МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Західноукраїнський національний університет
Факультет комп'ютерних інформаційних технологій
Кафедра комп’ютерної інженерії

Дикунець Владислав Вікторович

Мікропроцесорний модуль вимірювання параметрів електричної мережі автомобіля / Microprocessor module for measuring automotive electrical network parameters

спеціальність: 123 – Комп’ютерна інженерія
освітньо-професійна програма – Комп’ютерна інженерія

Кваліфікаційна робота

Виконав: студент групи КІ-41
Дикунець Владислав Вікторович

Науковий керівник
к.т.н. Мельник Г.М.

ТЕРНОПІЛЬ - 2026

АНОТАЦІЯ

Дикунець В.В. Мікропроцесорний модуль вимірювання параметрів електричної мережі автомобіля. – Рукопис.

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня «бакалавр» за спеціальністю 123 «Комп'ютерна інженерія», освітньо-професійна програма. Західноукраїнський національний університет, Тернопіль, 2026.

Робота написана обсягом 55 сторінки і містить 21 рисунків, 8 таблиць, 3 додатки та 33 джерелв за переліком посилань. Обсяг графічного матеріалу 2 аркуші формату А3.

Метою кваліфікаційної роботи є розробка мікропроцесорного модуля вимірювання параметрів електричної мережі автомобіля з можливістю віддаленого моніторингу. У роботі проаналізовано особливості електричної мережі автомобіля, типові режими її роботи та прояви несправностей, які можуть бути виявлені за зміною напруги, струму. Розроблено структурну та принципову схему модуля на основі мікроконтролера ESP32 із використанням вимірювальних модулів INA226, захисту вхідних кіл, стабілізації живлення та інтерфейсів передавання даних. У програмній частині реалізовано зчитування вимірюваних параметрів, фільтрацію результатів, виявлення аварійних станів, локальне відображення даних на OLED-дисплеї та передавання інформації через бездротовий канал зв'язку.

Ключові слова: МІКРОПРОЦЕСОРНИЙ МОДУЛЬ, ESP32, INA226, АВТОМОБІЛЬНА ЕЛЕКТРОМЕРЕЖА, ВІДДАЛЕНИЙ МОНІТОРИНГ, ІОТ.

ANNOTATION

Dykunets V.V. Microprocessor module for measuring automotive electrical network parameters – Manuscript.

Qualification work for the Bachelor degree in specialty 123 “Computer Engineering”, educational and professional program. Western Ukrainian National University, Ternopil, 2026.

The work is written in 55 pages and contains 21 figures, 8 tables, 3 appendices and 33 references. The volume of graphic material is 2 sheets of A3 format.

The purpose of the qualification work is to develop a microprocessor module for measuring parameters of a vehicle electrical network with the possibility of remote monitoring. The work analyzes the features of the vehicle electrical network, typical operating modes and fault manifestations that can be detected by changes in voltage, current and power. A structural and schematic diagram of the module based on the ESP32 microcontroller has been developed using INA226 measuring modules, input circuit protection, power stabilization and data transmission interfaces. The software part implements reading of measured parameters, data filtering, detection of emergency states, local data display on an OLED screen and wireless data transmission.

Keywords: MICROPROCESSOR MODULE, ESP32, INA226, VEHICLE ELECTRICAL NETWORK, REMOTE MONITORING, IOT.

ЗМІСТ

Вступ 9
1. Системи моніторингу електричної мережі автомобіля 11
1.1. Відомі рішення для моніторингу 11
1.2. Формування вимог до мікропроцесорного модуля 15
1.3 Постановка задач кваліфікаційної роботи 20
2 Проєктування мікроконтролерної системи 25
2.1 Розробка структурної схеми мікропроцесорного модуля 25
2.2 Розробка функційної схеми мікропроцесорного модуля 30
2.3 Розробка принципової схеми мікропроцесорного модуля 35
2.4. Розробка процедур передавання даних 40
3 Реалізація та тестування мікропроцесорної системи 42
3.1 Вибір середовища моделювання і розробки 42
3.2 Розробка моделі мікропроцесорного модуля 46
3.3 Верифікація проєкту мікропроцесорного модуля 51
Висновки 55
Список використаних джерел 56
Додаток А Техніко-економічне обґрунтування розробки 59
Додаток Б Вихідний код програми мікроконтролера 67
Додаток В Світлокопії виданих публікацій 74

					КР.КІ. 11148936.00.00.000 ПЗ		
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата			
Розробив		Дикунець В.В.			Мікропроцесорний модуль вимірювання параметрів електричної мережі автомобіля	Літ.	Арк. 7 / Акрушів
Перевір.		Мельник Г.М.					
Консульт.		Савка Н.Я.				ЗУНУ,ФКІТ, КІ-41	
Н. Контр.		Дубчак Л.О.					
Затвердив		Дубчак Л.О.					

ВСТУП

Актуальність теми зумовлена зростанням ролі електричних та електронних систем у сучасних автомобілях. Від стабільності бортової електромережі залежить робота систем запалювання, освітлення, керування двигуном, заряджання акумуляторної батареї, датчиків, виконавчих механізмів та засобів діагностики. Навіть незначні відхилення напруги, нестабільність живлення або поганий контакт у колах електроживлення можуть призводити до некоректної роботи окремих вузлів, появи діагностичних помилок і зниження надійності транспортного засобу.

Традиційний контроль параметрів автомобільної електромережі часто виконується за допомогою мультиметра, бортового комп’ютера або діагностичного сканера. Однак такі засоби не завжди забезпечують безперервне спостереження за станом електромережі в реальному часі та не дають можливості оперативно передавати дані користувачу на віддалений сервер або мобільний пристрій. Тому актуальним є створення компактного мікропроцесорного модуля, який може вимірювати основні електричні параметри, накопичувати або передавати результати вимірювань і забезпечувати зручну візуалізацію стану електромережі автомобіля.

Розробка такого модуля відповідає сучасним підходам до IoT-моніторингу транспортних систем, де важливими є автономність, бездротовий обмін даними, доступність вимірювань для користувача та можливість подальшого аналізу технічного стану автомобіля. Використання мікропроцесорної платформи дає змогу поєднати апаратні засоби вимірювання, програмну обробку даних, передачу інформації та інтерфейс користувача в одному рішенні.

Метою роботи є рзробка мікропроцесорного модуля вимірювання параметрів електричної мережі автомобіля з можливістю віддаленого моніторингу.

Об’єкт дослідження - процес вимірювання, передавання та візуалізації параметрів електричної мережі автомобіля засобами.

Предмет дослідження - апаратно-програмні засоби побудови мікропроцесорного модуля для вимірювання параметрів електричної мережі автомобіля з підтримкою бездротового зв’язку, передавання даних та відображення результатів вимірювання в інтерфейсі користувача.

Завдання дослідження:

1. дослідити методи IoT-моніторингу електричної мережі,
2. проаналізувати типові несправності електричних систем автомобіля та їх прояви у вимірюваних параметрах,
3. розробити апаратну частину модуля з підтримкою бездротового зв’язку,
4. реалізувати процедури передачі даних на віддалений сервер.

Результати дослідження апробовано на IV Всеукраїнській науково-практичній конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Інтелектуальні комп’ютерні системи та мережі» [1] (додаток В).

У першому розділі проведено аналіз систем моніторингу електричної мережі автомобіля. Сформульовано вимоги до мікропроцесорного модуля, мету дослідження і постановку задач.

У другому розділі спроєктовано апаратну частину мікропроцесорного модуля. Обґрунтувати вибір мікроконтролера ESP32, визначено склад структурної схеми пристрою, обрано датчики для вимірювання струму і напруги. Розроблено структурноу і функційну схему мікропроцесорного модуля, процедури передавання даних.

У третьому розділі проведено реалізацію та тестування мікропроцесорної системи.

1. СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ АВТОМОБІЛЯ

1.1. Відомі рішення для моніторингу

Електрична мережа сучасного автомобіля є складною сукупністю джерел живлення, споживачів, електронних блоків керування, датчиків, виконавчих механізмів, комунікаційних шин і захисних елементів. Її працездатність безпосередньо впливає на запуск двигуна, стабільність роботи електронних систем, безпеку руху, коректність діагностування та експлуатаційну надійність транспортного засобу [1-5].

До основних параметрів (таблиця 1.1), які характеризують стан електричної мережі автомобіля, належать напруга акумуляторної батареї, напруга бортової мережі під час роботи генератора, струм заряду або розряду акумулятора, просідання напруги під час запуску двигуна, рівень пульсацій, температура акумулятора, стан контактних з'єднань, а також наявність помилок, пов'язаних з електроживленням електронних блоків [2, 3]. Для контролю цих параметрів використовують як прості вимірювальні прилади, так і складні діагностичні комплекси та телеметричні системи.

Таблиця 1.1 - Вимірювані параметри

Параметр	Нормальний стан / Значення	Мета вимірювання
Напруга *U*, В	При заглушеному двигуні: 12.5 - 12.7 В При заведеному двигуні: 13.8 - 14.5 В	Оцінка заряду АКБ та справності генератора.
Сила струму *I*, А	Залежить від потужності споживача.	Розрахунок споживання електроенергії окремими вузлами (фари, кондиціонер).
Опір R, Ом	Цілий дріт: ≈ 0 , Ом Обрив: нескінченність	Перевірка цілісності проводки, запобіжників та датчиків.

Найпростішим засобом контролю електричної мережі автомобіля є цифровий мультиметр. Він дає змогу вимірювати напругу, опір, перевіряти цілісність електричних кіл, а в окремих режимах - силу струму. Перевагою мультиметра є універсальність, низька вартість, простота використання та можливість безпосереднього вимірювання фізичних величин у конкретних

точках електричної схеми. За його допомогою можна перевірити напругу акумулятора у стані спокою, напругу під час запуску двигуна, напругу заряджання від генератора, падіння напруги на контактах і запобіжниках.

Водночас мультиметр має суттєві обмеження з позиції комп'ютерної інженерії. Він не забезпечує автоматичного збору даних упродовж тривалого часу, не формує історію вимірювань, не має штатних засобів передавання даних на сервер або мобільний застосунок. Більшість мультиметрів використовуються в ручному режимі, тому результат вимірювання залежить від досвіду оператора, правильності підключення щупів і вибору режиму вимірювання. Крім того, мультиметр погано підходить для реєстрації короткочасних перехідних процесів, наприклад різкого просідання напруги під час старту або імпульсних завад у бортовій мережі.

Іншим поширеним рішенням є бортовий комп'ютер автомобіля. Такі пристрої можуть відображати напругу бортової мережі, частоту обертання двигуна, температуру охолоджувальної рідини, витрату пального, помилки електронного блока керування та інші параметри [2-6]. Перевагою такого рішення є інтеграція з автомобілем, зручність для водія та можливість отримання даних без використання зовнішнього сервісного обладнання.

Бортові комп'ютери зазвичай орієнтовані на інформування водія. Вони часто показують лише обмежений набір параметрів, не дають доступу до сирих вимірювальних даних, не завжди підтримують довготривале збереження журналів і не забезпечують гнучкої інтеграції з хмарними сервісами.

Адаптери OBD-II підключаються до стандартного діагностичного роз'єму та передають дані на смартфон, планшет або комп'ютер через Bluetooth, Wi-Fi чи USB. Дозволяють отримувати діагностичні коди несправностей, переглядати параметри роботи двигуна, напругу живлення електронного блока керування, показники датчиків та інші дані, доступні через діагностичні протоколи.

Разом з тим OBD-II адаптер не є повноцінним вимірювальним пристроєм для електричної мережі автомобіля. Він отримує інформацію переважно через електронний блок керування і залежить від того, які параметри доступні в

конкретній моделі автомобіля. Напруга, яку показує діагностичний застосунок, зазвичай є напругою на вході блока керування або значенням, обробленим внутрішніми засобами автомобіля.

Автомобільні діагностичні сканери можуть підтримувати розширені протоколи конкретних виробників, роботу з різними електронними блоками, перегляд потокових даних, виконання тестів виконавчих механізмів, адаптацій і сервісних процедур. Такі пристрої корисні тим, що дають змогу виявляти помилки, пов’язані з низькою напругою живлення, обривами, короткими замиканнями, несправностями датчиків.

Окрему групу становлять IoT-модулі контролю акумуляторної батареї. Такі пристрої встановлюються безпосередньо на клеми акумулятора або підключаються до бортової мережі й періодично вимірюють напругу, температуру, іноді струм заряду та розряду. Дані можуть передаватися на смартфон через Bluetooth або до віддаленого сервера через Wi-Fi, GSM, LTE чи інші канали зв’язку. Основна перевага таких модулів полягає в можливості тривалого спостереження за станом акумулятора, виявлення глибокого розряду, контролю процесу заряджання та повідомлення користувача про потенційні проблеми.

Системи телеметрії транспорту застосовуються у вантажних перевезеннях, громадському транспорті, сервісних автопарках і системах моніторингу службових автомобілів. Такі системи можуть контролювати місцезнаходження транспортного засобу, швидкість, пробіг, витрату пального, стан запалювання, напругу бортової мережі, параметри двигуна, події безпеки та інші показники. Дані передаються на сервер, де зберігаються, аналізуються та відображаються у вебінтерфейсі або мобільному застосунку.

Порівняння розглянутих рішень показує, що кожен клас засобів має власну сферу ефективного застосування (рисунок 1.1). Мультиметр є зручним для разових ручних вимірювань, але не забезпечує автоматизації. Бортовий комп’ютер надає водієві базову інформацію, але має обмежену гнучкість. OBD-II адаптер дає доступ до діагностичних параметрів, однак не завжди відображає

реальний стан електричних кіл. Професійний сканер є потужним сервісним інструментом, але не призначений для постійного недорогого моніторингу. Телеметрична система надає віддалений контроль і накопичення даних, але зазвичай є складною та орієнтованою на комерційні автопарки.

На рисунку 1.1 показано узагальнену класифікацію засобів, які можуть застосовуватися для контролю параметрів електричної мережі автомобіля. Ручні вимірювальні засоби використовуються переважно для разової перевірки напруги, струму або цілісності електричних кіл. Вбудовані автомобільні системи та OBD-II діагностика дають змогу отримувати дані від електронних блоків автомобіля, але їхні можливості залежать від конкретної моделі транспортного засобу.

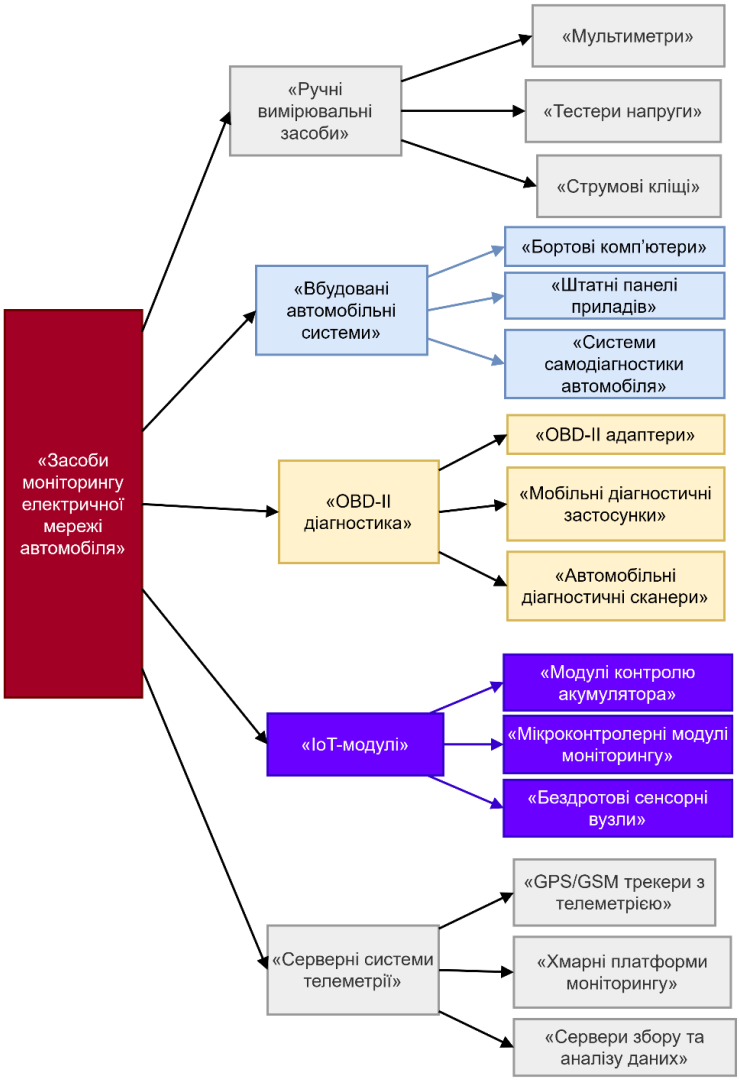


Рисунок 1.1 - Класифікація засобів моніторингу електричної мережі автомобіля

У таблиці 1.2 подано порівняння основних засобів, які можуть використовуватися для контролю електричної мережі автомобіля.

Таблиця 1.2 - Порівняння засобів контролю електричної мережі автомобіля

Тип рішення	Вимірювані параметри	Спосіб підключення	Можливість віддаленого моніторингу	Переваги	Недоліки
Цифровий мультиметр	Напруга акумулятора, напруга генератора, опір, цілісність кіл	Ручне підключення щупами до клем, контактів, запобіжників	Зазвичай відсутня	Низька вартість, простота, універсальність, пряме вимірювання фізичних величин	Ручний режим роботи, немає журналу даних
Бортовий комп'ютер	Напруга бортової мережі, температура, витрата пального	Через штатну електроніку автомобіля або діагностичний інтерфейс	Обмежена або відсутня, залежно від моделі	інтеграція з автомобілем, не потребує окремих вимірювань	закрита логіка роботи, слабкі можливості збереження даних
OBD-II адаптер	Напруга живлення блока керування, параметри датчиків і двигуна	Підключення до OBD-II роз'єму; передача через Bluetooth, Wi-Fi або USB	Можлива через смартфон або застосунок,	Доступність, просте підключення, підтримка багатьох мобільних застосунків	Не вимірює всі параметри напряму, , можливі нестабільний зв'язок
IoT-модуль контролю акумулятора	Напруга акумулятора, температура, іноді струм заряду або розряду, стан зарядженості	Підключення до клем акумулятора або бортової мережі	Є через Bluetooth, Wi-Fi, GSM або мобільний застосунок	Постійне спостереження, сповіщення про розряд, можливість збереження історії	не аналізує всю електромережу, закрита архітектура готових пристроїв

1.2. Формування вимог до мікропроцесорного модуля

На основі аналізу відомих рішень для контролю електричної мережі автомобіля можна сформувати вимоги до розроблюваного мікропроцесорного модуля. На відміну від мультиметра, такий модуль має працювати в автоматизованому режимі, виконувати періодичне вимірювання параметрів,

накопичувати результати та передавати їх користувачу. На відміну від OBD-II адаптера, пристрій повинен мати власні вимірювальні кола і не залежати повністю від того, які параметри доступні через електронний блок керування автомобіля. На відміну від промислових телеметричних систем, розроблюваний модуль має бути простішим, дешевшим і орієнтованим на контроль основних електричних параметрів одного транспортного засобу [5-8].

Основою модуля доцільно обрати мікроконтролер ESP32, оскільки він поєднує обчислювальні ресурси, аналогово-цифрове перетворення, підтримку Wi-Fi та Bluetooth, низьке енергоспоживання і достатню кількість інтерфейсів для підключення зовнішніх датчиків. Використання ESP32 дає змогу реалізувати не лише локальне вимірювання напруги або струму, а й передавання даних до мобільного застосунку, вебінтерфейсу або серверної частини системи моніторингу. Тому вимоги до модуля слід розглядати як сукупність функціональних, апаратних, програмних, комунікаційних, метрологічних, експлуатаційних та інтерфейсних вимог.

Функціональні вимоги визначають, які задачі повинен виконувати мікропроцесорний модуль під час роботи в автомобільній електромережі. Основною функцією пристрою є вимірювання параметрів електроживлення автомобіля в різних режимах експлуатації: у стані спокою, під час увімкнення запалювання, запуску двигуна, роботи генератора, підключення електричних споживачів і зупинки двигуна.

Модуль повинен забезпечувати вимірювання напруги акумуляторної батареї та напруги бортової мережі. Ці параметри є базовими для оцінювання стану акумулятора, працездатності генератора, стабільності електроживлення електронних блоків і наявності просідань напруги [7-15]. Для розширення функціональності доцільно передбачити можливість вимірювання струму заряду або розряду акумулятора за допомогою зовнішнього датчика струму. Також бажаним є контроль температури в зоні встановлення акумулятора або електронного модуля, оскільки температурний режим впливає на роботу

акумуляторної батареї, стабільність електронних компонентів і точність вимірювань.

Пристрій повинен виконувати періодичне опитування вимірювальних каналів із заданим інтервалом. Водночас для аналізу короткочасних процесів, зокрема просідання напруги під час запуску двигуна, необхідно передбачити режим підвищеної частоти вимірювання.

До функціональних вимог належить виявлення порогових станів. Модуль повинен фіксувати знижену напругу акумулятора, надмірне просідання напруги під час запуску, відсутність нормального заряджання після запуску двигуна, підвищену напругу бортової мережі, нестабільність живлення та можливий глибокий розряд. Для кожної такої події доцільно передбачити формування повідомлення, запис у журнал або передавання сповіщення користувачу.

Крім поточного вимірювання, система повинна підтримувати збереження історії даних. Журнал вимірювань потрібний для подальшого аналізу динаміки напруги, пошуку періодичних проблем, оцінювання стану акумулятора після тривалого простою автомобіля та перевірки роботи генератора. Збереження може виконуватися у внутрішній пам’яті мікроконтролера, на зовнішньому носії або на сервері, залежно від обраної архітектури системи [11, 16-19].

Інтерфейс користувача повинен забезпечувати просте і зрозуміле відображення основних параметрів електричної мережі автомобіля. Користувач має бачити поточну напругу акумулятора, напругу бортової мережі, за наявності відповідного датчика - струм заряду або розряду, температуру, стан підключення, режим роботи модуля та повідомлення про виявлені події.

Для локального відображення можна передбачити невеликий дисплей, світлодіодну індикацію або вебсторінку, яку формує сам ESP32. Інтерфейс повинен не лише показувати числові значення, а й інтерпретувати їх для користувача. Для віддаленого моніторингу інтерфейс повинен підтримувати перегляд історії вимірювань. Графіки напруги та інших параметрів дають змогу оцінити, як змінювався стан електромережі протягом часу, чи були просідання під час запуску, чи відбувався розряд під час стоянки, чи стабільно працював

генератор. Також доцільно передбачити повідомлення про критичні події: зниження напруги нижче встановленого порогу, відсутність заряджання, різке просідання або перевищення допустимого рівня.

Сформовані вимоги (таблиця 1.3) показують, що розроблюваний пристрій повинен поєднувати функції вимірювального приладу, мікропроцесорної системи збору даних і простого IoT-модуля. Його основними задачами є безпосереднє вимірювання параметрів електричної мережі автомобіля, первинне оброблення даних на ESP32, виявлення відхилень, передавання результатів користувачу та збереження історії вимірювань [19]. Такий підхід дає нам змогу усунути частину обмежень ручних приладів, OBD-II адаптерів і закритих телеметричних систем.

Таблиця 1.3 - Узагальнені вимоги до мікропроцесорного модуля

Група вимог	Зміст вимог	Очікуваний результат
Функціональні вимоги	Вимірювання напруги, за потреби струму і температури; виявлення просідань, перенапруги, розряду та відсутності заряджання	Модуль забезпечує контроль основних станів автомобільної електромережі
Апаратні вимоги	ESP32, вхідний дільник напруги, стабілізоване живлення, захист входів, можливість підключення датчика струму і температури	Пристрій безпечно підключається до бортової мережі та виконує вимірювання
Програмні вимоги	Опитування датчиків, фільтрація, калібрування, журналювання, визначення подій, режими роботи	Дані обробляються автоматично й перетворюються на корисну інформацію
Вимоги до зв’язку	Wi-Fi або Bluetooth, передавання даних у структурованому форматі, відновлення з’єднання, захист доступу	Користувач може отримувати дані локально або віддалено
Вимоги до точності	Калібрування за еталонним приладом, стабільність показів, похибка напруги орієнтовно не більше 0,1–0,2 В	Вимірювання придатні для практичного контролю стану електромережі
Інтерфейсні вимоги	Відображення поточних значень, графіків, журналу подій, станів і налаштувань	Користувач отримує зрозуміле подання параметрів і попереджень
Експлуатаційні вимоги	Низьке енергоспоживання, захист від завад, безпечне встановлення, корпусування	Модуль може працювати в умовах автомобіля без негативного впливу на його системи

На рисунку 1.2 подано узагальнену структуру вимог до мікропроцесорного модуля. Вона показує, що розроблення пристрою не обмежується вибором

мікроконтролера або датчика напруги. Необхідно одночасно враховувати вимірювальні характеристики, апаратний захист, алгоритми оброблення даних, бездротове передавання, інтерфейс користувача та умови експлуатації в автомобілі.

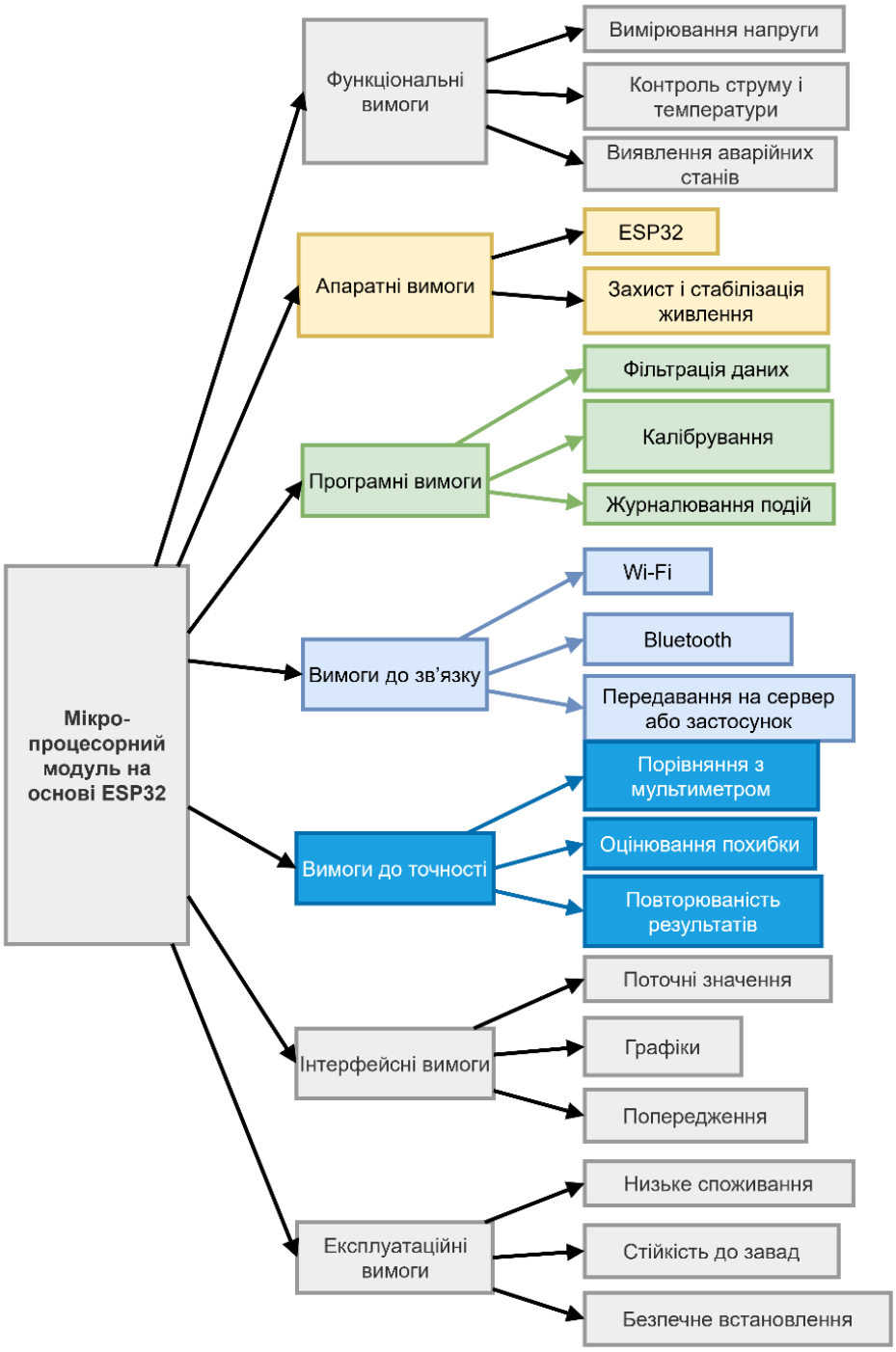


Рисунок 1.2 - Структура вимог до мікропроцесорного модуля на основі ESP32

1.3 Постановка задач кваліфікаційної роботи

Технічне завдання на кваліфікаційну роботу визначає загальну спрямованість проєкту, очікуваний результат і межі розроблення. Основним результатом має бути апаратно-програмний пристрій, здатний вимірювати базові електричні параметри автомобільної мережі, виконувати їх первинне оброблення та передавати результати користувачу через бездротовий інтерфейс.

Призначення розроблюваного модуля полягає у забезпеченні автоматизованого контролю стану електричної мережі автомобіля. На практиці це означає, що пристрій повинен фіксувати напругу акумуляторної батареї, напругу бортової мережі під час роботи двигуна, можливі просідання напруги під час запуску, а також, за наявності відповідних датчиків, струм заряду або розряду та температуру. Отримані дані мають використовуватися для оцінювання стану акумулятора, роботи генератора, наявності надмірного споживання, нестабільності живлення або інших відхилень, що можуть впливати на роботу електронних систем автомобіля.

На відміну від разового вимірювання мультиметром, модуль повинен працювати автономно й виконувати спостереження протягом певного часу. На відміну від OBD-II адаптера, він має безпосередньо вимірювати електричні параметри, а не лише отримувати дані від електронного блока керування.

Основною функцією розроблюваного пристрою є вимірювання напруги в автомобільній електромережі. У більшості легкових автомобілів використовується 12-вольтова система живлення, однак фактична напруга змінюється залежно від режиму роботи. У стані спокою вона характеризує заряд акумулятора, під час запуску двигуна може короткочасно знижуватися, а після запуску повинна зростати до рівня, що відповідає роботі генератора. Саме ці зміни є важливими діагностичними ознаками, які повинен фіксувати мікропроцесорний модуль.

Другою важливою функцією є перетворення виміряних сигналів у цифрові дані, придатні для оброблення. Оскільки ESP32 працює з нижчими рівнями

напруги, ніж автомобільна мережа, необхідно використати схему узгодження вхідного сигналу. Після цього програмне забезпечення повинно перетворювати значення АЦП у фізичні величини, застосовувати калібрувальні коефіцієнти та фільтрувати випадкові коливання.

Третьою функцією є виявлення подій і відхилень. До таких подій належать знижена напруга акумулятора, надмірне просідання під час запуску двигуна, відсутність заряджання після запуску, підвищена напруга бортової мережі, нестабільність показів або різкі зміни параметрів.

Четвертою функцією є передавання результатів користувачу. Оскільки ESP32 підтримує Wi-Fi та Bluetooth, пристрій може реалізувати локальний або віддалений сценарій моніторингу. У простішому варіанті користувач переглядає значення через вебінтерфейс, створений самим мікроконтролером. У розширеному варіанті дані можуть надсилатися на сервер, у мобільний застосунок або до MQTT-брокера. Для кваліфікаційної роботи доцільно обрати такий варіант, який є достатньо реалістичним для реалізації та водночас демонструє принципи IoT-моніторингу.

З апаратної точки зору пристрій повинен складатися з мікроконтролерного ядра, вимірювальної частини, блоку живлення, захисних елементів і комунікаційної підсистеми. Як мікроконтролерне ядро доцільно використати плату або модуль на основі ESP32. Вона забезпечує достатню продуктивність для опитування датчиків, оброблення даних, організації вебінтерфейсу та бездротового передавання інформації.

Блок живлення має перетворювати напругу автомобільної мережі на стабільну напругу, необхідну для роботи ESP32 і допоміжних компонентів. Для цього може використовуватися DC-DC перетворювач або стабілізатор напруги. Оскільки модуль працюватиме в автомобільній мережі, блок живлення повинен мати запас за вхідною напругою, захист від переполюсування і бажано фільтрацію імпульсних завад.

Модуль зв’язку повинен забезпечувати передавання даних через Wi-Fi або Bluetooth. Контролер ESP32 може виконувати роль невеликого вебсервера, який

надає користувачу сторінку з поточними параметрами. Для серверного варіанта мікроконтролер може періодично надсилати дані у форматі JSON на віддалений сервер або MQTT-брокер.

Для систематизації проєктних рішень доцільно подати дерево рішень, яке показує зв’язок між технічним завданням, основними підсистемами та конкретними варіантами реалізації (рисунок 1.4).

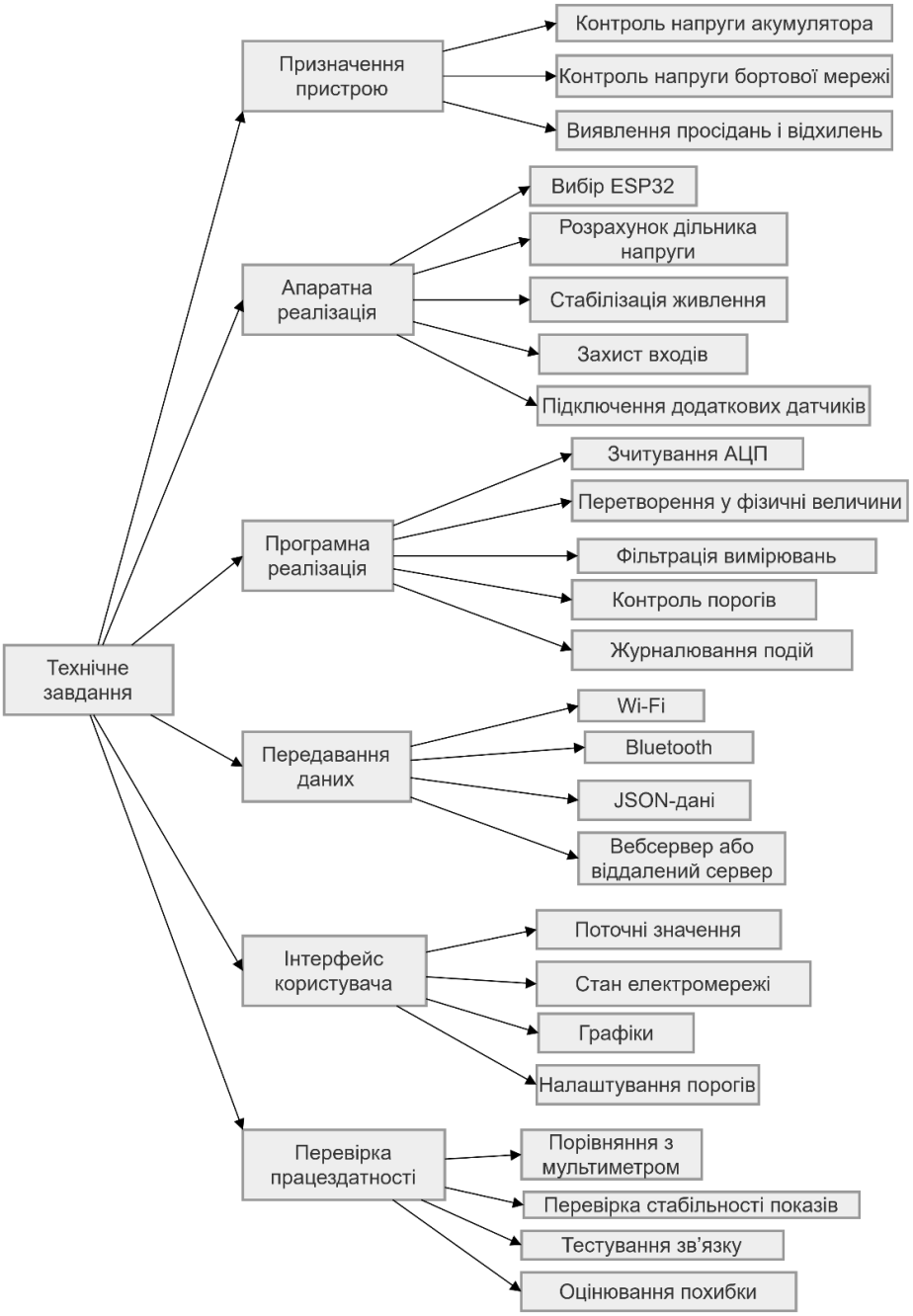


Рисунок 1.4 - Дерево рішень проєкту мікропроцесорного модуля вимірювання параметрів електричної мережі автомобіля

Дерево рішень показує, що технічне завдання розкладається на кілька взаємопов’язаних напрямів: апаратне проєктування, програмну реалізацію, організацію зв’язку, побудову інтерфейсу та перевірку працездатності. Кожен із цих напрямів повинен отримати подальше опрацювання в наступних розділах кваліфікаційної роботи.

На основі аналізу технічного завдання можна сформулювати задачі, які мають бути розв’язані в подальших розділах кваліфікаційної роботи. У третьому розділі необхідно розробити програмну частину модуля. До основних задач цього розділу належать створення алгоритму зчитування вимірювальних каналів, реалізація фільтрації, калібрування, контролю порогових станів і журналювання подій. Окремо слід описати організацію бездротового зв’язку, формат передавання даних і структуру інтерфейсу користувача.

Для перевірки працездатності створеного модуля потрібно порівняти його покази з еталонним цифровим мультиметром, перевірити стабільність вимірювання в різних режимах, оцінити похибку, протестувати передавання даних і переконатися, що користувацький інтерфейс коректно відображає параметри та попередження (таблиця 1.4).

Таблиця 1.4 - Зв’язок технічного завдання із задачами кваліфікаційної роботи

Компонент технічного завдання	Проєктне рішення
Вимірювання напруги автомобільної мережі	Використання дільника напруги та АЦП ESP32
Автономна робота модуля	Використання ESP32 як центрального контролера
Захист електроніки	Стабілізація живлення, захист входів, фільтрація завад
Оброблення даних	Перетворення, фільтрація, калібрування, контроль порогів
Виявлення відхилень	Порогові правила для низької напруги, просідання та перенапруги
Бездротовий моніторинг	Wi-Fi або Bluetooth, передавання даних у форматі JSON
Інтерфейс користувача	Вебсторінка, мобільний перегляд або серверна візуалізація
Перевірка працездатності	Порівняння з мультиметром і тестування в різних режимах

Метою роботи є рзробка мікропроцесорного модуля вимірювання параметрів електричної мережі автомобіля з можливістю віддаленого моніторингу. Об’єкт дослідження - процес вимірювання, передавання та візуалізації параметрів електричної мережі автомобіля засобами. Предмет дослідження - апаратно-програмні засоби побудови мікропроцесорного модуля для вимірювання параметрів електричної мережі автомобіля з підтримкою бездротового зв’язку, передавання даних та відображення результатів вимірювання в інтерфейсі користувача. Завдання кваліфікаційної роботи:

1. дослідити методи IoT-моніторингу транспортних систем;
2. проаналізувати типові несправності електричних систем автомобіля ;
3. розробити апаратну частину модуля з підтримкою бездротового зв’язку.
4. реалізувати протокол передачі даних на віддалений сервер.

2 ПРОЄКТУВАННЯ МІКРОКОНТРОЛЕРНОЇ СИСТЕМИ

2.1 Розробка структурної схеми мікропроцесорного модуля

Проєктування мікропроцесорного модуля вимірювання параметрів електричної мережі автомобіля доцільно розпочинати з побудови структурної схеми пристрою. Така схема дає змогу визначити основні функціональні блоки системи, встановити зв’язки між ними та сформувати загальну логіку проходження вимірювальних даних: від електричної мережі автомобіля до користувача, який отримує результати локально або через засоби віддаленого моніторингу [19-22].

Розроблюваний пристрій призначений для контролю основних параметрів автомобільної електромережі, зокрема напруги бортової мережі, стану акумуляторної батареї, наявності просідань або перенапруги, а також динаміки зміни електричних параметрів під час запуску двигуна, роботи генератора та підключення споживачів. Для цього пристрій має отримувати сигнал від електричної мережі автомобіля, перетворювати його до безпечного для мікроконтролера рівня, виконувати аналого-цифрове перетворення, обробляти результати вимірювання та передавати їх на сервер або мобільний додаток.

Загальна архітектура мікропроцесорного модуля складається з таких основних блоків: автомобільна електромережа як джерело вимірюваного сигналу, вхідний вимірювальний вузол, аналого-цифровий перетворювач, мікроконтролер, блок живлення, модуль бездротового зв’язку, сервер або мобільний додаток, а також інтерфейс користувача. У сукупності ці блоки утворюють систему збору, первинної обробки, передавання та візуалізації даних про стан електромережі автомобіля.

Автомобільна електромережа є об’єктом вимірювання. Вона включає акумуляторну батарею, генератор, електронні блоки керування, освітлення, стартер, реле, запобіжники та інші споживачі електроенергії. Особливістю автомобільної мережі є наявність перехідних процесів, імпульсних завад, короткочасних просідань напруги та можливих стрибків, які виникають під час

запуску двигуна або комутації потужних навантажень. Тому безпосереднє підключення входу мікроконтролера до бортової мережі є недопустимим. Для цього використовується вхідний вимірювальний вузол.

Вхідний вимірювальний вузол виконує функцію узгодження рівнів між автомобільною електромережею та електронною частиною модуля. Його основою може бути резистивний подільник напруги, який зменшує напругу бортової мережі до діапазону, допустимого для входу аналого-цифрового перетворювача мікроконтролера. Додатково до складу цього вузла можуть входити елементи захисту від перенапруги, фільтрування високочастотних завад і згладжування короткочасних імпульсів. Це підвищує надійність роботи пристрою та зменшує ризик пошкодження електронних компонентів.

Аналого-цифровий перетворювач забезпечує перетворення аналогового сигналу напруги у цифрове значення, придатне для подальшої програмної обробки. У найпростішому варіанті може використовуватися вбудований АЦП мікроконтролера. Якщо потрібна вища точність або стабільність вимірювань, доцільно застосувати зовнішній АЦП з більшою розрядністю. На виході АЦП формується цифровий код, який відповідає поточному значенню вимірюваної напруги після масштабування вхідним подільником.

Центральним елементом пристрою є мікроконтролер. Він координує роботу всіх функціональних блоків, зчитує дані з АЦП, виконує перерахунок цифрових значень у фізичні одиниці, фільтрує вимірювальні дані, виявляє критичні режими роботи електромережі та формує пакети даних для передавання. У програмній частині мікроконтролера можуть бути реалізовані алгоритми усереднення, цифрової фільтрації, порівняння з пороговими значеннями, реєстрації мінімальної та максимальної напруги, а також формування повідомлень про аварійні або передаварійні стани.

Блок живлення забезпечує стабільне електроживлення мікропроцесорного модуля від автомобільної бортової мережі. Оскільки напруга в автомобільній мережі може змінюватися в широких межах, блок живлення має виконувати стабілізацію та захист електронної частини пристрою. Для цього можуть

використовуватися DC-DC перетворювачі, лінійні стабілізатори, запобіжники, захисні діоди та фільтрувальні конденсатори. Вихідна напруга блоку живлення повинна відповідати вимогам мікроконтролера, модуля зв’язку та інших електронних компонентів, наприклад 5 В або 3,3 В.

Модуль бездротового зв’язку забезпечує передавання результатів вимірювання на зовнішній пристрій або віддалений сервер. Залежно від умов експлуатації можуть використовуватися Wi-Fi, Bluetooth, BLE або GSM/LTE-модулі. Wi-Fi доцільний у випадку, коли автомобіль перебуває в зоні доступу локальної мережі або використовується точка доступу. Bluetooth або BLE зручні для передавання даних безпосередньо на мобільний телефон користувача на невеликій відстані. GSM/LTE-зв’язок може застосовуватися для повністю віддаленого моніторингу, коли автомобіль перебуває поза межами локальної мережі.

Сервер або мобільний додаток призначені для приймання, збереження, обробки та візуалізації отриманих даних. Серверна частина може зберігати історію вимірювань, будувати графіки зміни напруги, фіксувати аварійні події та надавати доступ до даних через вебінтерфейс. Мобільний додаток може виконувати функцію локального інтерфейсу користувача, відображати поточну напругу, стан акумулятора, попередження про відхилення параметрів і коротку історію вимірювань.

Інтерфейс користувача є кінцевою ланкою системи моніторингу. Він дає змогу користувачеві отримувати інформацію про стан електромережі автомобіля у зрозумілій формі. Доцільно передбачити відображення поточного значення напруги, статусу акумулятора, повідомлень про низьку або підвищену напругу, графіка зміни параметрів у часі та журналу подій. У разі реалізації віддаленого моніторингу користувач може контролювати стан електромережі навіть без безпосереднього доступу до автомобіля.

Структурна схема мікропроцесорного модуля відображає послідовність перетворення інформації від фізичного електричного сигналу до цифрових даних, придатних для аналізу та відображення (таблиця 2.1).

Таблиця 2.1 - Опис структурних блоків мікропроцесорного модуля

Назва блоку	Призначення	Вхідні сигнали	Вихідні сигнали	Можливі компоненти для реалізації
Автомобільна електромережа	Формування вимірюваного електричного сигналу, що характеризує стан	Напруга акумулятора, напруга генератора, перехідні процеси роботи навантажень	Аналоговий сигнал напруги бортової мережі	Акумулятор 12 В, генератор, стартер, споживачі електроенергії автомобіля
АЦП	Перетворення аналогового сигналу напруги у цифровий код для подальшої обробки	Масштабована аналогова напруга з вимірювального вузла	Цифрове значення виміряної напруги	Вбудований АЦП ESP32; зовнішній АЦП ADS1115
Мікроконтролер	Керування процесом вимірювання, зчитування даних з АЦП, обробка результатів, формування повідомлень	Цифрові значення з АЦП, службові сигнали від модуля зв’язку, параметри налаштувань	Оброблені дані, пакети для передавання, керуючі сигнали	ESP32, STM32, Arduino Nano, Raspberry Pi Pico W
Алгоритм обробки даних	фільтрація, усереднення, виявлення відхилень і формування статусу системи	Цифрові вимірювальні дані з АЦП	Значення напруги у фізичних одиницях, статуси, журнал подій	алгоритми усереднення, порогового контролю, цифрової фільтрації
Блок живлення	Забезпечення стабільного живлення від автомобільної мережі	Напруга бортової мережі автомобіля	Стабілізована напруга 5 В або 3,3 В	DC-DC перетворювач, AMS1117, LM2596, запобіжник, фільтрувальні конденсатори, захисний діод
Модуль бездротового зв’язку	Передавання результатів вимірювання на сервер або мобільний додаток	Оброблені дані від мікроконтролера	Бездротові пакети даних	Wi-Fi ESP32, Bluetooth/BLE ESP32, HC-05, GSM/LTE-модуль SIM800L
Сервер або мобільний додаток	Приймання, збереження, аналіз і візуалізація даних моніторингу	Дані, отримані через Wi-Fi, Bluetooth, BLE або GSM/LTE	журнали вимірювань, індикатори стану	Вебсервер, MQTT-брокер, база даних, мобільний додаток
Інтерфейс користувача	Надання користувачеві інформації про стан електромережі автомобіля	Оброблені та візуалізовані дані з сервера або мобільного додатка	Повідомлення, числові значення, попередження	вебсторінка, інформаційна панель

Основний інформаційний потік проходить за таким маршрутом:

```
електрична мережа автомобіля → вхідний подільник напруги →
АЦП мікроконтролера → алгоритм обробки →
модуль Wi-Fi/Bluetooth → сервер або мобільний додаток →
користувач
```

Така архітектура є модульною, оскільки кожен функціональний блок може бути замінений або вдосконалений без повної зміни структури пристрою. Структурна схема пристрою на рисунку 2.1



Рисунок 2.1 - Структурна схема пристрою

Мікроконтролер виконує програмну обробку отриманих даних. Він перераховує цифровий код АЦП у значення напруги, виконує фільтрацію, порівнює результат із допустимими межами та формує інформаційні повідомлення. Оброблені дані передаються через модуль Wi-Fi або Bluetooth на сервер чи мобільний додаток. На останньому етапі користувач отримує результати у вигляді числових показників, графіків, статусів або попереджень.

Окремо на схемі виділено блок живлення, який отримує енергію від автомобільної електромережі та формує стабілізовану напругу для мікроконтролера і модуля зв’язку.

Після визначення стану електромережі формується інформаційне повідомлення. Повідомлення може бути сформоване у вигляді текстового рядка, JSON-об’єкта або MQTT-повідомлення.

2.2 Розробка функційної схеми мікропроцесорного модуля

Функційна схема мікропроцесорного модуля деталізує не лише склад пристрою, а й послідовність його роботи під час вимірювання параметрів електричної мережі автомобіля. У проєктованому модулі як центральний обчислювальний елемент доцільно використати мікроконтролер ESP32. Його перевагою є наявність достатньої обчислювальної продуктивності, підтримки Wi-Fi і Bluetooth, а також можливість реалізації локальної та віддаленої взаємодії з користувачем. Завдяки цьому ESP32 може одночасно виконувати функції вимірювального контролера, блоку попередньої обробки даних і комунікаційного модуля.

Робота пристрою починається з підключення до електричної мережі автомобіля. Напруга бортової мережі надходить на вхідний вимірювальний вузол. Отримані цифрові дані обробляються програмним алгоритмом, який виконує перерахунок у фізичні одиниці, фільтрацію, перевірку порогових значень і формування інформаційного повідомлення. На першому етапі після подачі живлення виконується ініціалізація пристрою. Мікроконтролер налаштовує режими входів і виходів, параметри бездротового зв’язку, а також змінні, які використовуються для накопичення та фільтрації вимірювань. Якщо передбачено передавання даних на сервер, додатково ініціалізується мережеве з’єднання, протокол передавання даних і формат повідомлень.

Одиничне значення напруги може містити випадкові коливання, спричинені електричними завадами, нестабільністю живлення, імпульсними процесами в автомобільній мережі або похибками самого перетворення. Тому наступним етапом є цифрова фільтрація. Для простого програмного згладжування використано усереднення за кількома вимірюваннями:

$$U_{\text{avg}} = \frac{U_1 + U_2 + \cdots + U_m}{m},$$

де U_{avg} - усереднене значення напруги;

$U_1, U_2, \dots, U_m$- окремі виміряні значення напруги;

m - кількість вимірювань у вибірці.

Також може застосовуватися експоненційне згладжування, яке дає змогу зменшити вплив випадкових коливань і водночас зберегти реакцію на зміну напруги:

$$U_f(k) = \alpha \cdot U(k) + (1 - \alpha) \cdot U_f(k - 1),$$

де $U_f(k)$ - відфільтроване значення напруги на поточному кроці;

$U(k)$ - поточне виміряне значення напруги;

$U_f(k - 1)$ - відфільтроване значення напруги на попередньому кроці;

α - коефіцієнт згладжування в межах від 0 до 1, тобто $0 < \alpha < 1$.

Після фільтрації виконується аналіз стану електричної мережі автомобіля. Для цього відфільтроване значення напруги порівнюється з попередньо заданими порогами.

Функцію визначення стану електромережі можна подати у вигляді правила:

якщо $U < U_{\text{min}}$, то стан - низька напруга,

якщо $U_{\text{min}} <= U <= U_{\text{max}}$, то стан – нормальний,

якщо $U > U_{\text{max}}$, то стан - підвищена напруга,

де U - виміряне або відфільтроване значення напруги;

U_{min} - нижній допустимий поріг;

U_{max} - верхній допустимий поріг.

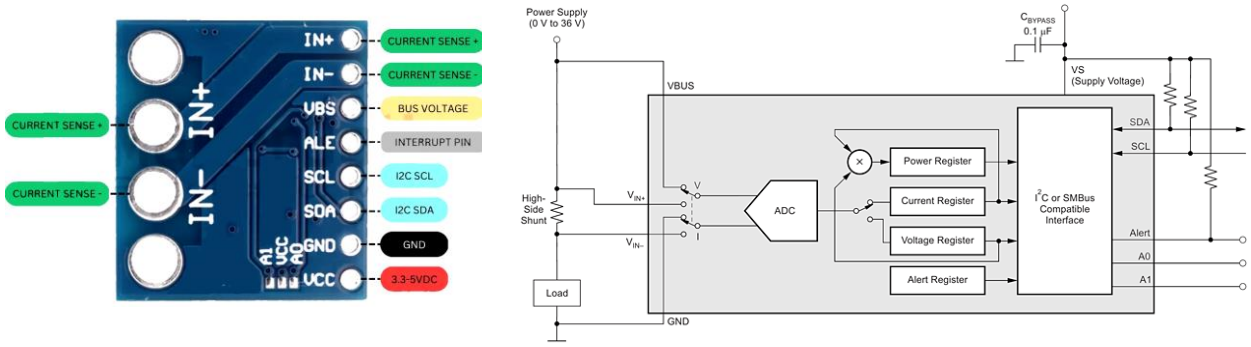
Після визначення стану формується інформаційне повідомлення. До його складу входять поточне значення напруги, відфільтроване значення, час вимірювання, стан системи, ознака аварійного режиму, а також службові параметри пристрою. Повідомлення може бути сформоване у вигляді текстового

рядка, JSON-об’єкта або MQTT-повідомлення. Для передавання на сервер зручно використовувати формат JSON, оскільки він є зрозумілим, компактним і легко обробляється вебзастосунками.

На завершальному етапі дані передаються користувачу. Якщо використовується Wi-Fi, ESP32 може надсилати повідомлення на сервер, MQTT-брокер або вебзастосунок. Якщо використовується Bluetooth або BLE, дані можуть передаватися безпосередньо на мобільний додаток. У разі виявлення аварійного або передаварійного стану система може формувати окреме попередження, яке відображається в інтерфейсі користувача або надсилається у вигляді push-повідомлення. Алгоритм роботи мікропроцесорного модуля можна представити як послідовність таких кроків:

1. Подати живлення на пристрій від автомобільної електромережі.
2. Виконати стабілізацію живлення для ESP32 та модуля зв’язку.
3. Ініціалізувати мікроконтролер, інтерфейси зв’язку та службові змінні.
4. Зчитати цифрове значення напруги і струму.
5. Виконати фільтрацію отриманого значення напруги.
6. Порівняти відфільтроване значення з порогами $U_{\min}$ і $U_{\max}$.
7. Визначити стан електромережі: низька напруга, нормальний стан або підвищена напруга.
8. Сформувати інформаційне або попереджувальне повідомлення.
9. Передати дані через Wi-Fi на сервер чи мобільний додаток.
10. Відобразити користувачу поточний стан електричної мережі автомобіля.
11. Повторити цикл вимірювання з установленим періодом дискретизації.

Для реалізації вимірювань обрано готову плату на основі INA226. Плата INA226 є цифровим монітором струму, напруги та потужності з інтерфейсом I2C (рисунок 2.2). Вона вимірює напругу шини живлення, падіння напруги на вимірювальному шунті, а також дає змогу програмно обчислювати струм і потужність навантаження [4, 5].



а) інтерфейс плати б) принципова схема роботи модуля

Рисунок 2.2 - Плата INA226

Використання INA226 є доцільним для цього проєкту з кількох причин. По-перше, мікросхема підтримує вимірювання напруги шини до 36 В, що достатньо для контролю 12-вольтової автомобільної мережі з урахуванням підвищення напруги під час роботи генератора. По-друге, передавання даних через I2C спрощує підключення до ESP32 і зменшує залежність точності вимірювання від вбудованого АЦП мікроконтролера. По-третє, INA226 дає змогу вимірювати не лише напругу, а й струм та потужність, що розширює функціональні можливості модуля моніторингу.

У запропонованому варіанті INA226 підключається до ESP32 за інтерфейсом I2C. Лінія SDA підключається до GPIO21, лінія SCL - до GPIO22, живлення модуля здійснюється від 3,3 В, а спільна земля з'єднується із землею електронної частини пристрою. Вимірювальний шунт вмикається послідовно в контрольоване коло живлення. Падіння напруги на шунті вимірюється мікросхемою, після чого струм визначається за законом Ома.

Основна формула для визначення струму через шунт має вигляд:

$$I = \frac{U_{\text{shunt}}}{R_{\text{shunt}}},$$

де I - струм у контрольованому колі;

U_{shunt} - падіння напруги на вимірювальному шунті;

R_{shunt}- опір шунта.

Потужність навантаження може бути визначена за формулою:

$$P = U_{bus} \cdot I,$$

де P- електрична потужність навантаження;

U_{bus}- напруга автомобільної електромережі;

I- виміряний струм.

Для прототипу доцільно використати готовий модуль INA226 з зовнішнім шунтом. Наприклад, для контролю струмів до 10 А можна застосувати шунт 0,01 Ом. У такому випадку при струмі 10 А падіння напруги на шунті становитиме 0,1 В, а потужність, що розсіюється на шунті, дорівнюватиме 1 Вт. Для вимірювання великих струмів, характерних для стартера або потужних автомобільних споживачів можна передбачити альтернативний варіант ACS758 на основі датчика Холла. Мікроконтрлер ESP32 зчитує готові цифрові регістри мікросхеми INA226 (рисунок 2.3). Це підвищує стабільність вимірювання та спрощує програмну частину, оскільки мікроконтролер отримує цифрові значення напруги шини, напруги на шунті, струму та потужності через I2C.

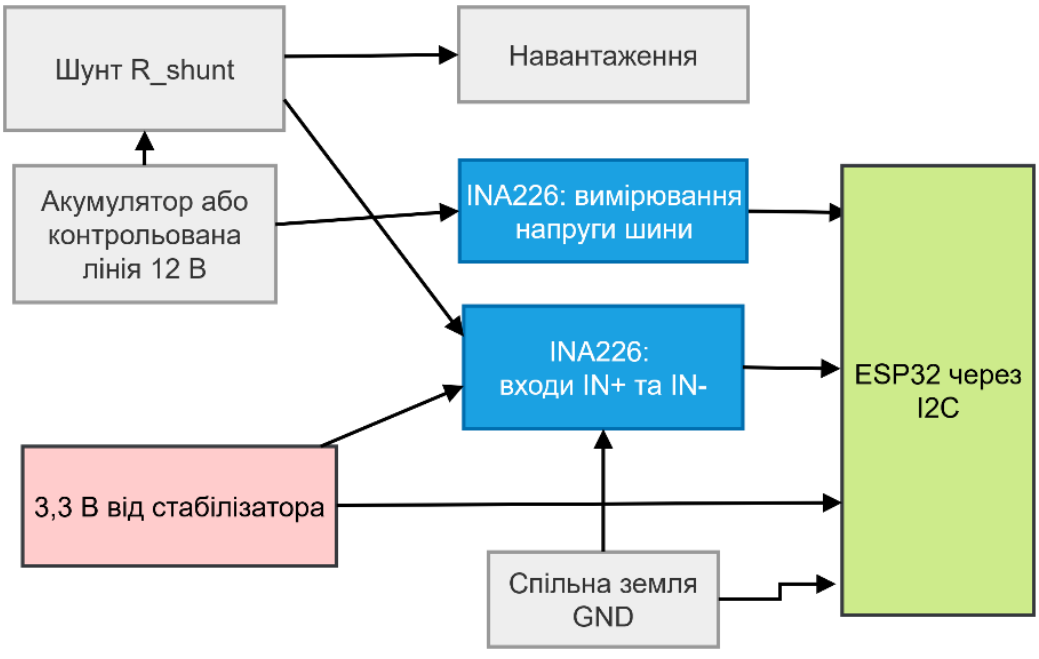


Рисунок 2.3 -Схема підключення INA226 до ESP32

2.3 Розробка принципової схеми мікропроцесорного модуля

Принципова схема мікропроцесорного модуля розробляється на основі вибраної елементної бази: мікроконтролера ESP32, цифрового вимірювального модуля INA226, стабілізатора живлення, захисних елементів, індикатора стану та з'єднувальних клем для підключення до автомобільної електромережі. На відміну від структурної та функційної схем, принципова схема повинна показувати конкретну логіку електричного з'єднання основних компонентів.

У базовому варіанті пристрою ESP32 виконує функції керування, обробки даних і бездротового передавання. Оскільки ESP32 уже має вбудовані Wi-Fi та Bluetooth, окремий зовнішній модуль зв'язку не потрібний. Це спрощує схему, зменшує кількість компонентів і підвищує компактність пристрою. Для вимірювання напруги, струму та потужності використовується модуль INA226, який підключається до ESP32 за інтерфейсом I2C.

Вхід 12 В автомобільної мережі подається на захисний вузол, до складу якого входять запобіжник, діод захисту від переполюсування, TVS-діод для обмеження імпульсних перенапруг і фільтрувальний конденсатор. Після захисту напруга надходить на DC-DC перетворювач, який формує стабілізовану напругу 5 В або 3,3 В для живлення ESP32 та вимірювального модуля. Для макетного виконання зручно застосувати готовий понижувальний модуль LM2596 або компактний DC-DC модуль типу MP1584.

Вимірювальна частина реалізується на INA226. Вимірювальний шунт вмикається послідовно в контрольовану лінію живлення. Входи IN+ та IN- модуля INA226 підключаються до виводів шунта, що дає змогу виміряти падіння напруги на ньому та обчислити струм. Напруга шини також вимірюється мікросхемою INA226, тому окремий подільник напруги для основного вимірювання не є обов'язковим. Резистивний подільник можна залишити як допоміжний канал контролю напруги або як спрощений варіант для

моделювання у Proteus, Multisim чи TinkerCAD, якщо модель INA226 у середовищі недоступна.

Для допоміжного аналогового вимірювання напруги може бути використаний подільник R1–R2. Верхній резистор R1 підключається до захищеної лінії 12 В, нижній резистор R2 - до загальної землі. Середня точка подільника підключається до аналогового входу ESP32, наприклад GPIO34. Щоб захистити вхід мікроконтролера, доцільно додати послідовний резистор, конденсатор до землі для фільтрації та стабілітрон або обмежувальний діод на рівень 3,3 В.

Індикація стану пристрою реалізується за допомогою світлодіода, підключеного до одного з цифрових виходів ESP32 через струмообмежувальний резистор. Наприклад, зелений світлодіод може показувати нормальну роботу, а червоний - аварійне або передаварійне відхилення напруги. У мінімальному варіанті достатньо одного світлодіода, який сигналізує про живлення, підключення до мережі або передавання даних.

Усі електронні вузли пристрою повинні мати спільну землю (таблиця 2.4). Загальна земля автомобільної мережі, стабілізатора живлення, ESP32, INA226, подільника напруги та індикатора об’єднується в одну точку схеми.

Таблиця 2.4 - Елементна база мікропроцесорного модуля

Елемент	Призначення	Компонент	Основні параметри
Мікроконтролер	Керування вимірюванням, обробка даних, передавання результатів	ESP32 DevKit V1	Живлення 3,3 В, Wi-Fi, Bluetooth, I2C, ADC
Вимірювальна мікросхема	Вимірювання напруги, струму та потужності	INA226 module	I2C, вимірювання шини до 36 В, робота із зовнішнім шунтом
Вимірювальний шунт	Перетворення струму в мале падіння напруги	R_shunt 0,01 Ом або 0,001–0,002 Ом	Потужність не менше 2 Вт для малих струмів; більший запас для силових кіл

Продовження таблиці 2.4

Допоміжний подільник напруги	Масштабування 12 В до рівня входу ESP32	R1 = 100 кОм, R2 = 27 кОм	Орієнтовний вихід до 3,3 В при напрузі близько 15 В
Стабілізатор живлення	Пониження напруги автомобільної мережі до рівня живлення електроніки	LM2596 або MP1584 DC-DC module	Вхід 7–24 В; вихід 5 В чи 3,3 В
Захист від переполюсування	Захист схеми при неправильному підключенні живлення	Діод Шотткі або P-канальний MOSFET	Струм із запасом відповідно до навантаження
Захист від імпульсних перенапруг	Обмеження короткочасних стрибків напруги в автомобільній мережі	TVS-діод для 12 В лінії	Напруга спрацювання вище робочої напруги мережі
Запобіжник	Захист кола живлення від надмірного струму	Плавкий запобіжник або полімерний PTC	Номінал відповідно до споживання пристрою
Фільтрувальні конденсатори	Зменшення пульсацій і завад живлення	100 мкФ + 0,1 мкФ	Електролітичний і керамічний конденсатори
Світлодіод індикації	Відображення стану живлення або аварійного режиму	LED + резистор 220–330 Ом	Підключення до GPIO ESP32
Клемник живлення	Підключення до автомобільної мережі	Гвинтовий клемник 2 pin	Лінії +12 В і GND
Клемник навантаження	Підключення контрольованого кола через шунт	Гвинтовий клемник 2 pin	Вхід і вихід контрольованої лінії

Принципова схема системи зображена на рисунку 2.4. До вхідного клемника J1 підключається автомобільна електромережа: контакт J1.1 - до лінії +12 В, контакт J1.2 - до загальної землі GND. Після вхідного клемника в ланцюг

живлення вмикається запобіжник F1. Далі встановлюється елемент захисту від переполюсування D1 і TVS-діод VD1, підключений між лінією +12 В і GND. Паралельно до входу живлення встановлюються фільтрувальні конденсатори C1 і C2. Захищена напруга +12 В подається на вхід DC-DC перетворювача U1. На виході U1 формується стабілізована напруга 5 В або 3,3 В. Модуль INA226 підключається до ESP32 за інтерфейсом I2C. Вивід SDA модуля INA226 з'єднується з GPIO21 ESP32, вивід SCL - з GPIO22 ESP32. Виводи VCC і GND INA226 підключаються відповідно до 3,3 В і загальної землі.

Вимірювальний шунт R_{shunt} вмикається послідовно в контрольовану лінію живлення. Вхід IN+ мікросхеми INA226 підключається до боку шунта, ближчого до джерела живлення, а IN- до боку шунта, ближчого до навантаження. Така схема дає змогу вимірювати падіння напруги на шунті та визначати струм контрольованого кола.

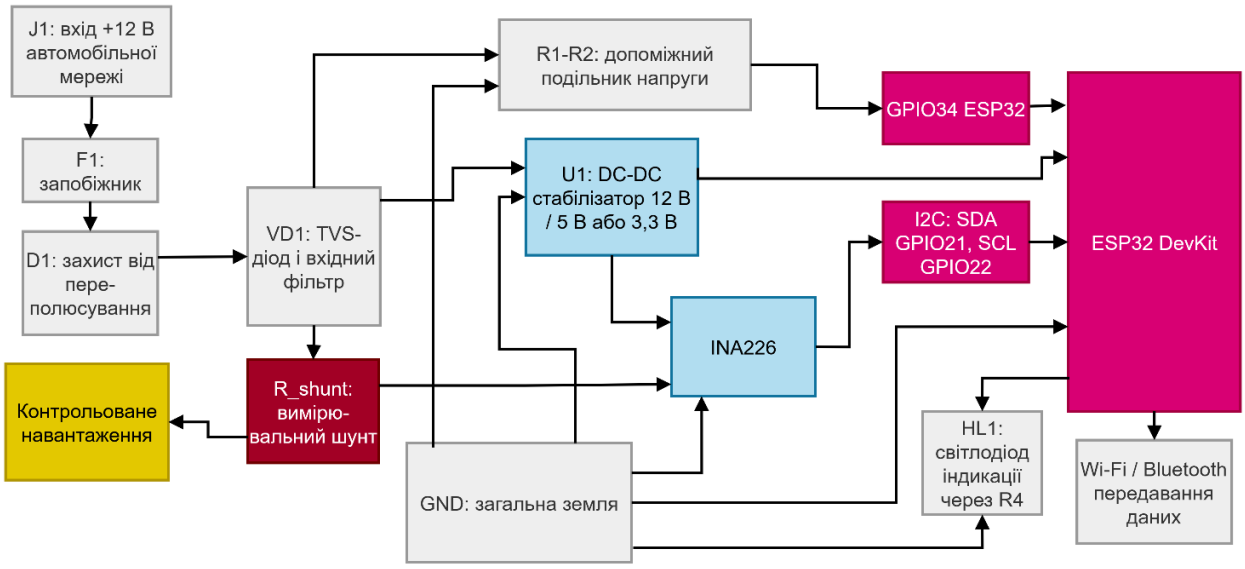


Рисунок 2.4 - Узагальнена принципова схема з'єднань

Допоміжний подільник напруги R1–R2 підключений паралельно до захищеної лінії +12 В. Резистор R1 з'єднується з +12 В, резистор R2 - із GND, а середня точка подільника підключається до аналогового входу GPIO34 ESP32 через захисний резистор R3. Конденсатор C3 між GPIO34 і GND виконує

функцію простого RC-фільтра. Цей канал може використовуватись для резервного контролю напруги.

Світлодіод HL1 підключається до цифрового виходу GPIO2, через струмообмежувальний резистор R4 номіналом 220–330 Ом. За допомогою цього світлодіода можна показувати стан живлення, підключення до Wi-Fi або наявність аварійного повідомлення.

Для забезпечення вимог до складу системи додано три вимірювальні модулі INA226, OLED-дисплей, годинник реального часу та датчик температури. Три модулі INA226 дають змогу контролювати декілька ділянок автомобільної електромережі, наприклад акумуляторну лінію, лінію генератора або окреме навантаження. OLED-дисплей забезпечує локальне відображення поточних параметрів і короткого графіка напруги. Годинник реального часу використовується для часових міток у журналі подій і під час побудови графіків. Датчик температури використовується для контролю температурного режиму електронного вузла або контрольованої ділянки.

Конфігурація I2C-шини (таблиця 2.5) передбачає спільне підключення модулів INA226, OLED-дисплея та RTC до ліній GPIO21 і GPIO22 ESP32. Для уникнення конфлікту пристроїв на шині кожен модуль має власну адресу:

```
INA226 #1 - 0x40, перша контрольована лінія
INA226 #2 - 0x41, друга контрольована лінія
INA226 #3 - 0x44, третя контрольована лінія
OLED-дисплей - 0x3C,
RTC DS3231 - 0x68  Формування часових міток
```

Таблиця 2.5 - підключення модулів до ESP32

Вивід ESP32	Підключення	Призначення
3V3	VCC INA226 #1, INA226 #2, INA226 #3, OLED, RTC	Живлення цифрових модулів 3,3 В
GND	GND INA226 #1, INA226 #2, INA226 #3, OLED, RTC	Спільна земля схеми
GPIO21	SDA INA226 #1, INA226 #2, INA226 #3, OLED, RTC	Лінія даних I2C

Продовження таблиці 2.5

GPIO22	SCL INA226 #1, INA226 #2, INA226 #3, OLED, RTC	Лінія тактування I2C
GPIO2	Світлодіод через резистор 220–330 Ом	Локальна індикація стану
GPIO4	Датчик температури DS18B20	Контроль температури вузла або середовища

Додавання OLED-дисплея і годинника RTC доповнює віддалений інтерфейс. OLED використовується для локального контролю без сервера, а RTC забезпечує точну часову прив’язку вимірювань. Завдяки цьому виконуються вимоги щодо поточних значень, графіків, попереджень, журналювання подій і повторюваної перевірки результатів у часі

2.4. Розробка процедур передавання даних

Для передавання результатів вимірювання від ESP32 до віддаленого інтерфейсу доцільно використати простий прикладний протокол на основі JSON-повідомлень. Такий формат є зручним для мікроконтролера, сервера та мобільного додатка, оскільки має зрозумілу структуру й легко обробляється програмними засобами.

У базовому варіанті ESP32 формує повідомлення з періодом 1–5 с або одразу після виявлення аварійного стану (таблиця 2.6). Передавання може виконуватися через Wi-Fi на HTTP-сервер або MQTT-брокер. Для локального режиму допускається передавання через Bluetooth/BLE на мобільний додаток. Основними полями повідомлення є ідентифікатор пристрою, напруга, струм, потужність, статус системи та час вимірювання. Приклад структури повідомлення:

```
{
  "device_id": "car_monitor_01",
  "voltage": 13.8,
  "current": 2.4,
  "power": 33.1,
  "status": "normal",
  "event": "periodic",
  "timestamp": "2026-05-03T18:30:00"
}
```

Таблиця 2.6 - Поля повідомлення протоколу передавання

Поле	Призначення	Приклад значення
device_id	Ідентифікація конкретного модуля	car_monitor_01
voltage	Виміряне значення напруги, В	13.8
current	Виміряне значення струму, А	2.4
power	Розрахована потужність, Вт	33.1
status	Узагальнений стан електромережі	normal, low_voltage, overvoltage
event	Тип повідомлення	periodic, warning, alarm
timestamp	Час формування повідомлення	2026-05-03T18:30:00

У разі нормального режиму повідомлення передається періодично. Якщо напруга виходить за допустимі межі, ESP32 формує позачергове повідомлення з типом event = warning або event = alarm. Це дає змогу не лише спостерігати за поточними параметрами, а й фіксувати небезпечні режими роботи автомобільної електромережі. Для тестування прототипу і передачі даних на ноутбук інформація передається через послідовний інтерфейс і USB кабель у текстовомоу вигляді.

3 РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ТЕСТУВАННЯ МІКРОПРОЦЕСОРНОЇ СИСТЕМИ

3.1 Вибір середовища моделювання і розробки

Для дослідження роботи мікропроцесорного модуля вимірювання параметрів електричної мережі автомобіля необхідно обрати середовище, яке дає змогу перевірити як електричну частину пристрою, так і алгоритм роботи мікроконтролера. Оскільки розроблюваний модуль побудований на ESP32 і передбачає обробку вимірювальних даних, фільтрацію, пороговий аналіз та передавання повідомлень через бездротовий інтерфейс, середовище має підтримувати програмування мікроконтролера, роботу з аналоговими або цифровими вимірювальними сигналами та зручне налагодження коду.

Для цієї задачі можуть бути використані Proteus Design Suite, TinkerCAD, Arduino IDE, Multisim і Simulink. Кожне з цих середовищ має власне призначення. Proteus орієнтований на моделювання електронних схем разом із мікроконтролерами. TinkerCAD зручний для простого навчального моделювання схем Arduino-рівня. Multisim добре підходить для дослідження аналогових електронних вузлів. Simulink є потужним середовищем математичного і системного моделювання. Arduino IDE, у свою чергу, є основним середовищем для написання, перевірки та завантаження програмного коду в ESP32.

Arduino IDE є найбільш доцільним середовищем для програмної реалізації та перевірки алгоритму роботи ESP32 (рисунок 3.1). Воно підтримує розроблення скетчів для ESP32, роботу з бібліотеками для I2C, Wi-Fi, Bluetooth, INA226, серійним портом і монітором даних. Для кваліфікаційної роботи Arduino IDE доцільно обрати як основне середовище, оскільки головним результатом є працездатний алгоритм зчитування вимірювальних даних, їх фільтрації, порівняння з порогами та передавання користувачу. Через Serial Monitor або Serial Plotter можна контролювати значення напруги, струму, потужності та перевіряти реакцію алгоритму на зміну вхідних параметрів.

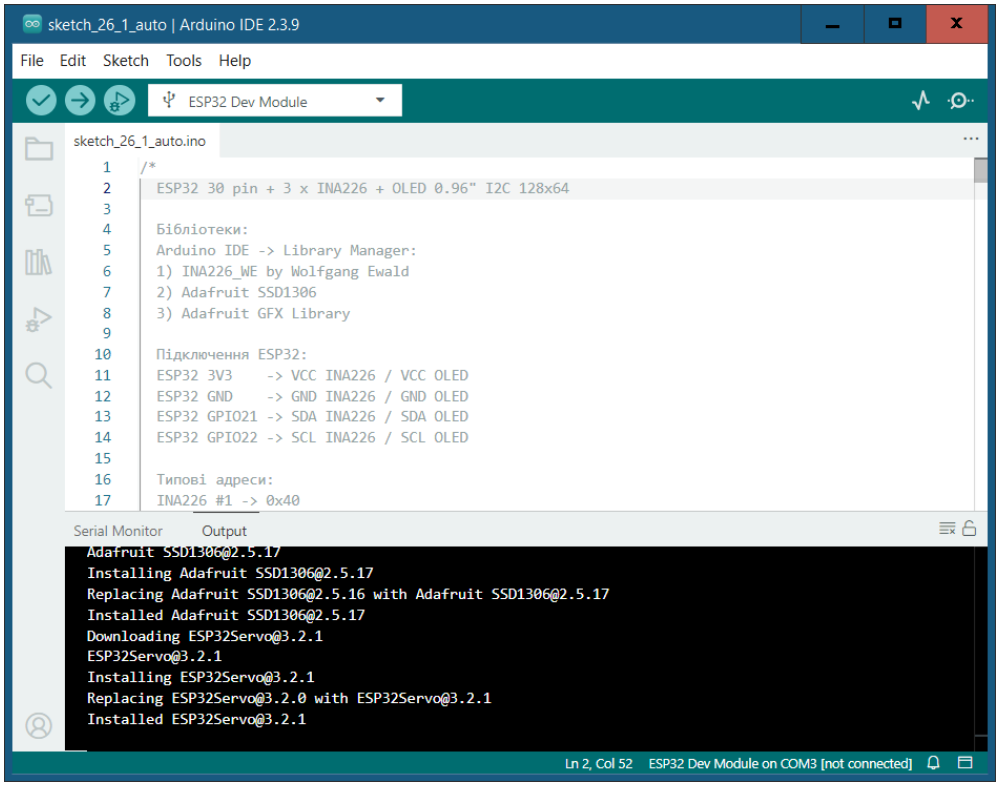


Рисунок 3.1 – Розроблення програми в Arduino IDE

У межах дослідження Arduino IDE використовується для таких задач:

1. розроблення програмного коду для ESP32;
2. ініціалізації інтерфейсу I2C і вимірювального модуля INA226;
3. зчитування значень напруги, струму та потужності;
4. перевірки алгоритму фільтрації вимірювань;
5. порівняння параметрів з допустимими межами;
6. формування текстових і JSON-повідомлень;
7. виведення результатів у Serial Monitor;
8. підготовка до передавання даних через Wi-Fi.

Код програми для мікроконтролера наведно в додатку А. Алгоритм роботи наведено на кресленні КР.КІ.11148936.00.00.001.С1. Основною є функція readChannel(), яка зчитує дані з конкретного INA226 і повертає напругу, струм та потужність. Завдяки трьом адресам I2C один ESP32 опитує три незалежні вимірювальні канали. Функція updateFilteredVoltage() виконує експоненційне згладжування. Це зменшує випадкові коливання показів і робить графік стабільнішим. Функція getStatus() порівнює напругу з порогами. Саме вона

формує діагностичні стани normal, low_voltage, overvoltage або alarm. Функція makeJson() формує JSON-повідомлення з часовою міткою RTC. Таке повідомлення виводиться в Serial Monitor або на сервер. Функція drawOled() виводить на екран OLED поточні значення напруги за останні вимірювання. Це забезпечує локальну візуалізацію.

Процедура оброблення виміряних параметрів починається зі зчитування даних із вимірювальних модулів INA226. Для кожного каналу мікроконтролер отримує значення напруги шини, струму та потужності. Після зчитування виконується первинна перевірка коректності даних. Якщо значення напруги відсутнє, дорівнює нулю або є некоректним, канал позначається як несправний, а його параметрам присвоюються нульові значення. Для фільтрації використовується експоненційне згладжування. Якщо попереднього відфільтрованого значення ще немає, перше виміряне значення приймається як початкове. Для наступних вимірювань нове відфільтроване значення обчислюється з урахуванням поточного вимірювання та попереднього результату фільтрації:

$$U_f = \alpha \cdot U_{new} + (1 - \alpha) \cdot U_{f_prev},$$

де: U_f - нове відфільтроване значення напруги;

U_{new} - поточне виміряне значення напруги;

U_{f_prev} - попереднє відфільтроване значення напруги;

α - коефіцієнт згладжування.

Після фільтрації значення напруги записується в буфер графіка. Буфер зберігає останні вимірювання і використовується для побудови короткого графіка на OLED-дисплеї. Нове значення записується в поточну позицію буфера, після чого індекс зміщується до наступної комірки. Коли кінець буфера досягнуто, запис продовжується з початку, тобто буфер працює циклічно.

Далі відфільтроване значення напруги порівнюється з пороговими рівнями (рисунок 3.2). Якщо сигнал від датчика відсутній, формується статус

alarm_no_signal. Якщо напруга нижча за аварійний нижній поріг, формується alarm_low_voltage.

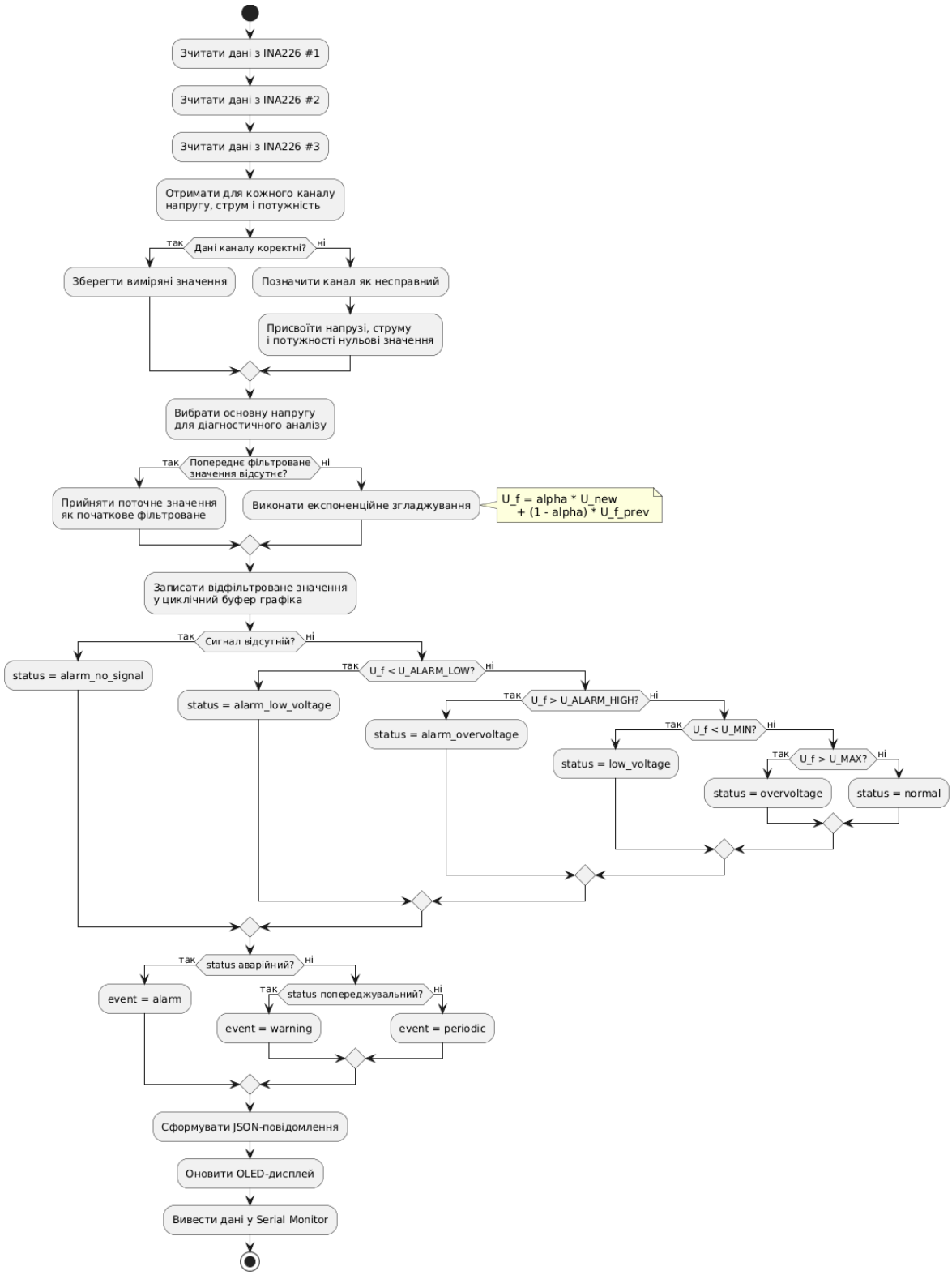


Рисунок 3.2 -UML діаграма процедури оброблення і фільтрації виміряних параметрів

Якщо напруга вища за аварійний верхній поріг, формується alarm_overvoltage. Якщо значення не аварійне, але виходить за межі нормального діапазону, формується попереджувальний статус low_voltage або overvoltage. Якщо напруга перебуває в допустимих межах, встановлюється статус normal.

На завершальному етапі на основі статусу визначається тип події. Для аварійних станів формується подія alarm, для попереджувальних - warning, для нормальної роботи - periodic. Після цього ESP32 формує JSON-повідомлення, виводить дані у Serial Monitor, оновлює OLED-дисплей і за потреби передає повідомлення на сервер.

3.2 Розробка моделі мікропроцесорного модуля

Модель мікропроцесорного модуля розробляється для перевірки працездатності основних функцій пристрою: вимірювання напруги автомобільної електромережі, обробки отриманих даних, визначення стану мережі та виведення результатів користувачу. Модель пристрою розглядається як програмно-апаратна. Вона передбачає використання плати ESP32, вимірювального модуля INA226, джерела напруги, програмної логіки обробки та умовної моделі передавання даних через послідовний порт або бездротовий інтерфейс.

У межах моделі автомобільна електромережа подається як джерело постійної напруги з можливістю зміни значення (таблиця 3.1). Для імітації різних режимів роботи бортової мережі використовуються типові рівні напруги: знижена напруга акумулятора, нормальна напруга спокою, напруга під час роботи генератора та підвищена напруга. Це дозволить перевірити, чи правильно алгоритм визначає стан електромережі та формує відповідне повідомлення. Модель вимірювального вузла реалізується через INA226. Модуль вимірює

напругу шини, падіння напруги на шунті, струм і потужність, а ESP32 зчитує ці значення через інтерфейс I2C.

Джерело напруги автомобільної мережі у моделі задається як регульоване джерело постійної напруги. Для перевірки алгоритму доцільно використовувати кілька контрольних значень: 11,5 В для імітації розрядженого акумулятора, 12,6 В для нормального стану акумулятора без роботи двигуна, 13,8–14,4 В для режиму роботи генератора, а також 15,0 В і вище для імітації підвищеної напруги. Зміна вхідної напруги дає змогу перевірити реакцію програмного забезпечення на різні стани електричної мережі. У програмній частині ESP32 виконує зчитування вимірювальних даних. Якщо використовується INA226, мікроконтролер отримує готові значення напруги, струму та потужності через I2C. Для зменшення випадкових коливань застосовується усереднення кількох вимірювань або експоненційне згладжування.

Після обробки даних виконується пороговий аналіз. У моделі задаються нижній і верхній пороги напруги. Якщо виміряне значення є нижчим за мінімальний поріг, пристрій формує повідомлення про знижену напругу. Якщо значення перебуває в допустимих межах, формується повідомлення про нормальний стан. Якщо напруга перевищує верхній поріг, формується попередження про підвищену напругу.

Таблиця 3.1 - Параметри моделі мікропроцесорного модуля

Елемент моделі	Параметр	Значення	Призначення
Джерело напруги автомобільної мережі	Діапазон напруги	11,5–15,0 В	Імітація різних режимів роботи акумулятора та генератора
Джерело напруги	Номінальна напруга	12,6 В	Моделювання нормального стану акумулятора без роботи двигуна
Джерело напруги	Напруга під час роботи генератора	13,8–14,4 В	Моделювання заряджання акумулятора генератором
Вимірювальний подільник	R1	100 кОм	Верхнє плече подільника напруги
Вимірювальний подільник	R2	27 кОм	Нижнє плече подільника напруги
Аналоговий вхід ESP32	Вхідний канал	GPIO34	Зчитування масштабованої напруги з подільника

Продовження таблиці 3.1

АЦП ESP32	Розрядність	12 біт	Перетворення аналогового сигналу в цифровий код
Вимірювальний модуль	Основний варіант	INA226	Цифрове вимірювання напруги, струму та потужності
Інтерфейс INA226	Тип зв’язку	I2C	Передавання даних від INA226 до ESP32
Елемент моделі	Параметр	Значення	Призначення
I2C ESP32	SDA, SCL	GPIO21, GPIO22	Лінії обміну даними з INA226
Шунт струму	Опір	0,01 Ом	Перетворення струму в падіння напруги
Фільтрація	К-сть вимірів для усередн	10	Зменшення випадкових коливань результатів
Пороговий аналіз	Нижній поріг U_min	12,0 В	Визначення зниженої напруги
Пороговий аналіз	Верхній поріг U_max	14,8 В	Визначення підвищеної напруги
Передавання результатів	Налагоджувальний канал	Serial Monitor	Виведення результатів під час дослідження
Візуалізація результатів	Графічний контроль	Serial Plotter	Відображення зміни напруги в часі
Умовна модель зв’язку	Формат повідомлення	JSON-рядок	Підготовка даних до передавання через Wi-Fi або Bluetooth

Передавання результатів у межах моделі може бути реалізоване кількома способами (рисунок 3.3). На етапі налагодження достатньо використовувати Serial Monitor або Serial Plotter Arduino IDE. У Serial Monitor виводяться числові значення напруги, струму, потужності та текстовий статус системи. У Serial Plotter можна відображати зміну напруги в часі. Для наближення до кінцевої реалізації передбачено формування JSON-повідомлення, яке надалі передаватиметься через Wi-Fi.

У процесі дослідження спочатку задається вхідна напруга, яка імітує стан автомобільної електромережі. Далі ця напруга надходить на вимірювальний вузол. ESP32 зчитує цифрові значення через I2C з INA226. Далі програма виконує фільтрацію, порівнює напругу з порогами U_{min} і U_{max} та формує текстовий статус.

Для виконання технічного завдання до складу системи додано три вимірювальні модулі INA226, OLED-дисплей, годинник реального часу та датчик температури (рисунок 3.3). Три модулі INA226 дають змогу контролювати декілька ділянок автомобільної електромережі. OLED-дисплей забезпечує локальне відображення поточних параметрів.



Рисунок 3.3 - Узагальнена модель пристрою

Годинник реального часу використовується для часових міток у журналі подій і під час побудови графіків. Датчик температури використовується для контролю температурного режиму електронного вузла або контрольованої ділянки. Конфігурація I2C-шини передбачає спільне підключення модулів INA226, OLED-дисплея та RTC до ліній GPIO21 і GPIO22 ESP32 (див. 2.3). Підключення модулів до ESP32 оказано в таблиці 3.2

Таблиця 3.2 - Підключення модулів до ESP32

Вивід ESP32	Підключення	Призначення
3V3	VCC INA226 #1, INA226 #2, INA226 #3, OLED, RTC	Живлення цифрових модулів 3,3 В
GND	GND INA226 #1, INA226 #2, INA226 #3, OLED, RTC	Спільна земля схеми
GPIO21	SDA INA226 #1, INA226 #2, INA226 #3, OLED, RTC	Лінія даних I2C
GPIO22	SCL INA226 #1, INA226 #2, INA226 #3, OLED, RTC	Лінія тактування I2C
GPIO2	Світлодіод через резистор 220–330 Ом	Локальна індикація стану
GPIO4	Датчик температури DS18B20	Контроль температури вузла або середовища

Прототип системи показано на рисунку 3.4.Принципова схема мікропроцесорного модуля наведена на кресленні КР.КІ.11148936.00.00.002.С1.

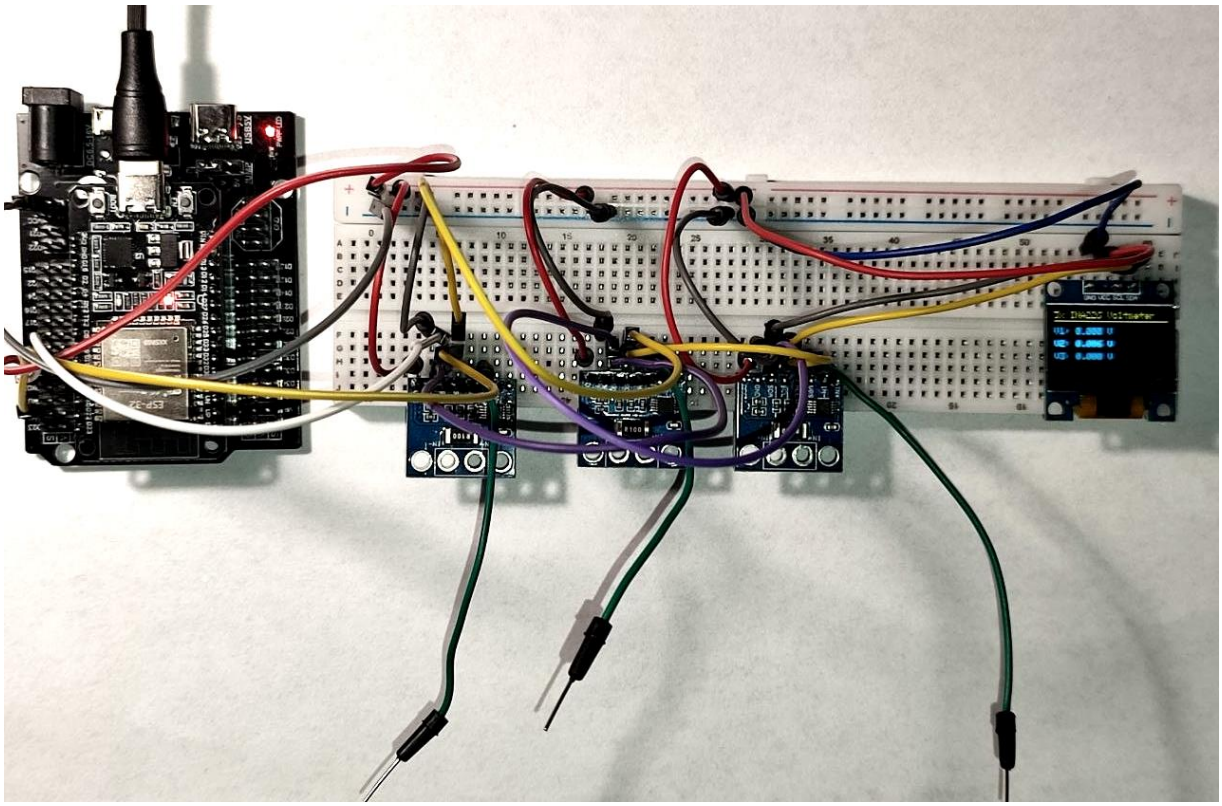


Рисунок 3.4 - Прототип системи

3.3 Верифікація проєкту мікропроцесорного модуля

Верифікація проєкту мікропроцесорного модуля виконується з метою перевірки правильності роботи вимірювального вузла, програмного алгоритму обробки даних і механізму формування повідомлень для користувача. Верифікація проводиться за кількома типовими режимами автомобільної електромережі: нормальна напруга акумулятора, знижена напруга, короткочасне просідання під час запуску двигуна, підвищена напруга при несправності генератора, а також передавання результатів на віддалений інтерфейс або виведення їх у Serial Monitor. Для перевірки використовується модель, описана в підрозділі 3.2. Основним вимірювальним вузлом є INA226.

У програмній частині приймаються такі порогові рівні: U_{min} = 12,0 В, U_{max} = 14,8 В. Якщо напруга нижча за 12,0 В, система формує попередження про знижену напругу. Якщо напруга перебуває в межах від 12,0 В до 14,8 В, стан вважається нормальним. Якщо напруга перевищує 14,8 В, формується попередження про підвищену напругу. Для короткочасного просідання напруги під час запуску двигуна додатково аналізується мінімальне значення в часовому інтервалі.

Для повного забезпечення вимог до точності модель доповнюється перевіркою показів модуля за допомогою мультиметра. Абсолютна похибка визначається як різниця між показом модуля та мультиметра:

$$\Delta U = U_{\text{module}} - U_{\text{meter}}.$$

Відносна похибка визначається за формулою:

$$\delta_U = \frac{|\,\Delta U\,|}{U_{\text{meter}}} \cdot 100\%.$$

де: ΔU- абсолютна похибка вимірювання напруги;

- δ_U- відносна похибка вимірювання напруги, %;
- U_{module} - значення напруги, виміряне модулем;
- U_{meter} - значення напруги, виміряне еталонним мультиметром.

Повторюваність результатів перевіряється серією з кількох вимірювань при сталій вхідній напрузі (таблиця 3.3). Якщо розкид показів малий і не змінює діагностичного статусу, алгоритм вимірювання вважається стабільним.

Таблиця 3.3 - Тестові сценарії для верифікації пристрою

Тест	Напруга за мультиметром, В	Напруга за модулем, В	Абсолютна похибка, В	Відносна похибка, %	Висновок
T1	12,00	12,04	0,04	0,33	Похибка допустима
T2	12,60	12,65	0,05	0,40	Похибка допустима
T3	14,20	14,26	0,06	0,42	Похибка допустима
T4	15,00	15,08	0,08	0,53	Потрібна програмна поправка

Для верифікації роботи модуля доцільно побудувати три основні графіки. Перший графік (рисунок 3.5) - зміна вхідної напруги U_{in} автомобільної мережі у часі (20 с.). Він показує, як пристрій реагує на нормальний стан, просідання під час запуску двигуна, режим заряджання та підвищену напругу. На такому графіку має бути видно короткочасне зниження напруги до 9,1–9,4 В під час запуску та подальше відновлення до нормального рівня.

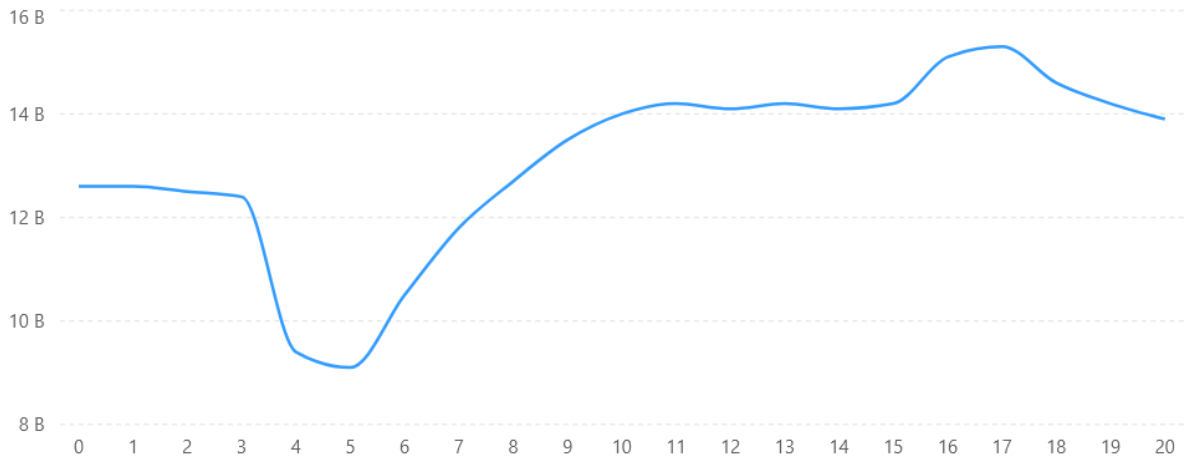


Рисунок 3.5 - Зміна напруги U_{in} у часі

Помітне просідання напруги на 4–5 с і підвищення до 15.3 В на 17 с.

Другий графік (рисунок 3.6) - порівняння необробленого та відфільтрованого сигналу U_f. Він потрібний для оцінювання роботи цифрової фільтрації. Необроблений сигнал може швидко змінюватися, тоді як відфільтроване значення має бути плавнішим. Правильна робота фільтра підтверджується тим, що він зменшує різкі випадкові коливання, але не приховує важливі події, зокрема просідання або перенапругу.

Третій графік (рисунок 3.7) - напруга разом із пороговими рівнями U_{min} і U_{max}. На ньому доцільно показати нижній поріг 12,0 В і верхній поріг 14,8 В. Якщо виміряна напруга опускається нижче нижнього порога або перевищує верхній, система повинна формувати попередження.

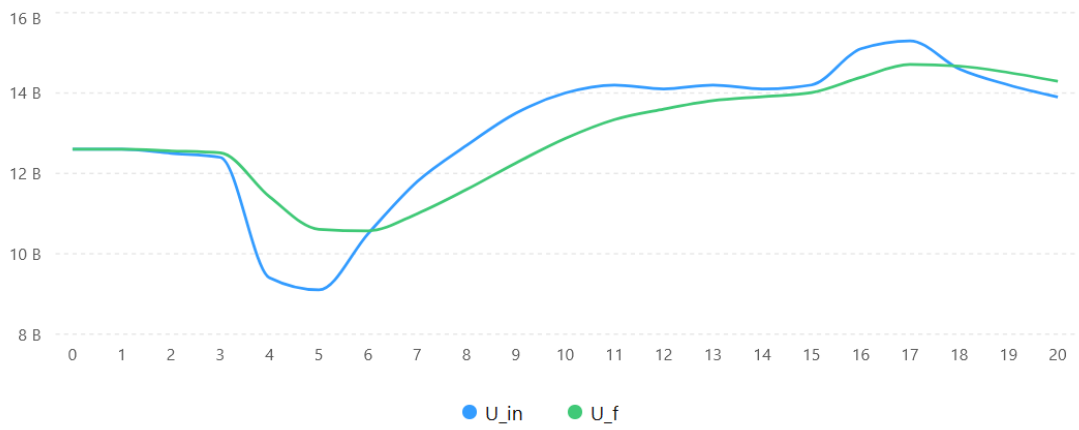


Рисунок 3.6 - Порівняння U_{in} та U_f у часі

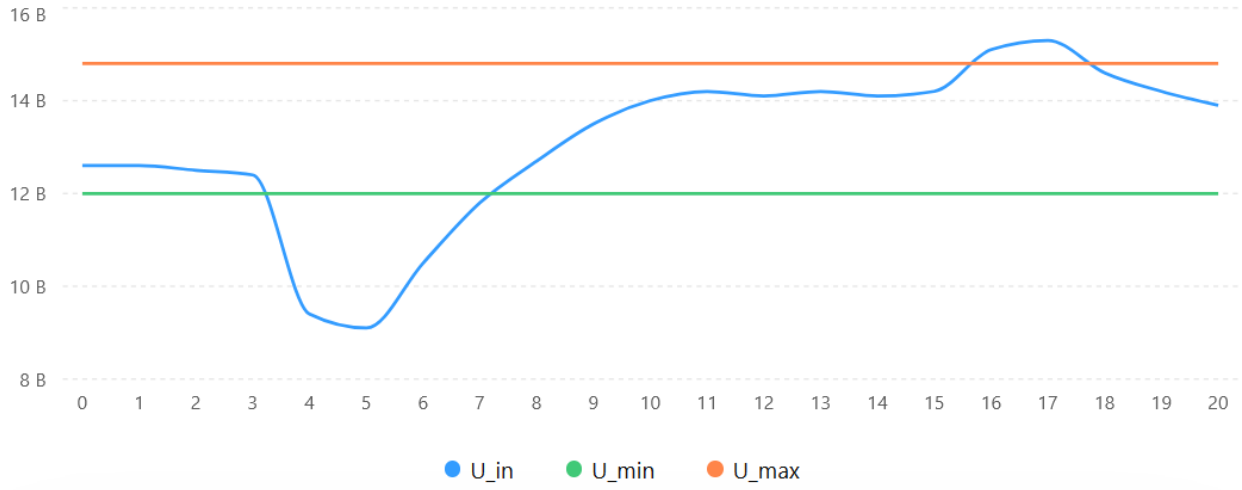


Рисунок 3.7 - Контроль напруги відносно порогів U_{min} та U_{max}

Як видно з рисунку 3.7 на 4–7 с напруга нижча за U_{min} = 12.0 В. На 16–17 с спостерігається наближення до верхньої межі U_{max} = 14.8 В.

Верифікація підтверджує працездатність проєкту, якщо виконуються такі умови:

- вимірювальний вузол коректно масштабує або зчитує напругу;
- ESP32 правильно перераховує значення у фізичні одиниці;
- фільтрація зменшує різкі коливання без втрати важливих подій;
- пороговий аналіз правильно класифікує нормальні та аварійні режими;
- результати виводяться у Serial Monitor.

ВИСНОВКИ

У процесі виконання бакалаврської роботи було отримано такі висновки:

1 Розглянуто підходи до віддаленого контролю параметрів автомобільної електромережі через Wi-Fi, Bluetooth, сервер. Визначено загальну архітектуру пристрою з підтримкою віддаленого моніторингу.

2 Проаналізовано несправності електромережі автомобіля. Виділено типові режими: нормальна напруга, знижена напруга, просідання під час запуску, підвищена напруга генератора та обрив вимірювання. Сформовано діагностичні ознаки, за якими модуль визначає стан електромережі.

3 Розроблено апаратну частину модуля. Як основний керуючий елемент обрано ESP32, що забезпечує зчитування даних, оброблення вимірювань, локальну індикацію та передавання інформації через Wi-Fi. Для вимірювання параметрів електромережі застосовано спеціалізовані модулі INA226 з шунтами, які дають змогу визначати напругу, струм і потужність у кількох контрольованих лініях. До системи додано OLED-дисплей для локального відображення параметрів, RTC DS3231 для часових міток і журналювання подій,. Розроблена схема підключення враховує спільну I2C-шину, стабілізацію живлення, захисні елементи, світлодіодну індикацію. Програмна частина реалізує зчитування вимірюваних параметрів, фільтрацію напруги, пороговий аналіз, формування статусів і створення JSON-повідомлень для передавання на сервер. Верифікацію проєкту виконано за кількома типовими режимами роботи автомобільної електромережі: нормальна напруга акумулятора, знижена напруга, просідання під час запуску двигуна, нормальна робота генератора, підвищена напруга та аварійне значення або втрата сигналу.

4 Реалізовано передавання даних. Реалізовано JSON-повідомлення з полями device_id, voltage, current, power, status, event і timestamp. Забезпечено можливість передавання результатів вимірювання на сервер або мобільний додаток.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Рожанський О. О., Дикунець В. В. Збір і передавання телеметричних даних у розподілених системах моніторингу. *IV Всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Інтелектуальні комп'ютерні системи та мережі» (ІКСМ весна 2026)*. (2026). P. 194—195.

2. Гунчик Р. В. Діагностика електрообладнання автомобіля: конспект лекцій для здобувачів освітньо-кваліфікаційного рівня молодший спеціаліст 274 Автомобільний транспорт денної форми навчання. Любешів : ВСП «Любешівський ТФК Луцького НТУ», 2022. 128 с.

3. Чорний О. П., Зачепа Ю. В., Титюк В. К. та ін. Моніторинг і діагностика електромеханічних об'єктів : навчальний посібник. Кременчуг : ЧП Щербатых А. В., 2019. 122 с.

4. Teensy 4.1 INA226 Current Sensor Tutorial - MakerBotics PTY LTD. URL: https://makerbotics.com/knowledge-base/teensy-4-1-ina226-current-sensor-tutorial/ (accessed 02.05.2026).

5. INA226 36V, 16-Bit, Ultra-Precise I2C Output Current, Voltage, and Power Monitor With Alert. (2024). URL: https://www.ti.com/lit/gpn/INA226 2024.

6. Virtual Singapore - Singapore's virtual twin - Observatory of Public Sector Innovation. URL: https://oecd-opsi.org/innovations/virtual-twin-singapore/?utm_source=chatgpt.com (accessed 11/06/2026).

7. Reddy C. R., Mukku T., Dwivedi A. et al. Improving Spatio-Temporal Understanding of Particulate Matter using Low-Cost IoT Sensors. arXiv, 2020. DOI:10.48550/ARXIV.2005.05936.

8. Pydantic is the most widely used data validation library for Python. URL: https://docs.pydantic.dev/latest/ (accessed 11/06/2025).

9. dataclasses - Data Classes - Python 3.13.4 documentation. URL: https://docs.python.org/3/library/dataclasses.html (accessed 11/06/2025).

10. NetworkX - NetworkX documentation. URL: https://networkx.org/ (accessed 11/06/2025).

11. Graphviz. URL: https://graphviz.org/ (accessed 11/06/2025).

12. Sveidqvist K., Contributors to Mermaid. Mermaid: Generate diagrams from markdown-like text. Generation of diagrams like flowcharts or sequence diagrams from text in a similar manner as markdown. URL: https://github.com/mermaid-js/mermaid (accessed 11/06/2025).2014.

13. Industrial internet of things - Wikipedia. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Industrial_internet_of_things (accessed 14/06/2025).

14. García-Valls M., Palomar-Cosín E. An Evaluation Process for IoT Platforms in Time-Sensitive Domains. *Sensors*. Вип. 22, № 23. С. 9501. DOI:10.3390/s22239501.

15. Vogler M., Schleicher J., Inzinger C. et al. Optimizing Elastic IoT Application Deployments. *IEEE Transactions on Services Computing*. 2016. P. 1–1. DOI:10.1109/TSC.2016.2617327.

16. Breiter G., Behrendt M., Gupta M. et al. Software defined environments based on TOSCA in IBM cloud implementations. *IBM Journal of Research and Development*. Vol. 58, Issue 2/3. P. 9:1-9:10. DOI:10.1147/JRD.2014.2304772.

17. PyYAML·PyPI. URL: https://pypi.org/project/PyYAML/ (accessed 15/05/2025).

18. Жураковський Б. Ю., Зенів І. О. Комп’ютерні мережі Частина 1: навчальний посібник. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 336 с.

19. Bonaventure O. Computer Networking: Principles, Protocols and Practice. Saylor, 2022. 278 p.

20. Голь В. Д., Ірха М. С. Телекомунікаційні та інформаційні мережі: навчальний посібник. Київ : ІСЗЗІ КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 250 с.

21. Боголюбов В. М., Клименко М. О., Мокін В. Б. та ін. Моніторинг довкілля : підручник. ВНТУ. Вінниця, 2017. 232 с. URL: ttps://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog/download/308/577/617-1

22. Sentilo. URL: https://www.sentilo.io/

23. The Future of Internet of Things in Smart Cities - Barcelona Case Study. URL: https://angrynerds.co/blog/the-future-of-internet-of-things-in-smart-cities-barcelona-case-study/?utm_source=chatgpt.com (accessed 26/05/2026).

24. Smart Citizen – Fab Lab Barcelona | Research, education, innovation centre. URL: https://fablabbcn.org/projects/smart-citizen?utm_source=chatgpt.com (accessed 26/05/2026).

25. IoT & Communications/Security - Seoul Metropolitan Government. URL: https://english.seoul.go.kr/policy/smart-city/iot-communications-security/ (accessed 26/05/2026).

26. Ecube Labs. Wikipedia. URL: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Ecube_Labs&oldid=1209808169 (дата звернення: 26.05.2026).

27. Smart Nation. Wikipedia. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Smart_Nation (дата звернення: 26.05.2026).

28. Dinmohammadi F., Han Y., Shafiee M. Predicting Energy Consumption in Residential Buildings Using Advanced Machine Learning Algorithms. *Energies*. Вип. 16, № 9. С. 3748. DOI:10.3390/en16093748.

29. Solar resource maps & GIS data for 200+ countries | Solargis. URL: https://solargis.com/resources/free-maps-and-gis-data?locality=ukraine (accessed 03/06/2025).

30. Тарнавський Ю. А., Кузьменко І. М. Організація комп'ютерних мереж: підручник. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. 259 с.

31. Трубчанінова К. А., Жученко О. С., Лисечко В. П. Бездротові телекомунікаційні системи: навчальний посібник. Харків : УкрДУЗТ, 2022. 86 с.

32. Гапак О. М., Балога С. І. Захист інформації в комп'ютерних системах: підручник. Ужгород : ПП «АУТДОР-ШАРК», 2021. 184 с.

33. Березький О. М., Мельник Г. М., Дубчак Л. О. та ін. Методичні вказівки до випускних кваліфікаційних робіт освітнього рівня "Бакалавр" спеціальності "Комп'ютерна інженерія". ред. О. М. Березький. Тернопіль : ЗУНУ, 2024. 52 с.