Фрагмент програмного забезпечення автоматизованої системи, що передбачає передачу мультиметру команд вимірювання

Наступним кроком взаємодії мультиметра та ESP32 є прийом від мультиметра по UART результатів вимірювань. Після отримання відповіді програмне забезпечення повинно визначити тип вимірювань, канал, з якого надійшли дані, та час фіксації результату (наприклад, у мілісекундах від старту системи). Всю цю інформацію слід формувати у структурованій формі, наприклад, у вигляді рядка з роздільниками, і передається далі на контролер для подальшої обробки або збереження. Фрагмент коду (з коментарями) приведено на рисунку 3.6.

```
#include <HardwareSerial.h>

// Ініціалізація UART для мультиметра
HardwareSerial MultimeterSerial(2);

void setup() {
    Serial.begin(115200);           // Серійний порт для контролера (монітор порту)
    MultimeterSerial.begin(9600, SERIAL_8N1, 16, 17); // RX, TX пін ESP32
    Serial.println("Готово до прийому вимірювань");
}

void loop() {
    if (MultimeterSerial.available()) {
        String response = MultimeterSerial.readStringUntil('\n'); // Результат від мультиметра
        // Припустимо, що вхідна команда раніше була: MEAS:VOLT:DC? (@101)
        // Тож ми маємо тип вимірювання і канал в контексті — задаємо вручну для прикладу:
        String measurementType = "Voltage DC"; // Тип вимірювання (можна динамічно парсити)
        int channel = 101; // Номер каналу
        // Фіксація часу отримання результату
        unsigned long measurementTime = millis();
        // Формуємо рядок з інформацією для контролера
        String output = "Result: " + response + "; Time(ms): " + String(measurementTime) +
            "; Type: " + measurementType + "; Channel: " + String(channel);
        // Відправляємо інформацію на контролер (через серійний порт)
        Serial.println(output);
    }
}
```

Рисунок 3.6 – Фрагмент коду прийому вимірюваних даних від мультиметра по інтерфейсу UART мікроконтролером

В даному фрагменті команда `MultimeterSerial.readStringUntil('\n')` читає результат вимірювання від мультиметра до символу нового рядка. Опції

measurementType і channel задаються у коді, але в реальній програмі їх можна отримувати з обробленої SCPI-команди. Команда millis() повертає час у мілісекундах від старту роботи ESP32, що використовується як час фіксації виміру. Вся інформація форматується у зрозумілий рядок і надсилається на контролер (через Serial).

3.3. Організація бездротового трафіку від контролера до сервера

В даному розділі слід описати процес організації з'єднання контролера з сервером то проілюструвати цей процес фрагментами коду.

Для цього

Спершу ми підключаємо ESP32 до комп'ютера через USB-кабель. Це потрібно для того, щоб завантажити на нього програму та отримувати повідомлення від пристрою під час роботи. Для цього відкриваємо середовище розробки Arduino IDE, яке дозволяє писати код і відправляти його на ESP32.

У програмі ми прописуємо назву нашої Wi-Fi мережі та пароль, щоб ESP32 зміг підключитися до Інтернету. Для прикладу візьмемо мережу з іменем "MyHomeWiFi" і пароль "password123".

Після того, як ми завантажили програму, ESP32 починає виконувати її. Він намагається підключитися до Wi-Fi, і якщо підключення вдале, отримує IP-адресу в локальній мережі, наприклад 192.168.1.50. Цю адресу ми можемо побачити у моніторі порту Arduino IDE.

Тепер, коли ESP32 підключений до Wi-Fi, ми можемо взаємодіяти з ним через комп'ютер. Є два основних способи через USB — безпосередньо обмінюватись даними в серійному моніторі і через Wi-Fi — відкривати IP-адресу ESP32 в браузері або надсилати запити по мережі. Приклад коду з коментарями приведено на рисунку 3.7.

Пояснення коду:

- #include <WiFi.h> — це бібліотека, що дозволяє ESP32 працювати з Wi-Fi.

					ДП.МТІР.9500089.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		53

- `const char* ssid` і `password` — це змінні, в яких зберігаються ім'я мережі і пароль для підключення.
- `Serial.begin(115200)` — відкриває серійний порт з швидкістю 115200 бод, щоб ми могли бачити повідомлення з ESP32 на ПК.
- `WiFi.begin(ssid, password)` — команда для початку підключення до Wi-Fi.
- цикл `while (WiFi.status() != WL_CONNECTED)` — чекає, поки ESP32 не підключиться, виводячи крапки для індикації процесу.
- коли ESP32 підключився, він виводить у серійний порт повідомлення про успішне підключення та свою IP-адресу.

```
#include <WiFi.h> // Підключаємо бібліотеку для роботи з Wi-Fi на ESP32
// Задаємо ім'я мережі (SSID) та пароль
const char* ssid = "MyHomeWiFi";
const char* password = "password123";
void setup() {
    Serial.begin(115200); // Запускаємо серійний порт для виводу інформації на ПК
    delay(1000);          // Невелика затримка для стабілізації серійного з'єднання
    Serial.println();
    Serial.println("Початок підключення до Wi-Fi...");
    // Запускаємо підключення до Wi-Fi мережі
    WiFi.begin(ssid, password);
    // Чекаємо, поки ESP32 не підключиться
    while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
        delay(500);          // Затримка 500 мс для зручності читання в моніторі
        Serial.print(".");    // Виводимо крапку кожні 500 мс, щоб показати процес підключення
    }
    // Коли підключення успішне, виводимо повідомлення
    Serial.println();
    Serial.println("Підключено до Wi-Fi мережі!");
    // Виводимо IP-адресу, яку отримав ESP32 у локальній мережі
    Serial.print("IP-адреса ESP32: ");
    Serial.println(WiFi.localIP());
}
void loop() {
    // Тут можна додати код для подальшої роботи пристрою
}
```

Рисунок 3.7 – Фрагмент коду, що забезпечує взаємодію мікроконтролера та сервера автоматизованої системи

Після того, як ви завантажили цей код і ESP32 отримав IP-адресу, можна: відкрити в Arduino IDE Серіальний монітор (Serial Monitor), щоб бачити

					ДП.МТІР.9500089.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		54

повідомлення і IP-адресу ESP32. Якщо в подальшому додати веб-сервер або інші мережеві сервіси в код, то через браузер ПК за цією IP-адресою можна буде отримувати дані або керувати ESP32.

					ДП.МТІР.9500089.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						55
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, автоматизоване вирішення яких дозволить оперативно отримувати достовірні дані контролю та моніторингу параметрів в різних точках електричних кіл забезпечить їх надійне функціонування без порушень технологічних процесів.

Запропоновано використати двохрівневу ієрархічну структуру автоматизованої системи, що забезпечує можливість її масштабування. На нижньому рівні запропоновано створити комплекс спеціалізованих (за видом контролю) мікроконтролерних модулів, що забезпечують збір та бездротову передачу інформації в серверну частину системи.

У відповідності з поставленою метою, визначені параметри контролю та моніторингу, обґрунтовано вибір цифрових мультиметрів, дротових та бездротових інтерфейсів. В структуру введено проміжний рівень управління цифровими мультиметрами на базі ESP32. Це дозволяє гнучко управліти процесами вимірювання в часі з метою уникнення надмірності трафіку передачі даних.

Здійснено апаратно-програмну реалізацію автоматизованої системи, зокрема, аналогового комутатора, що забезпечує незалежне підключення цифрових мультиметрів до різних точок електричних кіл, використання мікроконтролерної платформи ESP32 WROOM32 Dev Kit v1 для забезпечення комунікації між мультиметрами та сервером. Розроблено відповідні програмних скетчі прошивки мікроконтролера в середовищі Arduino IDE. Розглянуто питання налаштування Wi-Fi з'єднання компонентів автоматизованої системи моніторингу.

					ДП.МТІР.9500089.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						56
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

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. Метрологія, вимірювання та контроль: Навчальний посібник / О.В. Бєлова, Ю.І. Гринюк, М.С. Ємельянов. - К.: Видавничий дім "Паливода А.С.", 2020. – 193с.
5. 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.
6. 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._vymiruvan.pdf
7. Програмування Arduino / [Електронний ресурс]. / Режим доступу - <https://forum.arduino.ua/viewforum.php?id=1>. - Дата доступу – 08.05.2025.
8. 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.

					ДП.МТІР.9500089.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		57

9. Основи метрології та електричних вимірювань : підручник / В. В. Кухарчук, В. Ю. Кучерук, Є. Т. Володарський, В. В. Грабко. – Херсон: Олді-плюс, 2013. – 538 с.
10. 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.
11. 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.
12. R. Bartiromo, M. Vincenzi. Electrical Measurements in the Laboratory Practice. – Springer. - 2016. – 301p.

					ДП.МТІР.9500089.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		58