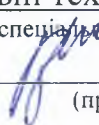


Вінницький національний технічний університет
(повне найменування вищого навчального закладу)
Факультет інформаційних електронних систем
(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))
Кафедра інформаційних радіоелектронних технологій і систем
(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

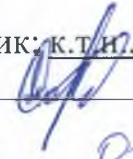
БАКАЛАВРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

НА ТЕМУ:
«ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНА СИСТЕМА СТРУМУ СПОЖИ-
ВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИЛАДІВ»

Виконав: студент 4-го курсу, групи КІВТ-216
Спеціальності 152 Метрологія та інформаційно-
вимірювальна техніка, ОП – Комп'ютеризовані-
інформаційно вимірювальні технології
(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)


Будз В. В.
(прізвище та ініціали)

Керівник: к.т.н., доц., доцент каф. ІРТС


Савицький А. Ю.
(прізвище та ініціали)
« 12 » 06 2025 р.

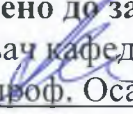
Рецензент: к.т.н., доц., доцент каф. ІКСТ


Семенова О. О.
(прізвище та ініціали)

« 13 » 06 2025 р.

Допущено до захисту

Завідувач кафедри ІРТС


д.т.н., проф. Осадчук О.В.

(прізвище та ініціали)

« 16 » 06 2025 р.

Вінниця - 2025 рік

Вінницький національний технічний університет
Факультет інформаційних електронних систем
Кафедра інформаційних радіоелектронних технологій і систем
Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)
Галузь знань – 15 Автоматизація та приладобудування
Спеціальність – 152 Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка
Освітньо-професійна програма – Комп'ютеризовані інформаційно-вимірювальні технології

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ІРТС
д.т.н., проф. Осадчук О.В.

 2025 року

З А В Д А Н Н Я **НА БАКАЛАВРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Будзу Віталію Васильовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: **Інформаційно-вимірювальна система струму споживання електроприладів**

Керівник роботи: к.т.н., доц., доцент каф. ІРТС Савицький А.Ю.

затверджені наказом вищого навчального закладу від "20" 03. 2025 року №97

2. Строк подання студентом роботи 12 06 2025 року

3. Вихідні дані до роботи: Оцифровані значення сигналу струму у вигляді цифрового коду АЦП. Виміряне миттєве значення струму споживання (у амперах). Фільтроване та усереднене значення струму. Виявлені аномалії у струмі (перевищення, обрив, нестабільність). Відправлені через Wi-Fi значення струму на сервер Blynk. Графічна візуалізація даних у мобільному або вебдодатку Blynk. Логічні сигнали попередження про перевантаження (за потреби). Журнали змін струму для подальшого аналізу.

4. Зміст текстової частини: Вступ. Аналіз систем вимірювання та моніторингу електроспоживання. Розробка інформаційно- вимірювальної системи. Моделювання та дослідження інформаційно-вимірювальної системи. Висновки. Перелік використаних джерел. Додатки.

5. Перелік ілюстративного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): Електрична схема пристрою. Зовнішній вигляд розробленого пристрою. Працююча система в стані спокою. Працююча система під навантаженням. Відображення результату вимірювання у web-версії з ACS712 20A. Відображення результату вимірювання у мобільному застосунку з ACS712 20A. Відображення результату вимірювання у web-версії з ACS712 5A. Відображення результату вимірювання у мобільному застосунку з ACS712 5A. Діаграма результатів вимірювань.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	виконання прийняв
Основна частина	к.т.н., доц., доцент каф. ІРТС Савицький А.Ю.		

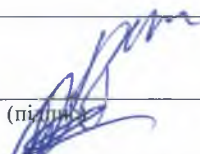
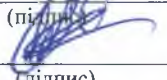
7. Дата видачі завдання 25.03.2025 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів бакалаврської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	При- мітка
1.	Вибір, узгодження та затвердження теми БКР	14.02.2025-28.02.2025	
2.	Огляд та аналіз літературних джерел.	01.03.2025-19.03.2025	
3.	Затвердження теми. Розробка завдання на БКР.	20.03.2025-25.03.2025	
4.	Попередня розробка основних розділів. Аналіз вирішення поставленої задачі. Розробка структурної схеми та технічних рішень.	26.03.2025-06.05.2025	
5.	Математичне моделювання та електричні роз- рахунки. Експериментальне дослідження.	07.05.2025-26.05.2025	
6.	Розробка ілюстративної частини БКР	27.05.2025-31.05.2025	
8	Оформлення пояснювальної записки та ілюст- ративної частини.	02.06.2025-06.06.2025	
9.	Нормоконтроль	07.06.2025-10.06.2025	
10.	Попередній захист БКР, доопрацювання, реце- нзування БКР	11.06.2025-15.06.2025	
11.	Захист БКР ЕК	17.06.2025-18.06.2025	

Студент

Керівник роботи


(підпис)

(підпис)

Будз В.В.

Савицький А.Ю.

АНОТАЦІЯ

УДК 621.317:004.9

Будз В.В. Інформаційно-вимірювальна система струму споживання електроприладів. Бакалаврська кваліфікаційна робота зі спеціальності 152 – Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка, освітня програма – Комп'ютеризовані інформаційно-вимірювальні технології. Вінниця: ВНТУ, 2025. Кількість сторінок 91с. Українською мовою. Бібліогр.:21 назва; рис.: 41;табл.: 1.

У бакалаврській кваліфікаційній роботі досліджено архітектурні принципи та шляхи оптимізації функціонування інформаційно-вимірювальної системи струму споживання електроприладів. Розглянуто актуальність моніторингу енергоспоживання, сучасні методи та засоби вимірювання струму, а також огляд існуючих рішень для моніторингу енергоспоживання у побуті та промисловості.

Особливу увагу приділено метрологічному забезпеченню вимірювань, врахуванню похибок та підвищенню точності отриманих даних. Запропоновано структурну схему та алгоритм функціонування системи, обґрунтовано вибір апаратних та програмних компонентів. Проведено моделювання процесу вимірювання струму споживання з використанням відповідних інструментів, аналіз отриманих результатів та оцінку ефективності розробленої системи.

Вибір теми роботи зумовлений необхідністю в наш час підвищення енергоефективності та раціонального використання ресурсів, важливістю точного моніторингу енергоспоживання для зменшення фінансових витрат та підтримки стійкості енергетичної інфраструктури. Крім того, такі системи відіграють ключову роль у діагностиці та забезпеченні безпеки електромереж, допомагаючи виявляти несправності та запобігати аваріям, що є критично важливим, актуальним та практично значущим для розвитку інженерного потенціалу нашої країни.

Ключові слова: струм, мікроконтролер, датчик струму, Arduino IDE, C/C++, Proteus, Blynk.

ABSTRACT

Budz V.V. Information and measuring system of current consumption of electrical appliances. Bachelor's thesis in the specialty 152 - Metrology and information and measuring equipment, educational program - Computerized information and measuring technologies. Vinnytsia: VNTU, 2025. Number of pages 91. In Ukrainian. Bibliography: 21 titles; Figures: 41; Table 1.

The bachelor's thesis investigates the architectural principles and ways to optimize the functioning of the information and measurement system for the current consumption of electrical appliances. The relevance of energy consumption monitoring, modern methods and means of measuring current, as well as an overview of existing solutions for monitoring energy consumption in everyday life and industry are considered.

Particular attention is paid to the metrological support of measurements, taking into account errors and improving the accuracy of the data obtained. The structural scheme and algorithm of the system functioning are proposed, the choice of hardware and software components is substantiated. The modeling of the process of measuring the consumption current using appropriate tools, the analysis of the results and the evaluation of the effectiveness of the developed system are carried out.

The choice of the work topic is due to the need to increase energy efficiency and rational use of resources, the importance of accurate monitoring of energy consumption to reduce financial costs and maintain the sustainability of energy infrastructure. In addition, such systems play a key role in diagnosing and ensuring the safety of power grids, helping to detect malfunctions and prevent accidents, which is critical, relevant and practically significant for the development of our country's engineering potential.

Keywords: current, microcontroller, current sensor, Arduino IDE, C/C++, Proteus, Blyn.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1 АНАЛІЗ СИСТЕМ ВИМІРЮВАННЯ ТА МОНІТОРИНГУ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ.....	10
1.1 Актуальність дослідження струму споживання електроприладів.....	10
1.2 Методи та засоби вимірювання струму споживання електроприладів.....	15
1.3 Огляд існуючих рішень для моніторингу енергоспоживання	24
2 РОЗРОБКА ІНФОРМАЦІЙНО- ВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ.....	33
2.1 Вибір та обґрунтування структурної та електричної схем системи	33
2.2 Розробка алгоритму вимірювання та обробки даних	36
2.3 Вибір та реалізація апаратних засобів	39
2.4 Вибір та реалізація програмних засобів	43
3 МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНО- ВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ.....	55
3.1 Вибір інструментів для моделювання системи	55
3.2 Моделювання процесу вимірювання струму споживання	59
3.3 Аналіз результатів моделювання та оцінка ефективності системи	66
ВИСНОВКИ.....	78
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	80
Додаток А (обов’язковий). Ілюстративна частина.....	83
Додаток Б (обов’язковий). Протокол перевірки бакалаврської кваліфікаційної роботи.....	87
Додаток В (довідниковий). Лістинг програми	89

ВСТУП

У сучасному світі, де енергоефективність і розумне використання ресурсів набувають усе більшого значення, моніторинг споживання струму електроприладів стає невід'ємною потребою як у житловому, так і в промисловому секторах. Інформаційно-вимірювальні системи відіграють ключову роль у точному контролюванні та аналізі цих показників, дозволяючи користувачам та операторам приймати обґрунтовані рішення щодо оптимізації витрат на енергію. Ці системи не лише сприяють зменшенню комунальних платежів, але й допомагають виявляти порушення функціонування приладів, прогнозувати навантаження та ефективно інтегруватися в більш широкі системи "розумного дому" або промислової автоматизації.[4,5,6]

Актуальність теми

Глобальний ринок рішень для моніторингу споживання енергії демонструє стабільне зростання, зумовлене зростанням цін на енергоносії, посиленням екологічних вимог та стрімким розвитком технологій Інтернету речей (IoT).

Здійснивши аналіз відкритих досліджень різних аналітичних компаній, дослідницьких агентств та наукових установ, я зробив такі висновки:

- ринок рішень для моніторингу споживання енергії є динамічним та перспективним, що відображає глобальні тенденції до енергоефективності, сталості та цифровізації,
- постійні інновації та розвиток технологій, особливо в галузі IoT та AI, забезпечують його стрімке зростання та відкривають нові можливості для оптимізації енергоспоживання у всіх секторах економіки,
- можливість точного моніторингу споживання електроенергії набуває виняткового значення.

Сучасні інформаційно-вимірювальні системи забезпечують не тільки збір даних, але й їх аналітичну обробку в реальному часі, що є критично важливим для оперативного управління та оптимізації.

Водночас, зі збільшенням обсягів даних і ускладненням самих систем, виникають нові виклики щодо забезпечення якості та точності вимірювань.

Особливо актуальним стає питання метрологічного забезпечення – комплексу організаційних, методичних та технічних заходів, спрямованих на досягнення необхідної достовірності та моніторингу вимірювань. Від якості метрологічного супроводу залежить ефективність функціонування системи, достовірність прийняття рішень з оптимізації та відповідність міжнародним і національним стандартам.[11]

Сучасні підходи до створення інформаційно-вимірювальних систем базуються на впровадженні інтелектуальних алгоритмів обробки даних, математичного моделювання, імітаційного моделювання та автоматизованих систем моніторингу. Проте їх ефективність безпосередньо залежить від точності та достовірності вихідних вимірювань, що підкреслює необхідність інтеграції метрологічних підходів на всіх етапах розробки та експлуатації системи.[1,7]

Мета роботи: дослідити актуальність та наявні рішення для моніторингу споживання енергії, розробити інформаційно-вимірювальну систему споживання струму електроприладів, а також провести її моделювання та оцінку ефективності з урахуванням метрологічних аспектів.

Завдання дослідження:

- 1) проаналізувати актуальність дослідження споживання струму електроприладів та існуючі методи та засоби вимірювання;
- 2) здійснити огляд сучасних рішень для моніторингу споживання енергії, їх переваг та недоліків;
- 3) визначити вимоги до метрологічного забезпечення процесів моніторингу та вимірювання струму;
- 4) розробити структурну схему та алгоритм функціонування інформаційно-вимірювальної системи;
- 5) обґрунтувати вибір та реалізувати апаратні та програмні засоби системи;
- 6) здійснити моделювання процесу вимірювання споживання струму та проаналізувати результати;

7) оцінити ефективність розробленої системи та вплив точності вимірювань на її функціонування.

Об'єкт дослідження: процес вимірювання та моніторингу споживання струму електроприладів.

Предмет дослідження: інформаційно-вимірювальна система споживання струму електроприладів, методи вимірювання, алгоритми обробки даних та метрологічне забезпечення вимірювань.

Методи дослідження: аналіз науково-технічної літератури, системний підхід, імітаційне моделювання, розробка та тестування програмних рішень, метрологічна оцінка точності вимірювань, візуалізація результатів.

Для досягнення мети дослідження необхідно вирішити такі завдання:

1. Здійснити аналіз сучасного стану систем моніторингу споживання електроенергії та методів вимірювання струму.
2. Розробити архітектуру пристрою, обґрунтувати вибір елементної бази та алгоритмів обробки вимірювальних даних.
3. Створити програмне забезпечення для збору, обробки та візуалізації даних про споживання струму.
4. Провести моделювання, тестування окремих модулів і повної системи, а також оцінити її метрологічні характеристики та ефективність.

Наукова новизна: полягає в комплексному підході до розробки інформаційно-вимірювальної системи, що поєднує сучасні апаратні та програмні рішення з урахуванням метрологічних аспектів для підвищення точності та достовірності даних про споживання струму електроприладів.

Практичне значення: роботи полягає в можливості впровадження розроблених методів і системи в побутові та промислові системи моніторингу споживання енергії для підвищення енергоефективності, виявлення несправностей та оптимізації використання електроенергії. Розроблений пристрій є ключовим елементом створення "розумного" будинку або офісу, де кожна кіловат-година використовується свідомо та оптимально.

1 АНАЛІЗ СИСТЕМ ВИМІРЮВАННЯ ТА МОНІТОРИНГУ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ

1.1 Актуальність дослідження струму споживання електроприладів

Вивчення енергоспоживання електричних пристроїв стає все більш значущим у сучасному світі з численних причин, що стосуються як економіки, так і екології. Це безпосередньо впливає на ефективність використання електроенергії, економічну обґрунтованість та безпеку як окремих споживачів, так і енергосистем в цілому.[4,5,6]

Збільшення світового попиту на електроенергію, виснаження природних ресурсів, а також необхідність підвищення енергоефективності роблять моніторинг та контроль споживання електроенергії нагальним завданням. Інформаційно-вимірювальні системи, які забезпечують точне вимірювання та аналіз струму, що споживається електричними приладами, відіграють ключову роль у забезпеченні раціонального використання електроенергії, зменшенні витрат та зниженні негативного впливу на довкілля.

Вимірювання струму дає змогу :

- *визначати реальне енергоспоживання пристроїв;*
- *виявляти неефективні або несправні прилади;*
- *оптимізувати витрати на електроенергію;*
- *запобігати перевантаженням мережі та аварійним випадкам.*

Суть вимірювання може бути різною, в залежності від того, який чинник обумовлює актуальність, енергоефективність та економічні аспекти. Сучасне суспільство стикається з проблемою обмеженості енергетичних ресурсів, таких як вугілля, нафта та природний газ, які є основними джерелами виробництва електроенергії. За даними Міжнародного енергетичного агентства (ІЕА) у 2023 році глобальне споживання електроенергії досягло 24 000 ТВт·год, і прогнозується його подальше зростання.

Моніторинг струму споживання дозволяє:

а) виявляти енергоємні прилади та процеси. Регулярний контроль споживання електроенергії дозволяє точно визначити, які пристрої або технологічні процеси є найбільш «ненажерливими». Це, у свою чергу, дає змогу приймати обґрунтовані рішення щодо їхньої модернізації, оптимізації або заміни на більш енергоефективні аналоги;

б) оптимізувати режими роботи обладнання. Аналізуючи профілі споживання, можна підібрати такі режими експлуатації електроприладів, за яких енергоспоживання буде мінімальним, а продуктивність — на потрібному рівні. Це важливий крок до зменшення витрат без шкоди для ефективності;

в) планувати енергоспоживання. Наявність статистичних даних про типові профілі споживання струму дозволяє заздалегідь планувати навантаження на мережу. Особливо це актуально в умовах диференційованих тарифів, коли вдале планування допомагає суттєво заощадити;

г) справедливо розподіляти витрати у спільному користуванні. Наприклад, у багатоквартирних будинках або офісних центрах точний облік дає змогу чесно розподіляти витрати на електроенергію між усіма споживачами. Це зменшує кількість конфліктів і стимулює кожного відповідальніше ставитися до свого енергоспоживання.

Екологічний аспект

В рамках глобальних дій, спрямованих на протидію кліматичним змінам та перехід до сталого майбутнього, аналіз енергоспоживання електроприладів набуває важливої екологічної ваги. Оптимізація енергоспоживання напрямку сприяє скороченню викидів парникових газів, особливо в державах, де значна частина електроенергії видобувається з використанням викопного палива. Чимало країн запроваджують все суворіші нормативи енергоефективності для електричних приладів. Точне вимірювання споживання струму є необхідною умовою для визначення відповідності цим стандартам. Системи моніторингу енергоспоживання є ключовим компонентом концепції розумних мереж, які оптимізують генерацію,

розподіл та споживання електроенергії. Ефективне управління споживанням енергії сприяє кращій інтеграції відновлюваних джерел енергії, характеристики яких часто є нестабільними (наприклад, сонячна або вітрова енергія).

Виробництво електроенергії, особливо з використанням викопного палива, є одним із основних джерел викидів CO₂. За даними ІЕА, у 2022 році енергетичний сектор спричинив 40% глобальних викидів парникових газів. Зменшення електроспоживання за допомогою інформаційно-вимірювальних систем сприяє скороченню вуглецевого сліду, що є важливим кроком до досягнення цілей сталого розвитку, визначених ООН до 2030 року.

Технічний та інноваційний аспект

У сучасному світі, де енергоефективність, автоматизація та цифровізація є ключовими векторами розвитку, контроль та моніторинг споживання струму електроприладами набувають особливого значення. Розвиток мікропроцесорної техніки, сенсорних технологій та бездротових засобів передачі даних суттєво розширили можливості інформаційно-вимірювальних систем.

Одним з провідних напрямків є інтеграція таких систем у концепцію Інтернету речей (IoT), де споживання електроенергії перестає бути пасивним процесом і стає об'єктом активного аналізу та управління. Сучасні технології дозволяють не лише здійснювати точні вимірювання, але й передавати дані в реальному часі для подальшої обробки, візуалізації та ухвалення рішень.

Висока точність сенсорів (наприклад, на основі ефекту Холла, як у датчиках ACS712) забезпечує надійне вимірювання змінного або постійного струму, що є критично важливим для безпеки, енергоефективності та виявлення несправностей в електромережах. Разом з тим, розвиток алгоритмів обробки даних дозволяє здійснювати інтелектуальний аналіз: виявлення аномалій, формування рекомендацій, візуалізацію споживання та інше.

Особливу актуальність ця тема набуває в межах концепцій "розумного будинку" (Smart Home) та "розумної енергомережі" (Smart Grid). У таких системах дані про струм використовуються для:

- автоматичного керування електроприладами (вмикання/вимикання при перевищенні заданих параметрів);
- надання рекомендацій щодо енергозбереження на основі аналізу моделей споживання;
- покращення взаємодії між підсистемами будинку, такими як освітлення, опалення, кондиціонування та інші;
- формування нових бізнес-моделей в енергетиці (наприклад, попит-відповідь, гнучке ціноутворення, мікромережі).

Більш того, в умовах зростання вартості енергоносіїв та навантаження на енергосистеми, персональний контроль за енергоспоживанням стає необхідністю для побутових споживачів, промислових об'єктів та енергетичних компаній.[21]

Експлуатаційний аспект

Одним з найважливіших аспектів актуальності контролю струму є збільшення безпеки при використанні електроприладів. Вимірювання споживаного струму дає можливість завчасно виявляти відхилення у роботі пристроїв, такі як:

- перевантаження,
- короткі замикання,
- внутрішні проблеми (наприклад, знос елементів живлення чи контактів).

Відповідно до інформації від Національної асоціації протипожежного захисту США (NFPA), у 2021 році несправності в електромережах стали причиною 13% пожеж у помешканнях. Впровадження інформаційно-вимірювальних систем дозволяє не тільки зареєструвати потенційно небезпечні ситуації, а й попередити користувача через мобільний додаток чи навіть автоматично вимкнути живлення, зменшуючи вірогідність аварій та пожеж.

Надійність електромереж і технічна безпека

Контролювання споживання струму також відіграє ключову роль у гарантуванні стабільності місцевих та загальних електромереж. Завдяки безперервному моніторингу електричних параметрів, можливо:

- запобігати перевантаженням, оперативно визначаючи перевищення дозволених значень струму;
- завчасно виявляти проблеми, що дає можливість провести профілактичні чи аварійні роботи до виникнення критичної ситуації;
- реалізовувати захисне відключення в автоматичному або напівавтоматичному режимі при критичних показниках.

Ці функції особливо важливі в умовах збільшення складності сучасних електричних мереж, які містять велику кількість пристроїв, включно з високочастотними перетворювачами, інверторами, зарядними пристроями, побутовою технікою та іншим.

Соціально-економічне значення

Вивчення споживання струму впливає на суспільство та економіку, особливо в домівках, на підприємствах і на рівні національних енергетичних систем. Ось ключові позитивні наслідки:

- а) підвищення енергоефективності. Збір і аналіз даних про використання струму сприяє покращенню графіків роботи приладів, зменшенню пікового навантаження та забезпечує більш стабільне споживання енергії.
- б) зменшення витрат. Маючи інформацію про те, скільки електроенергії споживається і як саме, споживачі можуть свідомо зменшувати витрати, наприклад, вимикаючи неефективну чи зайву техніку.
- в) оптимізація функціонування енергосистеми. Зведені дані про споживання електроенергії можуть застосовуватися для регулювання навантаження, як на рівні мікромереж, так і в національному масштабі, зменшуючи ризики перевантажень та перебоїв у постачанні енергії.
- г) створення нових бізнес-моделей. Точне вимірювання споживання відкриває двері для впровадження програм гнучкого тарифоутворення, управління попитом, мікроплатежів за спожиту електроенергію та інших інновацій.

1.2 Методи та засоби вимірювання струму споживання електроприладів

1.2.1 Методи вимірювання струму

Вимірювання струму є фундаментальною операцією, критично важливою для аналізу енергоефективності, діагностики несправностей, контролю роботи електропристроїв та забезпечення їх безпечної експлуатації, а також для отримання кількісних значень струму для подальшої роботи. Сучасні системи контролю струму та інженерна практика застосовують різноманітні методи вимірювання, що ґрунтуються на основних фізичних принципах та реалізуються за допомогою відповідних технічних засобів. Кожен такий метод характеризується унікальними особливостями, перевагами, недоліками, обмеженнями та конкретними сферами застосування. Тому вибір оптимального методу вимірювання струму визначається сукупністю факторів, серед яких ключовими є: тип струму (постійний чи змінний), необхідна точність, робочий діапазон значень, рівень електричної ізоляції, вартість та економічна доцільність, а також специфіка електроприладу, умови його експлуатації та конкретні потреби вимірювальної задачі, зокрема в контексті інформаційно-вимірювальних систем.[4,5,6]

До найпоширеніших методів вимірювання належать:

1. Вимірювання струму за Ефектом Холла.

Ефект Холла — це фундаментальне явище, відкриття якого зробив американський фізик Едвін Герберт Холл у 1879 році, що стало важливим етапом у розумінні електромагнітних взаємодій. Його дослідження показали (рисунк1.1): якщо електричний струм проходить через провідник у магнітному полі, яке розташоване перпендикулярно до струму, то виникає поперечна напруга, яка прямо пропорційна силі струму та індукції магнітного поля. Ця поперечна напруга, або напруга Холла, утворюється завдяки дії сили Лоренца, яка змушує заряджені частинки, наприклад, електрони, зміщуватися перпендикулярно до напрямку струму. Це створює різницю потенціалів між сторонами провідника.

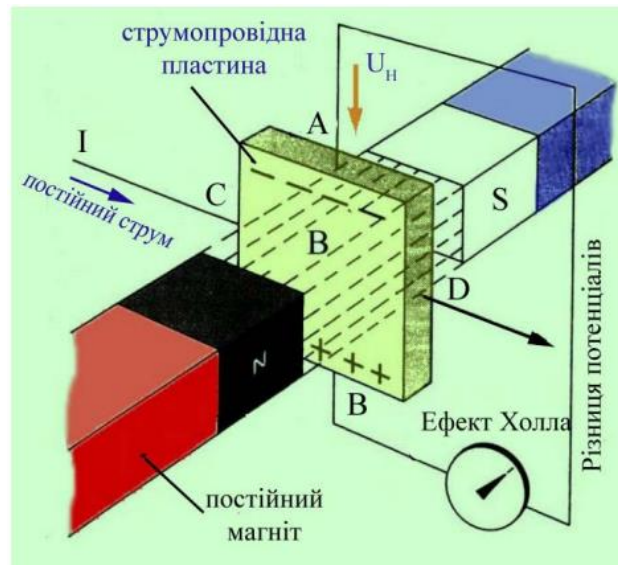


Рисунок 1.1 - Ефект Холла

Спочатку ефект Холла використовувався переважно для дослідження властивостей матеріалів, зокрема для визначення їх типу провідності (електрони чи дірки) та концентрації носіїв заряду. Проте зі зростанням технічного прогресу цей ефект почали використовувати в різноманітних галузях завдяки його унікальним можливостям забезпечувати безконтактні вимірювання. У сучасних сенсорах ефект Холла використовується для вимірювання струму, магнітного поля або навіть положення об'єктів без прямого фізичного контакту.

Технологія, заснована на ефекті Холла має багато переваг. Вона забезпечує високу точність і стабільність вимірювань, оскільки магнітне поле, яке спричиняє ефект, не зношується і не піддається механічним впливам. Датчики Холла часто використовуються в автомобільній промисловості для контролю положення валів і педалей, у комп'ютерах — для моніторингу швидкості обертання вентиляторів, а також у вимірювальних пристроях, таких як електричні лічильники чи системи захисту від перевантажень.

Принцип роботи датчика Холла часто реалізується за допомогою напівпровідникового матеріалу, через який проходить струм. Коли цей матеріал потрапляє в магнітне поле, виникає напруга Холла, яка зчитується та аналізується електронними схемами. Такий підхід дозволяє вимірювати як змінний, так і постійний струм, забезпечуючи універсальність застосування.

Серед цікавих аспектів застосування ефекту Холла можна виділити його використання в медичних приладах для магнітно-резонансної томографії (МРТ), у системах навігації та в промислових роботах для визначення положення. Це явище також стало основою для розвитку магнітної пам'яті та нових технологій зберігання даних. Ефект Холла — це приклад того, як відкриття, зроблене понад століття тому, продовжує змінювати наш світ, інтегруючись у сучасні технології та знаходячи нові області застосування.[12,13]

2. Вимірювання струму за Шунтовим методом.

Шунтовий метод вимірювання струму є одним із найпоширеніших і найбільш надійних способів визначення сили струму в електричних колах. Його основа — це резистор із точно відомим опором, який називається шунтом. Шунт підключається послідовно в коло (рисунок 1.2), через який проходить вимірюваний струм. Під дією цього струму на кінцях шунта виникає невелика напруга, яка пропорційна силі струму відповідно до закону Ома. Ця напруга легко вимірюється, а отримані дані використовуються для обчислення струму з високою точністю.

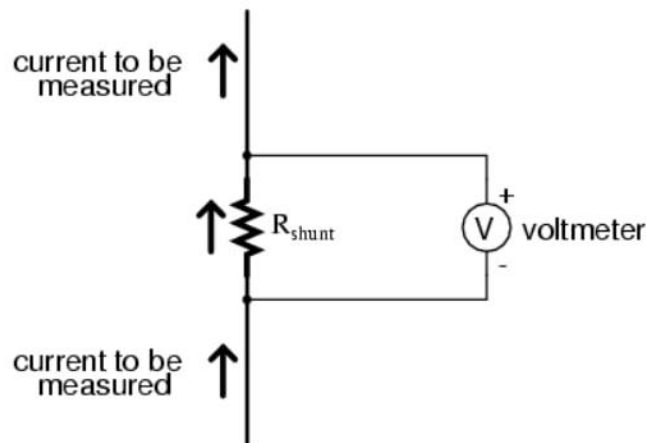


Рисунок 1.2 - Шунтовий метод

Історія шунтового методу бере свій початок у 19 столітті, коли німецький фізик Йоганн Пітер Гюстав Лейбнітц Кірхгоф вперше застосував принцип шунтування в електродинаміці. Хоча сам шунт як інструмент з'явився трохи пізніше,

саме ці роботи заклали фундамент для його розвитку. Шунти швидко стали незамінними у вимірюваннях струму завдяки їх простоті, точності та універсальності. Сьогодні вони використовуються в широкому спектрі застосувань — від наукових досліджень до побутової електроніки.

Метод шунту має ряд значних переваг. Він дозволяє вимірювати як низькі, так і високі струми, забезпечуючи при цьому точність і стабільність навіть у складних умовах. Однією з головних переваг шунта є його надійність — це пасивний компонент, який не вимагає зовнішнього живлення та працює за законами фізики, незалежно від зовнішніх впливів. Завдяки цим характеристикам шунтовий метод широко застосовується в різних галузях.

Сучасні системи використовують шунти для моніторингу струмів у автомобільній промисловості, наприклад, у системах зарядки акумуляторів. Відновлювані джерела енергії, такі як сонячні та вітрові електростанції, також покладаються на шунти для контролю струму в своїх системах. Крім того, шунтовий метод знаходить застосування у вимірювальних приладах, електричних тестерах та інших електронних пристроях, де важлива точність і простота конструкції.[6]

Шунтовий метод — це не лише класичний, але й надзвичайно ефективний спосіб вимірювання струму, який залишається актуальним завдяки своїй універсальності, доступності та надійності. Його простота дозволяє застосовувати його як у великих інженерних системах, так і в компактних пристроях, забезпечуючи стабільні результати незалежно від складності завдання.

3. Вимірювання струму за Клемовим методом.

Клемовий метод, відомий також як метод струмових кліщів, є одним із найбільш зручних способів вимірювання електричного струму завдяки своїй простоті та безпечності. Його основа полягає у вимірюванні магнітного поля, що утворюється навколо провідника, через який проходить струм. Для цього використовується спеціальний прилад у формі кліщів (рисунок 1.3), який охоплює провідник без необхідності розриву електричного кола чи втручання в його роботу. Це робить метод надзвичайно практичним, особливо у випадках, коли доступ до проводів обмежений або коли потрібно мінімізувати втручання в систему.



Рисунок 1.3 - Клемовий метод

Клемові амперметри стали особливо популярними у середині 20 століття, коли почали активно використовуватись у різних галузях промисловості та електроенергетиці. Їхня популярність обумовлена багатьма перевагами. Однією з головних є безконтактність вимірювання, що забезпечує високий рівень безпеки, особливо при роботі з високими струмами або у складних умовах. Інженери та технічні фахівці швидко оцінили цей підхід, адже він значно спростив процес вимірювання, виключивши необхідність розриву кола або використання додаткових компонентів.

Сучасні струмові кліщі, які реалізують цей метод, часто оснащені додатковими функціями, такими як вимірювання напруги, опору або навіть фази сигналу. Це робить їх універсальними інструментами для електриків, інженерів та технічних фахівців, які працюють у галузях енергетики, промисловості, будівництва чи обслуговування електронних систем. Вони використовуються для моніторингу струмів у промислових установках, перевірки стану обладнання, пошуку несправностей та навіть для оцінки енергоспоживання.

Клемовий метод також має перевагу у швидкості вимірювання. Завдяки простоті процедури фахівець може за лічені секунди отримати точні показники струму без складної підготовки чи спеціального обладнання. Це робить його незамінним у роботі з великими або складними системами, де час має вирішальне значення.

Загалом, клемовий метод є одним із найзручніших та найуніверсальніших способів вимірювання струму, що дозволяє швидко, точно і безпечно отримувати необхідні дані. Його безконтактність, універсальність і практичність забезпечують широку популярність у найрізноманітніших сферах, роблячи його важливим інструментом у сучасній електротехніці.

4. Вимірювання струму за оптичним методом.

Оптичний метод вимірювання струму є одним із найсучасніших і найбільш точних способів визначення сили струму в електричних колах. Суть методу подано на рисунку 1.4. Він базується на використанні світлових сигналів та оптичних технологій для аналізу змін, викликаних електричним струмом. У цьому методі застосовуються спеціальні датчики або волоконно-оптичні системи, які зчитують зміни світлових характеристик, таких як інтенсивність, поляризація чи фаза світла, і на основі цього визначають величину струму. Цей підхід дозволяє виконувати вимірювання безконтактно, що робить його безпечним і зручним навіть у складних умовах.

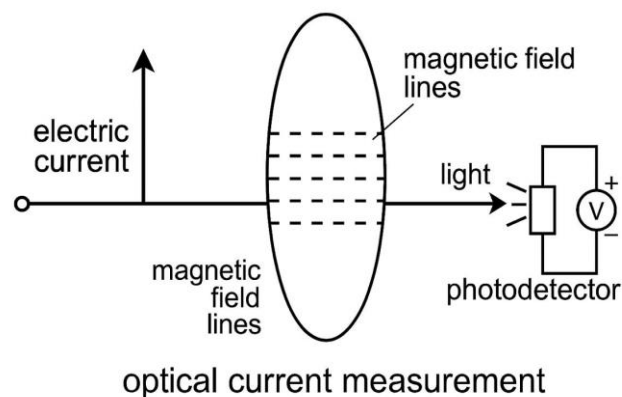


Рисунок 1.4 - Оптичний метод

Існує кілька основних підходів до оптичного вимірювання струму. Один із них — використання Фарадеєвського ефекту, який передбачає зміну поляризації світла під дією магнітного поля, створеного струмом, у спеціальному оптично

активному середовищі. Інший підхід базується на ефекті Керра, де зміни в показнику заломлення діелектричних матеріалів, спричинені електричним полем, впливають на поведінку світла. Ще одним популярним методом є використання волоконно-оптичних датчиків, які дозволяють передавати світловий сигнал через оптичне волокно, що проходить крізь магнітне поле струму. У таких системах зміни інтенсивності чи фази світла використовуються для визначення параметрів струму.

Завдяки своїм унікальним властивостям оптичні методи знаходять широке застосування у високотехнологічних галузях. Їхня здатність забезпечувати високу точність, стійкість до електромагнітних завад і безконтактність вимірювання робить їх ідеальними для використання в енергетиці, авіації, космічній промисловості та медицині. Наприклад, вони застосовуються для моніторингу струмів у високовольтних лініях електропередач, де традиційні методи можуть бути небезпечними або неточними.

Крім того, волоконно-оптичні системи дозволяють проводити вимірювання на значних відстанях, що є незамінним для роботи в умовах, де доступ до обладнання є обмеженим або небезпечним. Ця технологія також забезпечує високий рівень ізоляції, що важливо для систем із підвищеним рівнем напруги.

1.2.2 Засоби вимірювання струму.

Для практичної реалізації методів вимірювання струму застосовується широкий спектр апаратних засобів, що варіюються від дискретних компонентів до складних інтегрованих систем, призначених для збору, обробки та передачі даних у сучасних інформаційно-вимірювальних системах.

Одним з фундаментальних підходів є використання резистивних шунтів – прецизійних низькоомних резисторів (від 0,001 до 0,1 Ом), що вмикаються послідовно в коло. Падіння напруги на шунті, пропорційне струму, підсилюється та оцифровується. Типові рішення включають SMD-шунти (наприклад, WSBS8518), міліомні резистори високої точності, та модулі з інтегрованими підсилювачами

або спеціалізованими мікросхемами, такими як MAX4080, MAX471, а також цифрові датчики INA219 та INA226 з інтерфейсом I2C, що надають інформацію про струм, напругу й потужність. Перевагами шунтового методу є висока точність, особливо для постійного струму, та низька вартість, проте до недоліків належать втрати потужності на шунті та зазвичай відсутність гальванічної розв'язки, що робить їх оптимальними для низьковольтних кіл, наприклад, в акумуляторних системах чи контролерах живлення.

Альтернативою, що забезпечує гальванічну розв'язку, є датчики струму на основі ефекту Холла. Вони використовують напівпровідникову пластину, що генерує напругу під дією магнітного поля, створюваного струмом, і часто інтегрують сенсор Холла та схему підсилення. Популярні рішення, такі як ACS712 (з аналоговим виходом для струмів 5A, 20A, 30A), ACS758 або WCS1800, підтримують вимірювання змінного та постійного струму. Розрізняють датчики відкритого типу (open-loop), які простіші, але чутливі до зовнішніх магнітних полів та температурного дрейфу, та закриті (closed-loop або компенсаційні), наприклад, професійні компоненти серії LEM (як LAM-50P) або Honeywell CSNJ, що використовують додаткову котушку для компенсації магнітного поля, підвищуючи точність та стабільність за вищу ціну. Датчики Холла широко використовуються в побутових та промислових IoT-застосуваннях, промислових системах, електромобілях та сонячних інверторах.

Для вимірювання переважно змінного струму, особливо великих значень, застосовуються індуктивні датчики, відомі як струмові трансформатори (СТ). Вони працюють на принципі електромагнітної індукції, де провідник зі струмом виступає первинною обмоткою, а вторинна обмотка підключається до вимірювальної схеми, часто через навантажувальний резистор для перетворення струму на напругу. Популярні моделі, такі як SCT-013-000 (на 30A, 50A, 100A) або YHDC SCT-019, забезпечують повну гальванічну ізоляцію та відсутність втрат у самому датчику. Основним обмеженням є те, що вони працюють тільки зі змінним струмом, що робить їх ідеальними для моніторингу потужних електроприладів, в до-

машніх енерголічильниках (наприклад, OpenEnergyMonitor) та промислових системах моніторингу, а також у вигляді мобільних СТ-кліщів для безконтактного вимірювання.

Сучасний ринок також пропонує велику кількість інтегральних цифрових рішень та модулів, що поєднують сенсорний елемент з обробкою сигналу. Це мікросхеми типу вже згаданих INA219/INA226 (на базі шунта з I2C) або спеціалізовані енергомонітори, як MCP39F511 (з PF-корекцією), що надають дані через цифрові інтерфейси. Готові модульні вимірювачі струму, що включають датчик та необхідні компоненти, часто з клемми та індикацією, спрощують прототипування та інтеграцію.

На системному рівні використовуються цифрові електролічильники з інтерфейсами (наприклад, UART, RS-485 або IR), які дозволяють отримувати дані про споживання струму, напругу, потужність через протоколи, такі як Modbus, DLMS або MBus, для інтеграції в IoT-системи та системи моніторингу енергоспоживання. Останні дозволяють комплексно аналізувати дані від багатьох точок. Для високоточних завдань існують спеціалізовані лабораторні та промислові вимірювачі струму з широкими функціональними можливостями.

Кінцеві інтегровані рішення, такі як "розумні" розетки та різноманітні IoT-модулі, поєднують датчики струму, мікроконтролери (наприклад, на платформах Arduino, STM32, ESP32) та засоби зв'язку (Wi-Fi, Bluetooth, ZigBee) для комплексного моніторингу та управління. Для забезпечення якості сигналу та його обробки застосовуються допоміжні компоненти: аналого-цифрові перетворювачі (АЦП) високої розрядності для перетворення аналогових сигналів від датчиків, операційні підсилювачі для корекції або посилення слабких сигналів, та фільтри сигналів для усунення шумів. Такі рішення дозволяють не лише отримувати точні значення струму, але й здійснювати обробку в реальному часі, з можливістю прийняття автоматичних рішень на основі аналізу даних. Крім того, гнучкість архітектури дає змогу інтегрувати ці системи з іншими модулями — наприклад, керування навантаженням, аварійне вимкнення, або погодні прогнозування для оптимізації енергоспоживання.

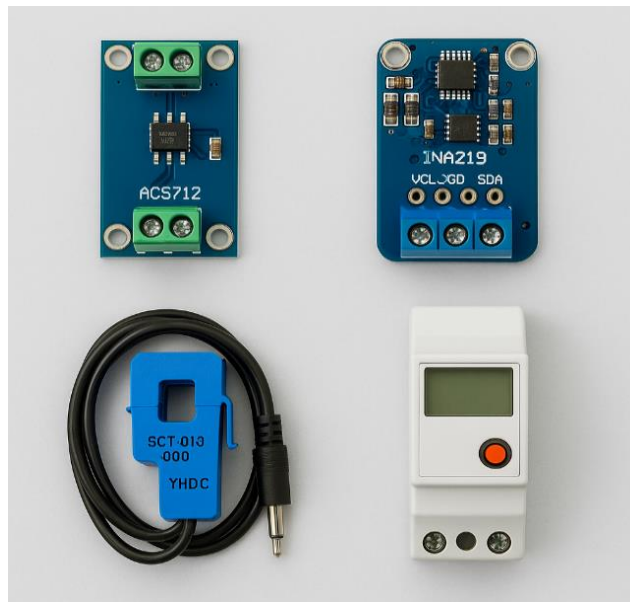


Рисунок 1.5 - Графічне представлення деяких засобів вимірювання струму

Окремо варто згадати спеціалізовані методи, такі як фібер-оптичні датчики струму (FOCS), що використовують ефект Фарадея для вимірювань у високовольтних системах (наприклад, ABB OPTOCORE), та експериментальні радіочастотні (RF) методи вимірювання струму. На рисунку 1.5 представлено окремі існуючі засоби вимірювання струму.

1.3 Огляд існуючих рішень для моніторингу енергоспоживання

Сучасний ринок пропонує широкий спектр рішень для моніторингу енергоспоживання, починаючи від простих портативних вимірювачів і закінчуючи складними інтегрованими системами управління енергією. Ці рішення можна класифікувати за різними критеріями, зокрема за масштабом застосування, рівнем автоматизації, функціональними можливостями та цільовою аудиторією.

Системи моніторингу енергоспоживання можуть бути класифіковані за декількома основними критеріями:

- За рівнем застосування:
 - індивідуальні (побутові) системи, призначені для контролю енергоспоживання в приватних будинках та квартирах;

- комерційні системи, які використовуються для офісних будівель, торгових центрів, невеликих підприємств;
- промислові системи, розроблені для великих виробничих підприємств та енергоємних виробництв;
- системи рівня міст та регіонів, що застосовуються для управління енергоспоживанням на рівні комунальних служб та енергомереж.
- За функціональними можливостями:
 - системи моніторингу (лише збирають та відображають дані про споживання);
 - системи аналітики (додатково аналізують зібрані дані, виявляють тренди та аномалії в споживанні);
 - системи управління (дозволяють автоматично контролювати роботу електроприладів та оптимізувати їхнє споживання);
 - інтегровані системи (поєднують моніторинг з іншими системами, наприклад, освітлення, клімат-контроль, системи безпеки, формуючи комплексні рішення для "розумних" будівель.

Побутові рішення для моніторингу енергоспоживання

У сегменті побутових рішень доступні як прості, так і комплексні системи.

- Розумні розетки та вимикачі.
 - Технічні характеристики: вимірюють струм, напругу та потужність; забезпечують бездротовий зв'язок (Wi-Fi, Zigbee, Z-Wave); керуються за допомогою мобільних додатків, що дозволяють дистанційно вмикати/вимкнути прилади та моніторити споживання.
 - Приклади продуктів: TP-Link Kasa Smart Wi-Fi Plug, Amazon Smart Plug, Xiaomi Mi Smart Plug.
 - Переваги: простота встановлення та використання, низька вартість, можливість контролю окремих приладів, інтеграція з системами розумного дому.
 - Недоліки: обмежена точність вимірювань, необхідність окремої розетки для кожного приладу, залежність від стабільності Wi-Fi мережі.[8,9,10,12]

- Системи цілісного моніторингу будинку.
 - Sense Home Energy Monitor: встановлюється в електричний щиток, використовує машинне навчання для розпізнавання індивідуальних приладів за їхніми "енергетичними відбитками", надає детальну аналітику через мобільний додаток.
 - Emporia Vue Energy Monitor: модульна система з можливістю розширення (до 16 індивідуальних каналів вимірювання), хмарна платформа для аналізу даних, сповіщення про аномальне споживання.
 - Технічні особливості: точність вимірювання становить $\pm 1-2\%$; частота оновлення даних – реальний час або з інтервалом 1–5 секунд; інтерфейси зв'язку включають Wi-Fi, Ethernet, а деякі моделі підтримують мобільні мережі; живлення здійснюється від вимірюваного кола або окремого джерела.
- Розумні лічильники електроенергії (Smart Meters).
 - Функціональні можливості: двосторонній зв'язок з енергопостачальною компанією, підтримка диференційованих тарифів за часом доби, віддалене зняття показань, контроль якості електроенергії.
 - Технології зв'язку: Power Line Communication (PLC), RF Mesh Networks, Cellular (GPRS/3G/4G), Wi-Fi (для побутових застосувань).

Комерційні та промислові рішення

Ці рішення розроблені для великих об'єктів та складних енергетичних систем, що потребують високої точності та масштабованості.

- Системи управління енергією будівель (BEMS):
 - Schneider Electric EcoStruxure Building: інтегрує системи освітлення, кондиціонування, енергоживлення, використовує предиктивну аналітику для оптимізації споживання, підтримує відкриті протоколи (BACnet, Modbus, LonWorks), має хмарну платформу для управління кількома об'єктами.

- Siemens Desigo CC: централізоване управління всіма інженерними системами, енергетичний моніторинг з деталізацією до рівня окремих споживачів, автоматична оптимізація режимів роботи обладнання, інтеграція з системами пожежної безпеки та контролю доступу.
- Honeywell Enterprise Buildings Integrator: масштабована архітектура від окремих будівель до корпоративних мереж, розширена аналітика з машинним навчанням, інтеграція з ERP та іншими корпоративними системами, мобільні додатки для диспетчерів та технічного персоналу.
- Промислові системи енергетичного менеджменту:
 - ABB Ability Energy and Asset Manager: моніторинг енергоспоживання виробничих ліній, аналіз ефективності використання обладнання (OEE), прогнозування попиту на енергію, інтеграція з системами автоматизації виробництва.
 - General Electric Power Manager: розподілені системи збору даних, аналіз якості електроенергії, система сповіщень про аварійні ситуації, веб-інтерфейс для віддаленого доступу.
 - Технічні характеристики: точність вимірювання становить 0.1–0.5%; кількість каналів може варіюватися від сотень до тисяч; частота вимірювання — до 1 кГц і вище; підтримуються протоколи зв'язку Modbus, DNP3, IEC 61850, OPC UA; забезпечується резервування та відмовостійкість.

Інноваційні рішення та тренди

Сучасні розробки активно впроваджують нові технології для підвищення ефективності моніторингу та управління енергоспоживанням.

- Системи на базі штучного інтелекту (ШІ):
 - Non-Intrusive Load Monitoring (NILM): розпізнавання електроприладів за характеристиками споживання за допомогою машинного навчання, що дозволяє моніторинг без встановлення індивідуальних датчиків.
 - Predictive Analytics: прогнозування споживання енергії на основі історичних даних, виявлення аномалій та потенційних несправностей, автоматичні рекомендації з оптимізації споживання.

- Blockchain-технології в енергетиці:
 - Peer-to-peer торгівля енергією: прямі угоди між виробниками та споживачами енергії за допомогою смарт-контрактів для автоматизації розрахунків, децентралізований облік виробництва та споживання.
 - Grid+ Energy Platform: використовує криптовалютні розрахунки за електроенергію, дозволяє автоматичне переключення між постачальниками енергії, токенизацію енергетичних активів.
- IoT та Edge Computing:
 - Розподілена обробка даних: обробка даних на рівні Edge-пристроїв зменшує навантаження на хмарну інфраструктуру та підвищує швидкість реакції системи.
 - Інтеграція з 5G мережами: забезпечує високу швидкість передачі даних, низьку затримку для критичних застосувань та можливість підключення великої кількості пристроїв.[1,2,3,7]
- Хмарні платформи для енергетичного моніторингу:
 - Amazon Web Services (AWS) IoT Core: масштабне збирання даних з IoT-пристроїв, аналітичні сервіси для обробки енергетичних даних, машинне навчання для прогнозування споживання, інтеграція з іншими AWS сервісами.
 - Microsoft Azure IoT: Azure Digital Twins дозволяє створювати цифрові двійники енергетичних систем, моделювання та симуляцію споживання енергії, інтеграцію з системами управління будівлями.
 - Google Cloud IoT: Google Cloud IoT Core забезпечує безпечне підключення та управління IoT-пристроями, BigQuery для аналізу великих обсягів енергетичних даних, AI Platform для розробки моделей машинного навчання.

Стандарти та протоколи

Для забезпечення сумісності та ефективності систем моніторингу використовуються загальноприйняті стандарти та протоколи.

- Протоколи зв'язку:

- Modbus: широко використовується в промислових застосуваннях, підтримує RTU та TCP варіанти, відрізняється простотою реалізації та налагодження.
- IEC 61850: стандарт для систем автоматизації підстанцій, базується на Ethernet-комунікації, має стандартизовані моделі даних.
- OPC UA: платформи-незалежний протокол з вбудованою безпекою та автентифікацією, підтримує складні структури даних.
- Стандарти енергетичного моніторингу:
 - ISO 50001: система управління енергією, що встановлює вимоги до моніторингу, звітності та постійного покращення енергетичної ефективності.
 - IEC 62056: стандарт для зчитування лічильників електроенергії, використовує протокол DLMS/COSEM, забезпечує безпеку та автентифікацію.

Порівняльний аналіз рішень

Вибір оптимального рішення залежить від конкретних потреб та умов. Порівняння систем моніторингу подано в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1- Порівняння систем моніторингу.

Тип рішення	Точність	Вартість	Складність встановлення	Застосування	Інтеграція з IoT
Розумні розетки	Середня	Низька	Низька	Побут	Висока
Побутові лічильники	Висока	Середня	Середня	Побут	Середня
NILM-системи	Середня	Висока	Висока	Побут/дослідження	Висока
Промислові системи	Висока	Висока	Висока	Промисловість	Середня
IoT-системи	Середня	Середня	Низька/Середня	Побут	Висока

Критерії оцінки систем моніторингу:

- Функціональність: кількість параметрів, що вимірюються, можливості аналізу та звітності, інтеграція з іншими системами.
- Технічні характеристики: точність вимірювань, частота оновлення даних, масштабованість системи.
- Економічні показники: вартість обладнання та програмного забезпечення, вартість встановлення та налаштування, експлуатаційні витрати.
- Зручність використання: складність встановлення, інтуїтивність інтерфейсу, можливості кастомізації.

Тенденції розвитку ринку

Ринок рішень для моніторингу енергоспоживання активно розвивається, демонструючи ключові тенденції. Відбувається консолідація та стандартизація, об'єднання різних типів систем під єдиними платформами, розвиток відкритих стандартів та API, уніфікація протоколів зв'язку. Спостерігається збільшення ролі штучного інтелекту, автоматизація аналізу даних, предиктивне обслуговування обладнання, персоналізовані рекомендації для користувачів. Посилюється фокус на кібербезпеці, використовуються вбудовані механізми шифрування, регулярні оновлення безпеки, сертифікація за міжнародними стандартами. Також набирає популярності еко-орієнтованість рішень, інтеграція з системами відновлюваної енергетики, оптимізація вуглецевого сліду, підтримка програм енергоефективності. Існуючі рішення для моніторингу енергоспоживання демонструють широкий спектр підходів та технологій. Від простих побутових пристроїв до складних промислових систем, кожне рішення має свої переваги та області застосування. Вибір конкретного рішення залежить від масштабу завдань, бюджету, технічних вимог та специфіки об'єкта моніторингу. Тенденції розвитку вказують на зростання ролі штучного інтелекту, хмарних технологій та інтеграції різних систем в єдині платформи управління енергією. Це відкриває нові можливості для створення ефективних, універсальних та безпечних інформаційно-вимірювальних систем.

Ринок рухається до створення більш спеціалізованих рішень, адаптованих під потреби конкретних галузей – наприклад, для промислового виробництва, комерційних будівель, сільського господарства, центрів обробки даних тощо. Моніторинг енергії все частіше стає частиною ширших екосистем "розумних" будівель (Smart Building Management Systems) або навіть "розумних" міст, де дані про енергію обмінюються з системами безпеки, автоматизації та іншими комунальними службами.

Ці тенденції свідчать про те, що ринок рішень для моніторингу енергоспоживання перетворюється з нішевого інструменту на центральний елемент сучасної енергетичної інфраструктури, що є ключовим для досягнення глобальних цілей сталого розвитку.

У першому розділі своєї роботи я детально обґрунтував виняткову актуальність дослідження та моніторингу струму споживання електроприладів у сучасному світі. Зростання світового попиту на електроенергію, обмеженість природних ресурсів та нагальна потреба в підвищенні енергоефективності роблять точне вимірювання та аналіз енергоспоживання невід'ємною складовою як для побутових, так і для промислових споживачів. Тому у даному розділі я продемонстрував, що моніторинг струму є ключовим інструментом для:

- виявлення енергоємних та несправних приладів, що дозволяє оптимізувати витрати та запобігати перевантаженням мережі;
- справедливого розподілу витрат у спільному користуванні, що особливо важливо в умовах колективного споживання;
- підвищення технічної безпеки та надійності електромереж, завдяки завчасному виявленню перевантажень *та аварійних ситуацій*.

Також було проведено огляд основних методів вимірювання струму, включаючи ефект Холла, шунтовий, клемовий та оптичний методи, кожен з яких має свої переваги та сфери застосування, відрізняючись точністю, безпекою та універсальністю. Проаналізовані сучасні засоби вимірювання, від резистивних шунтів до індуктивних датчиків та цифрових інтегрованих рішень, що підкреслює обширну бібліотеку доступних компонентів для розробки.

Насамкінець, у розділі було надано класифікацію та детальний огляд існуючих рішень для моніторингу енергоспоживання, розділених за рівнем застосування (індивідуальні, комерційні, промислові) та функціональними можливостями (моніторинг, аналітика, управління). Особливу увагу мною було приділено провідним тенденціям ринку, таким як глибока інтеграція з IoT, активне використання штучного інтелекту та машинного навчання для прогнозування й оптимізації, поширення хмарних платформ та розвиток рішень для відновлюваної енергетики. Ці тенденції вказують на те, що системи моніторингу енергоспоживання є не просто вимірювальними інструментами, а стратегічними компонентами "розумних" енергосистем майбутнього.

2 РОЗРОБКА ІНФОРМАЦІЙНО- ВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ

2.1 Вибір та обґрунтування структурної та електричної схем системи

Структурна схема-це графічне представлення основних компонентів системи та взаємозв'язків між ними. Це один з найважливіших етапів розробки технічного проєкту, оскільки він дозволяє візуально представити структуру та організацію системи. Блок-схеми дозволяють чітко визначити, як компоненти взаємодіють один з одним, що дозволяє дуже легко розібратися в проєкті як розробникам, так і тим, хто буде працювати з готовою системою в майбутньому.

Необхідність створення структурної схеми полягає в тому, що на ранніх стадіях проєкту можна виділити ключові елементи системи і визначити їх взаємодію. Для складних проєктів, що включають різні рівні систем і кілька підсистем, блок-схеми надають огляд всієї системи, що робить їх незамінним інструментом для розробників. Крім того, схема дозволяє виявити потенційні вузькі місця в системі, проаналізувати можливі проблеми зі зв'язком між компонентами і запобігти непередбачених помилок.

Ознайомившись з блок-схемою, ви зможете отримати всю необхідну інформацію про взаємозв'язок між мікроконтролером, датчиком струму, блоком живлення та іншими модулями. Це дозволяє зрозуміти, як передаються дані всередині системи, які компоненти відповідають за різні етапи вимірювання та обробки сигналів, а також допомагає планувати подальші етапи розробки, зокрема програмування та тестування.[4]

Створення блок-схеми є важливим кроком у будь-якому проєкті, оскільки він дає чітке уявлення про ключові компоненти системи та їх функціональність. Без такої схеми реалізація проєкту буде набагато складніша і таким чином можна буде зіткнутися з проблемами на етапі інтеграції компонентів. Структурна схема дозволяє уникнути багатьох труднощів, гарантуючи, що система буде спланована на високому рівні. Структурна схема мого пристрою подана на рисунку 2.1.



Рисунок 2.1- Структурна схема пристрою

Першим елементом моєї структурної схеми є блок під назвою «Джерело живлення». У ролі джерела може виступати акумулятор, адаптер або інший тип джерела струму. У нашому випадку це синусоїдальний сигнал змінної форми, тобто струм із загальноприйнятим значенням 220 В.

Далі йде «Датчик струму». Ним може бути будь-який пристрій чи модуль, через який проходить струм, що вимірюється.

В ролі елемента-споживача можливий будь який електроприлад.

Останнім блоком є мікроконтролер ESP32, не менш важливий компонент системи для аналізу, обробки і відображення результатів в кількісному вигляді.[1,2,3,7,10]

На відміну від структурної, електрична схема надає детальний опис з'єднань між окремими електронними компонентами пристрою. Вона показує, як саме компоненти з'єднані між собою проводами та які елементи використовуються.

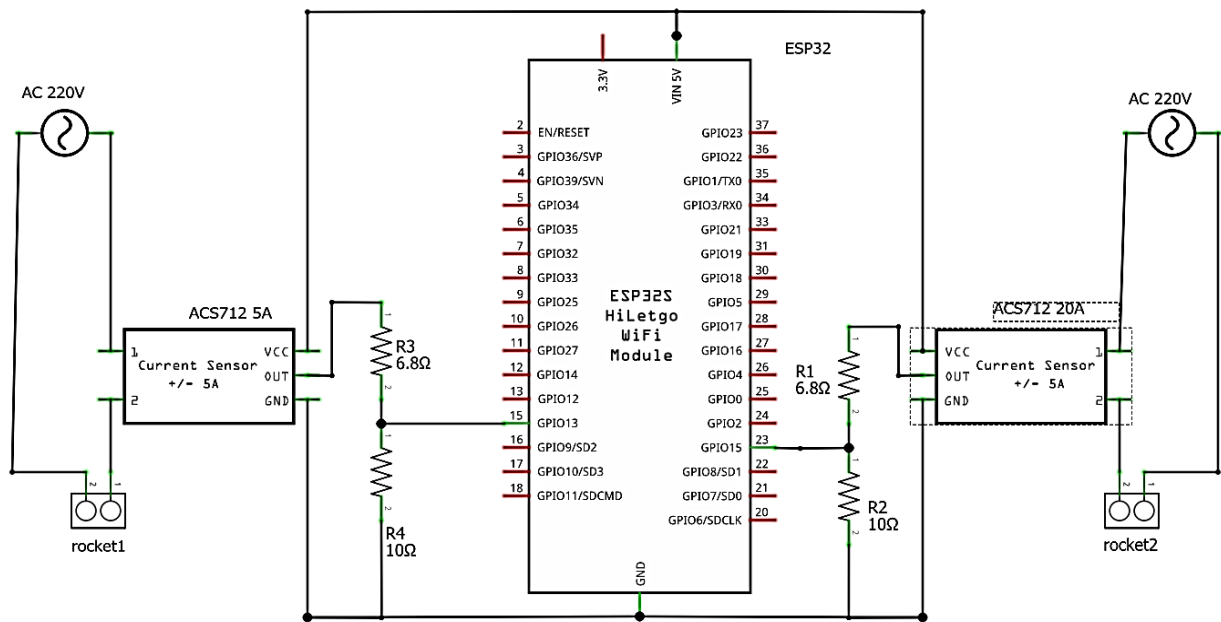


Рисунок 2.2- Електрична схема пристрою

Електрична схема мого пристрою (рисунок 2.2) відображає наступні процеси: змінний струм від джерела прямує проводом до елемента навантаження. У цей провідник вбудовано датчик струму, котрий передає отримане вимірювання до мікроконтролера. Мікроконтролер, використовуючи алгоритм обробки, інтерпретує отримане значення та перетворює його на числовий формат, зрозумілий для людського сприйняття. Візуальне представлення функціональної схеми подано на рисунку 2.3.

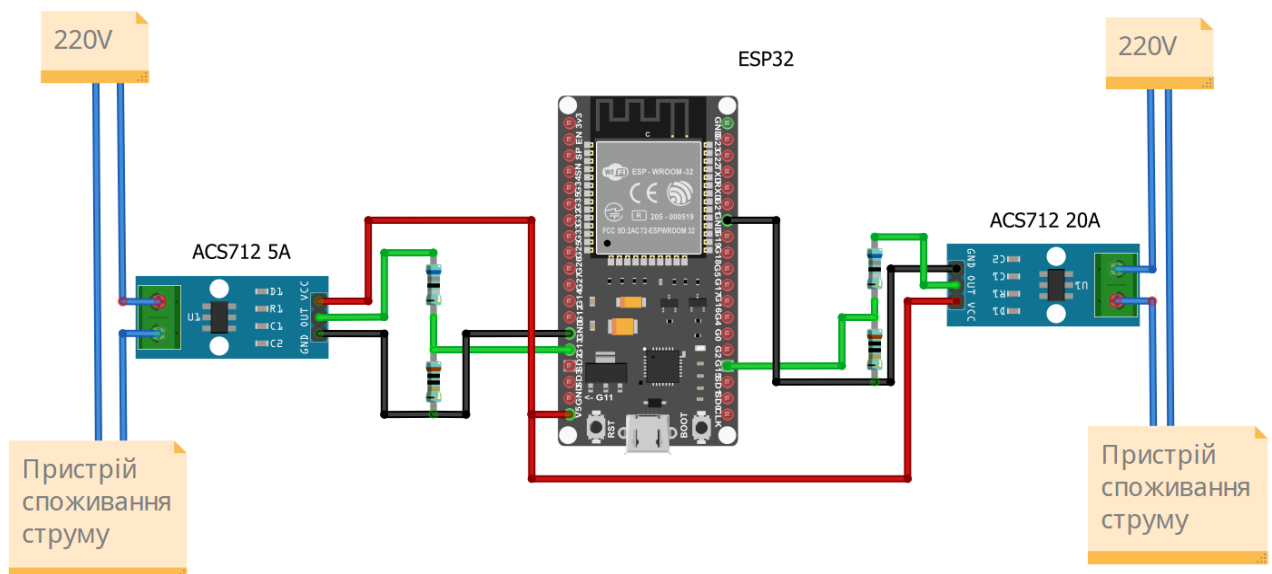


Рисунок 2.3- Візуальне представлення функціональної схеми

Окрім основних елементів та зв'язку між ними, на електричній та функціональній схемах представлена компоновка із резисторів, яка виступає у ролі подільника напруги (рисунок 2.4).

$$U_{\text{вих}} = R2 * \frac{U_{\text{вх}}}{R1 + R2}$$

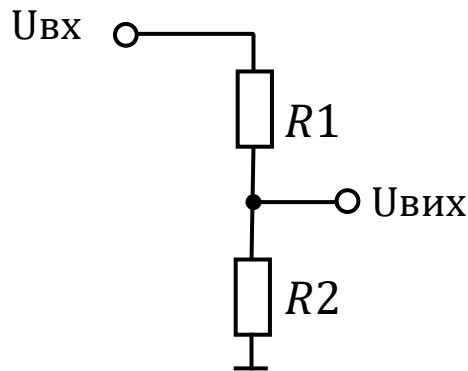


Рисунок 2.4- Подільник напруги

У своїй роботі я розглянув одну з ключових проблем під час розробки та впровадження будь-якої системи – невідповідність номінального значення сигналу між її компонентами, необхідних для їхньої злагодженої роботи. При проєктуванні системи важливо пам'ятати, що всі її елементи повинні функціонувати на єдиному рівні сигналу, в моєму випадку – це значення параметру напруги, яке є основою для роботи всіх елементів системи. Згідно з технічними характеристиками, модуль ACS712 та мікроконтролер ESP32 працюють від джерела напруги 5 В, але ESP32 сконструйований для сприйняття вхідного сигналу з напругою не більше 3,3 В. Беручи до уваги ці апаратні особливості, використання дільника напруги є виправданим рішенням.

2.2 Розробка алгоритму вимірювання та обробки даних

Алгоритм – це чіткий набір кроків, правил або інструкцій, що визначають, як досягти конкретної мети чи розв'язати проблему. У контексті програмування алгоритми є фундаментом для розробки програмного забезпечення, бо вони опи-

сують порядок виконання операцій та визначають логіку роботи програми. Алгоритми можуть бути не тільки реалізовані у вигляді програмного коду, але й представлені у вигляді графічних структур, як-от блок-схеми.

Розробка алгоритму є критично важливою для коректної реалізації програми, вона дозволяє розробникам структурувати задачі, уникати помилок програмування та зрозуміти логіку роботи системи під час її створення. Крім того, алгоритм слугує основою для тестування, налагодження та оптимізації програмного забезпечення. Без правильно розробленого алгоритму неможливо визначити, як функціонує система загалом і як взаємодіють її компоненти.

Історія алгоритмів сягає глибини століть, адже термін "алгоритм" походить від імені середньовічного арабського математика Аль-Хорезмі, який у IX столітті написав працю під назвою "Книга про математичний аналіз за допомогою індійців". У цій книзі він описав методи розв'язання математичних рівнянь, які лежать в основі сучасних математичних алгоритмів. Але важливість алгоритмів було усвідомлено лише з розвитком комп'ютерних технологій у 20 столітті, коли алгоритми стали використовувати не лише для розв'язання математичних задач, а й для вирішення складних інженерних, наукових та технічних проблем.

Алгоритм є важливим інструментом під час розробки програмного забезпечення для мікропроцесорних систем, оскільки він чітко визначає процедуру обробки даних. Наприклад, у моїй роботі розробка алгоритму вимірювання та контролю струму полягає в отриманні даних від датчика струму (ACS712), обробці цих даних за допомогою мікроконтролера (ESP32), відображенні результатів в інтерфейсі користувача або виконанні певних дій (наприклад, для контролю струму). Можливі й інші варіанти обробки даних. Скажімо, у разі перевищення поточного порогового значення, джерело живлення відключається. Тож алгоритм має забезпечувати коректну роботу кожного з цих етапів та організувати ефективну взаємодію всіх модулів системи.

Під час розробки алгоритму даного пристрою я враховував кілька аспектів. Передусім, він повинен бути логічно коректним і охоплювати всі можливі випадки та ситуації, які можуть виникнути в процесі роботи програми. Окрім цього,

тонкощі розробки алгоритму містять облік помилок, що можуть виникнути під час введення даних, обробку виняткових ситуацій і правильну взаємодію між компонентами системи, щоб додаток працював швидко та ефективно, не перевантажуючи мікроконтролер та не витрачаючи зайві ресурси.

Алгоритм – це не лише технічний документ, а й важливий крок у розумінні задач, які розв'язує система. Тому, на відміну від короткого опису проблеми, алгоритм містить логіку рішення та основні принципи, на яких працює система.

Загалом, розробка алгоритмів є невід'ємною частиною програмування, що дає змогу ефективно вирішувати складні завдання, планувати роботу системи, уникнути помилок та забезпечувати високий рівень надійності та ефективності. Знання того, як створювати та оптимізувати алгоритми, є базовим навиком для всіх інженерів, програмістів та системних аналітиків.

Спираючись на створену структурну схему, алгоритм для системи можна трактувати таким чином. Основний об'єкт дослідження – це струм, що має вигляд синусоїдального сигналу змінної форми. Щоб зафіксувати його параметричні зміни, буде використовуватися датчик струму ACS712. По провіднику, до якого попередньо під'єднано датчик, проходить струм до елемента навантаження. Роль елемента навантаження може відігравати будь-який електричний пристрій, через який проходитиме струм для його вимірювання. Коли пристрій перебуватиме в активному стані, тобто увімкненому, струм, що протікає, змінюватиме свої параметричні показники, датчик струму реагуватиме на ці зміни та надсилатиме відповідні сигнали мікроконтролеру. Мікроконтролер, в моєму випадку ESP32, прийматиме та оброблятиме вхідний сигнал до формату кількісного значення для якісного сприйняття людиною цього значення. Відповідно до технічних характеристик датчика, дана послідовність дій повторюватиметься кожні 5 мкс, внаслідок чого ми зможемо отримати дані про мінімальні зміни в параметрах струму.

Маючи загальну картину по змінних параметрах струму, можна реагувати на них різним чином. Як варіант можна організувати процес попередження про

критичні значення, що супроводжуватиметься звуковими сигналами або повідомленнями на смартфон людині. Або ж реалізувати процес знеструмлення лінії при критичних навантаженнях.

У моєму випадку буде реалізовано зчитування та виведення на екран параметрів струму. Для відображення даних параметрів використовуватиметься IoT система Blynk.

2.3 Вибір та реалізація апаратних засобів

Аналізуючи різні методи вимірювання струму — за ефектом Холла, шунтовий, клемовий та оптичний — можна виділити їх сильні сторони та обмеження. Шунтовий метод забезпечує високу точність і простоту реалізації, але вимагає фізичного втручання в коло, що може бути небезпечним або незручним у складних системах. Клемовий метод, завдяки своїй безконтактності, є зручним і швидким, але обмежується точністю при малих струмах та залежить від якості магнітного екранування. Оптичний метод є високотехнологічним і забезпечує високу точність та ізоляцію, але негативною стороною є його складність, висока вартість та специфічні умови роботи.

Датчики на основі ефекту Холла забезпечують точність і надійність вимірювань завдяки своїй здатності працювати зі змінним і постійним струмом. Хоча вони вимагають включення в коло, це компенсується низьким опором провідника (1.2 мОм), який мінімізує втрати енергії та тепловиділення. На відміну від шунтового методу, який також передбачає фізичний контакт, датчики Холла забезпечують електричну ізоляцію між вимірювальними та сигнальними колами, що підвищує безпеку системи.

У даній праці для вимірювання електричного струму буде використовуватися окремий модуль на основі ACS712, який вбудовується у досліджуване електричне коло. Розглянемо його детальніше.

ACS712 — це повністю інтегрований сенсор струму на основі ефекту Холла, розроблений компанією Allegro MicroSystems. Його головна перевага — точне

та економічне вимірювання змінного (AC) або постійного (DC) струму, що робить його незамінним у промислових, комерційних та комунікаційних системах. Завдяки компактному корпусу SOIC8 цей сенсор легко інтегрувати в будь-які пристрої, що додає зручності при розробці нових проєктів.

Принцип роботи ACS712 досить витончений. Він використовує спеціальний провідник із низьким опором, через який протікає струм, що створює магнітне поле. Це поле фіксується точним датчиком Холла, який, у свою чергу, перетворює його в пропорційну напругу. Усі ці складні процеси " в крихітний чіп, що забезпечує високу точність і стабільність показників.

Цей сенсор може вимірювати струм у двох напрямках, що додає гнучкості у використанні. Його чутливість залежить від моделі: є варіанти для вимірювання струму ± 5 А (185 мВ/А), ± 20 А (100 мВ/А) і ± 30 А (66 мВ/А). Для роботи потрібно лише стандартне живлення 5 В, а вихідний сигнал змінюється пропорційно до струму, що протікає через провідник, забезпечуючи легку інтеграцію з іншими пристроями.

Серед ключових технічних особливостей ACS712 можна виділити низький рівень шуму сигналу, можливість налаштування смуги пропускання за допомогою спеціального контакту FILTER, високу ізоляцію (2.1 кВ RMS) між струмовим провідником та сигналами, а також надзвичайно низький опір провідника — всього 1.2 мОм. Завдяки цьому сенсор практично не гріється і не додає помітних втрат енергії до системи. Швидкість реакції (5 мкс) і широка смуга пропускання (80 кГц) роблять його ідеальним для вимірювань динамічних змін струму.

А тепер трохи про те, як його використовують у реальних умовах. Датчик струму ACS712 (рисунок 2.5) часто можна знайти в системах керування двигунами, моніторингу навантаження, блоках живлення, системах захисту від перевантаження струмом та навіть у пристроях для контролю батарей. Його ізольоване вимірювання дозволяє уникати використання дорогих оптопар або інших методів ізоляції, що суттєво здешевлює розробку.

Окрім технічних характеристик, варто звернути увагу на стабільність датчика. Завдяки спеціальній технології стабілізації (chopper-stabilization) вплив температури чи механічного стресу на точність вимірювання мінімізований, тож навіть при значних перепадах температури ви отримаєте точні та повторювані результати.

Зважаючи на вище сказане, можна зауважити, що ACS712 — це не лише про точність і надійність, але й про зручність. Його гнучкість у налаштуваннях, простота інтеграції та багатофункціональність роблять його справжнім помічником для інженерів, які прагнуть створювати сучасні пристрої. [16]

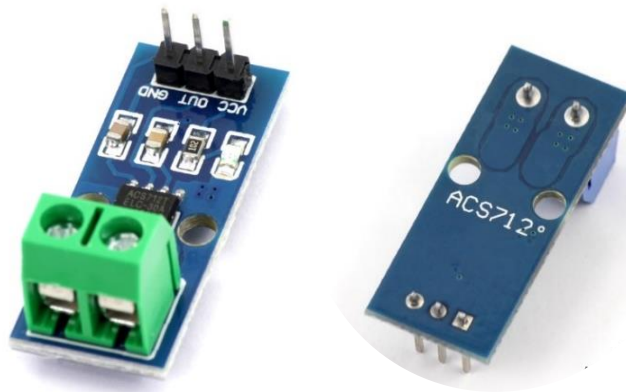


Рисунок 2.5 - Датчик струму ACS712

Для обробки, аналізу та перетворення сигналів, отриманих від модуля, у зрозумілий для людини числовий показник використовуватимемо плату мікроконтролера ESP32 (рисунок 2.6). Ця плата базується на двоядерному мікроконтролері Xtensa LX6 від Espressif Systems і є популярним вибором для розробки електронних проєктів.

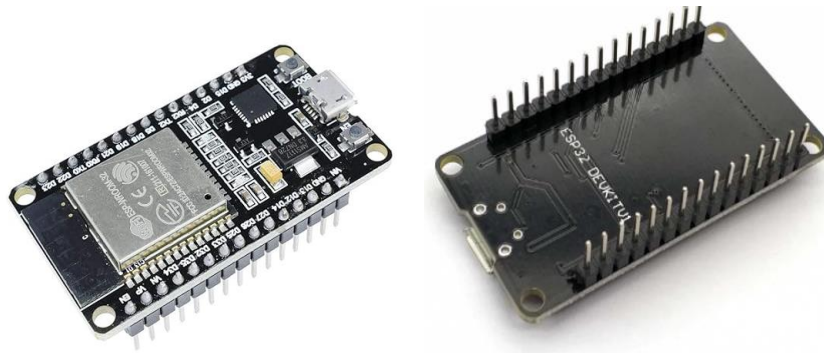


Рисунок 2.6 - Мікроконтролер ESP32

ESP32 — це універсальний мікроконтролер, який поєднує високу продуктивність і широкі можливості для різноманітних застосувань. Він підходить як для початківців, так і для досвідчених розробників завдяки своїй гнучкості, доступності та підтримці активної спільноти. Плата належить до екосистеми з відкритим кодом і підтримує розробку через популярні середовища програмування, такі як Arduino IDE. Принцип роботи ESP32 ґрунтується на обробці команд, написаних на спрощеній мові C/C++, що завантажуються через USB або інші інтерфейси. Мікроконтролер виконує програми, які дозволяють керувати підключеними пристроями, обробляти дані з датчиків або взаємодіяти з мережею. ESP32 оснащений двоядерним процесором із частотою до 240 МГц, що забезпечує високу швидкість обробки.

Плата має 38 цифрових входних-вихідних контактів, 18 аналогових входів, підтримує Wi-Fi та Bluetooth, що робить її ідеальною для IoT-проектів. Живлення можливе через USB або зовнішнє джерело (3,3–5 В). ESP32 підтримує підключення до широкого спектру пристроїв: датчиків, дисплеїв, модулів зв'язку та інших компонентів. Завдяки модульній архітектурі до плати можна під'єднувати додаткові розширювальні модулі.[18]

Основні характеристики: ESP32 працює з напругою 3,3 В, має 520 КБ оперативної пам'яті (SRAM), 448 КБ флеш-пам'яті для програм і до 4 МБ зовнішньої пам'яті. Аналогові входи забезпечують роздільну здатність 12 біт, що дозволяє точно обробляти сигнали. Цих ресурсів достатньо для реалізації як простих, так і складних проектів.

Переваги ESP32 включають легкість у використанні та інтеграцію бездротових технологій. Навіть новачки можуть швидко розпочати роботу, наприклад, підключивши датчик і налаштувавши передачу даних через Wi-Fi. Відкритий код і доступність схем дозволяють модифікувати плату під конкретні задачі. Велика кількість бібліотек спрощує роботу з різними модулями, такими як датчики температури, GPS чи камери.

ESP32 використовується в широкому спектрі застосувань: від систем "розумного дому" до робототехніки, автоматизації та прототипування IoT-рішень.

Плата популярна в освіті, оскільки допомагає вивчати програмування, електроніку та мережеві технології. У професійних проєктах ESP32 часто застосовується для створення прототипів перед розробкою спеціалізованих пристроїв.[17]

При сумісній роботі цих двох технологій відкриваються безмежні можливості для створення інтелектуальних та автономних систем. ESP32 виступає "суперкомп'ютером", який приймає дані від ACS712, обробляє їх з високою точністю і дозволяє передавати інформацію через інтернет або використовувати для керування складними системами. ACS712, у свою чергу, виступає "прецизійними сенсорами", що вимірюють струм, перетворюючи його в високоточний аналоговий сигнал, який легко обробляється потужним мікроконтролером. Завдяки цьому тандему можна не лише відстежувати струм у реальному часі з надвисокою точністю, але й створювати складні системи: відправляти сповіщення на смартфон при аномаліях, інтегруватися з хмарними платформами, керувати промисловим обладнанням дистанційно.

Однією з головних переваг їхньої спільної роботи є можливість реалізації найскладніших завдань. ESP32 зчитує аналоговий сигнал від ACS712 через один із своїх 12-бітних АЦП, а потім обробляє його за допомогою складних програмних алгоритмів з використанням обох процесорних ядер. Можна створити глобальну систему моніторингу енергоспоживання, яка показує дані в реальному часі через веб-інтерфейс, зберігає історичні дані в хмарі або керує енергосистемами автоматично.

Поєднання ESP32 і ACS712 відкриває можливості для створення таких проєктів, як розумні розетки, IoT-платформи, системи моніторингу електроприладів чи автоматизації промислових процесів. Цей тандем поєднує доступність, універсальність і потужність для реалізації інноваційних рішень.

2.4 Вибір та реалізація програмних засобів

Створення програмного забезпечення — вирішальний етап у будь-якому проєкті, адже саме код забезпечує безперебійну взаємодію апаратних компонентів

та алгоритмів. Розробку програмного забезпечення для роботи свого пристрою я проводив у середовищі Arduino IDE, яке є зручним і широко використовуваним інструментом для програмування мікроконтролерів, зокрема ESP32. Arduino IDE пропонує інтуїтивно зрозумілий інтерфейс, підтримку великої кількості плат і бібліотек, що полегшує створення програм навіть для початківців. Мова програмування, використана в проєкті, базується на C/C++, що забезпечує високу продуктивність і гнучкість для реалізації складних завдань, таких як обробка даних із датчиків і передача їх через мережу.

Основною метою під час написання коду я визначив створення автономної та ефективної програми. Особливістю роботи даного програмного коду є його орієнтованість на створення IoT-системи моніторингу струму з використанням хмарної платформи Blynk. Програма реалізує циклічний алгоритм збору даних з двох датчиків струму, їх обробки та передачі до хмарного сервісу через Wi-Fi з'єднання. Код структурований таким чином, що забезпечує автономну роботу системи з мінімальним споживанням енергії завдяки періодичному відключенню від мережі після передачі даних. Для цього мною було використано мінімальну кількість зовнішніх бібліотек, зокрема `WiFi.h`, `WiFiClient.h` і `BlynkSimpleEsp32.h`, які необхідні для підключення до Wi-Fi та передачі даних на платформу Blynk.

```
#include <WiFi.h>
#include <WiFiClient.h>
#include <BlynkSimpleEsp32.h>
```

Рисунок 2.7 - Бібліотеки для роботи системи

Бібліотека `WiFi.h` (рисунок 2.7) забезпечує базову функціональність підключення ESP32 до бездротової мережі, надаючи можливості керування з'єднанням та моніторингу статусу підключення. `WiFiClient.h` розширює можливості мережевої взаємодії, дозволяючи створювати клієнтські з'єднання для обміну даними з віддаленими серверами. Найважливішою є бібліотека `BlynkSimpleEsp32.h`, яка спрощує інтеграцію з хмарною платформою Blynk, надаючи готові функції для

автентифікації, підключення та передачі даних через віртуальні піни. Такий підхід зменшує залежність від додаткових бібліотек, спрощує перенесення коду на інші платформи та сприяє кращому розумінню логіки роботи програми. Використання бібліотеки Blynk дозволяє легко інтегрувати проєкт із мобільними додатками для віддаленого моніторингу, що, на мою думку, є важливим для IoT-систем.

Основна логіка програми побудована навколо функції `loop()`, яка виконує послідовне зчитування максимальних значень з двох датчиків струму протягом однієї секунди. Функції `getMaxValue0()` та `getMaxValue1()` (рисунк 2.8) реалізують алгоритм пошуку піків сигналу, що є критично важливим для точного вимірювання змінного струму.

```
int getMaxValue0() {  
    int sensorValue0;  
    int sensorMax0 = 0;  
    uint32_t start_time = millis();  
  
    while ((millis() - start_time) < 1000) {  
        sensorValue0 = analogRead(CURRENT_SENSOR0);  
        if (sensorValue0 > sensorMax0) {  
            sensorMax0 = sensorValue0;  
        }  
    }  
    return sensorMax0;  
}
```

Рисунок 2.8 - Лістинг функції `getMaxValue0()` для визначення максимального значення аналогового сигналу

Отримані значення піддаються математичній обробці з урахуванням специфічних коефіцієнтів для кожного датчика, що забезпечує коректне перетворення цифрових показань у фізичні величини струму (рисунк 2.9).

```

int sensor_max0 = getMaxValue0();
int sensor_max1 = getMaxValue1();

amplitude_current0 = (float)(sensor_max0 - 2048) * 1.8 / 4095 * 3 / 85 * 1000;
effective_value0 = (amplitude_current0 / 1.414) - 3.2;

amplitude_current1 = (float)(sensor_max1 - 2048) * 1.8 / 4095 * 3 / 103 * 1000;
effective_value1 = (amplitude_current1 / 1.414) - 2.8;

if (effective_value0 < cutOffLimit) {
    effective_value0 = 0.0;
}
if (effective_value1 < cutOffLimit) {
    effective_value1 = 0.0;
}

```

Рисунок 2.9 - Лістинг алгоритму перетворення аналогового сигналу в діюче значення струму

Особливу увагу я приділив точності вимірювань програмного забезпечення. Програма використовує 12-бітну роздільну здатність АЦП ESP32, що забезпечує високу точність оцифровування аналогових сигналів. Для кожного датчика застосовуються індивідуальні калібрувальні коефіцієнти (85 та 103), що враховують різні характеристики датчиків ACS712. Додатково реалізована система відсікання шумів через параметр cutOffLimit, який усуває помилкові спрацьовування при відсутності струму.

Одним із ключових принципів під час написання коду було забезпечення енергоефективності програми. Це реалізовано через функцію OpenCloseWiFiendBlynk() (рисунок 2.10), яка активує Wi-Fi підключення лише для передачі даних, після чого повністю відключає радіомодуль ESP32. Такий підхід не лише знижує енергоспоживання системи, але й забезпечує стабільність роботи за рахунок уникнення накопичення помилок у мережевих з'єднаннях.

```

void OpenCloseWiFiendBlynk ( float value0, float value1) {

    WiFi.begin(ssid, pass);
    Serial.print("Підключення до Wi-Fi");
    while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
        delay(500);
        Serial.print(".");
    }
    Serial.println("\nWi-Fi з'єднано");
    Blynk.config(auth);
    Blynk.connect();

    unsigned long startTime = millis();
    while (!Blynk.connected()) {
        if (millis() - startTime > 5000) { // таймаут 5 сек
            Serial.println("Помилка Blynk з'єднання");
            break;
        }
        delay(100);
    }

    if (Blynk.connected()) {
        Blynk.virtualWrite(V0, value0);
        Blynk.virtualWrite(V1, value1);
        Serial.println("Дані передані в Blynk");
    }

    delay(1000);
    Blynk.disconnect();
    WiFi.disconnect(true);
    WiFi.mode(WIFI_OFF);
    Serial.println(" ");
    delay(500);
}

```

Рисунок 2.10 - Лістинг функції OpenCloseWiFiendBlynk().

Окрім того, під час розробки я прагнув зробити програму максимально надійною та стійкою до помилок. Мною було реалізовано систему таймаутів для підключення до Blynk сервісу, що запобігає зависанню програми у разі проблем з мережею. Кожен блок коду супроводжується інформативними повідомленнями через Serial порт, що спрощує діагностику роботи системи, а структура програми передбачає логічне розбиття на функції, які виконують окремі завдання.

Важливо також, що реалізований алгоритм є оптимізованим із точки зору використання ресурсів мікроконтролера. Усі обчислення виконуються з мінімальним використанням пам'яті та процесорного часу, що дозволяє системі працювати стабільно навіть за складних умов. Використання глобальних змінних для зберігання результатів вимірювань мінімізовано, а математичні операції оптимізовані для швидкого виконання на 32-бітній архітектурі ESP32. Дані, отримані під час тестування, подано на рисунки 2.11- 2.19 .

```
-> Підключення до Wi-Fi..  
-> Wi-Fi з'єднано  
-> Дані передані в Blynk  
`
```

Рисунок 2.11 - Процес підключення до WiFi та Blynk

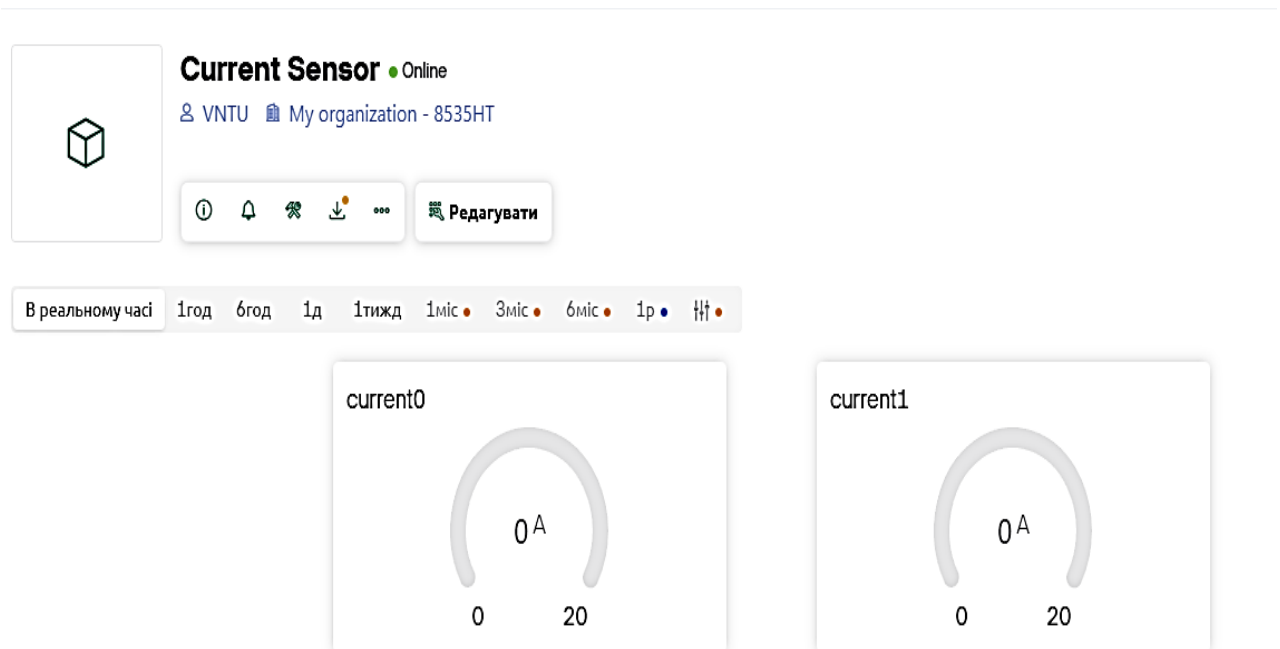


Рисунок 2.12 - Інтерфейс web-версії Blynk

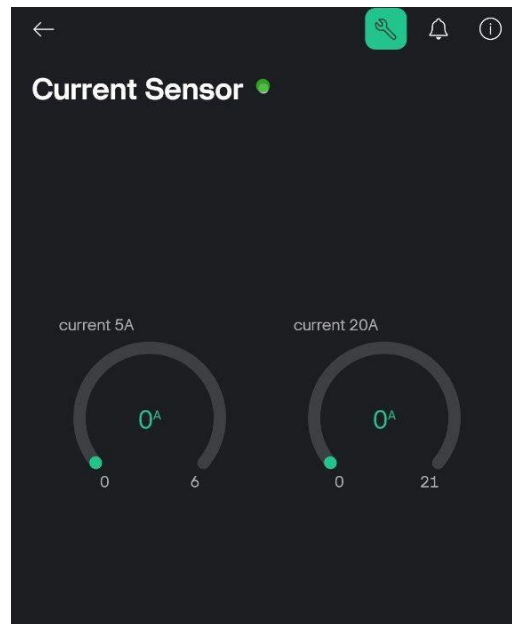


Рисунок 2.13 - Інтерфейс мобільної версії Blynk

Перші вимірювання проводилися на конфігурації 20A (рисунки 2.12-2.16).

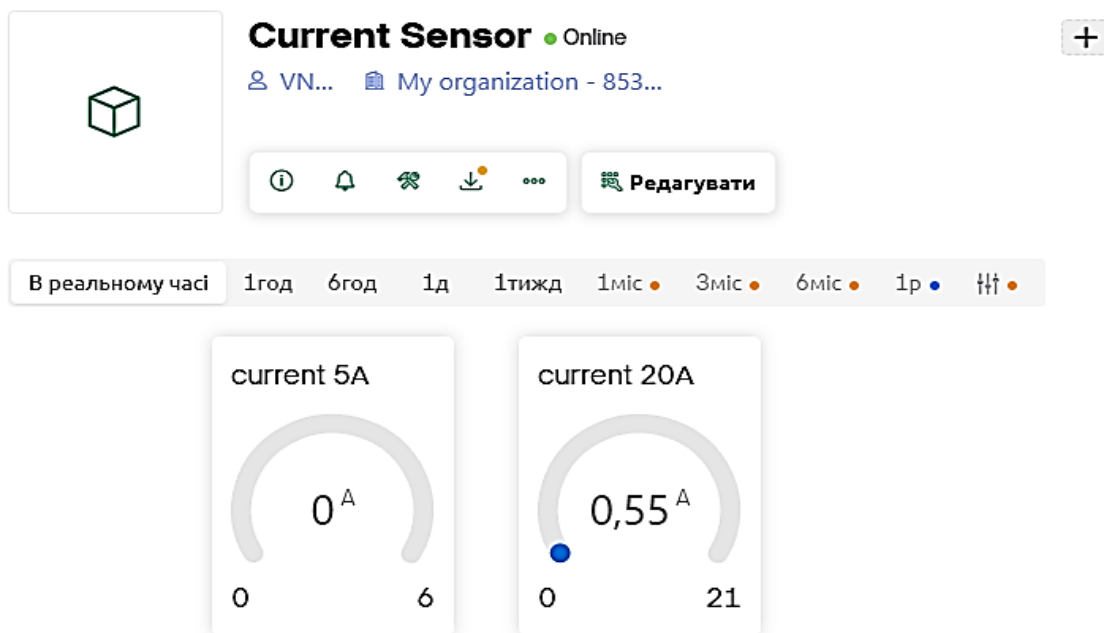


Рисунок 2.14 - Результат вимірювання у web-версії
при ACS712 20A (1 значення)

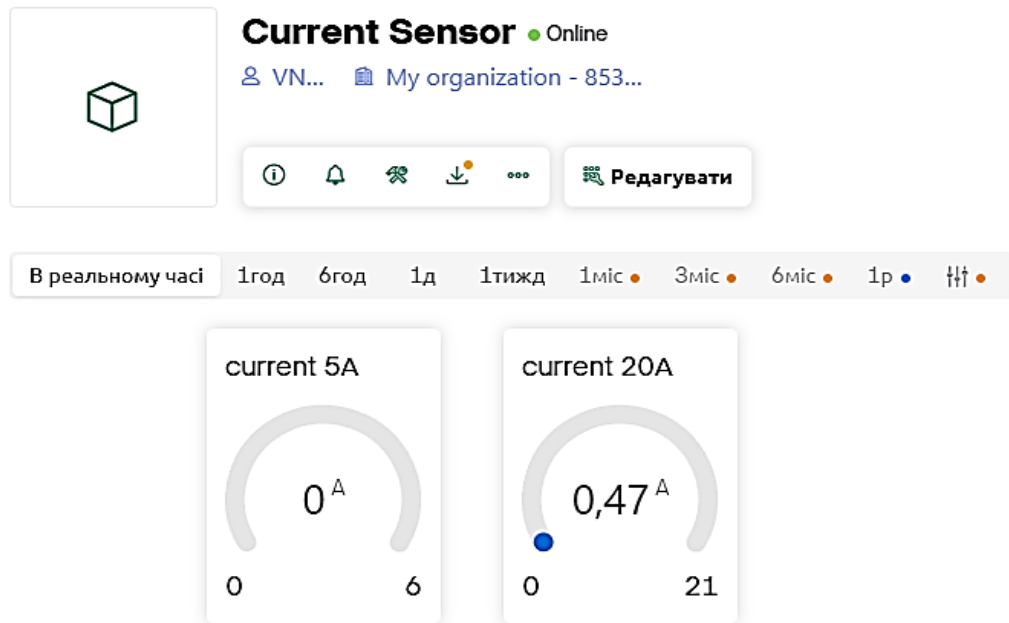


Рисунок 2.15 - Результат вимірювання у web-версії
при ACS712 20A (2 значення)

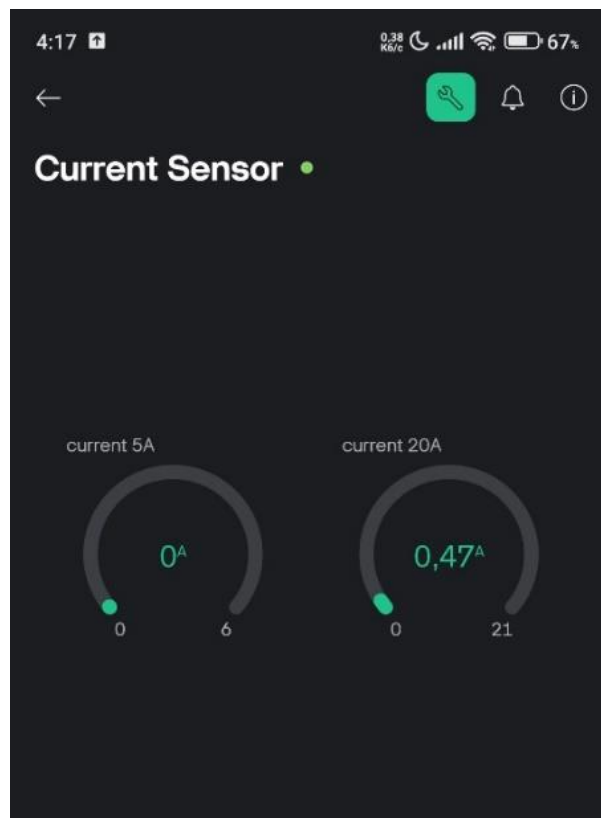


Рисунок 2.16 - Результат вимірювання у мобільній версії
при ACS712 20A (2 значення)

Аналогічні вимірювання були проведені мною і на конфігурації 5A. Результати представлені на рисунках 2.17-2.19.

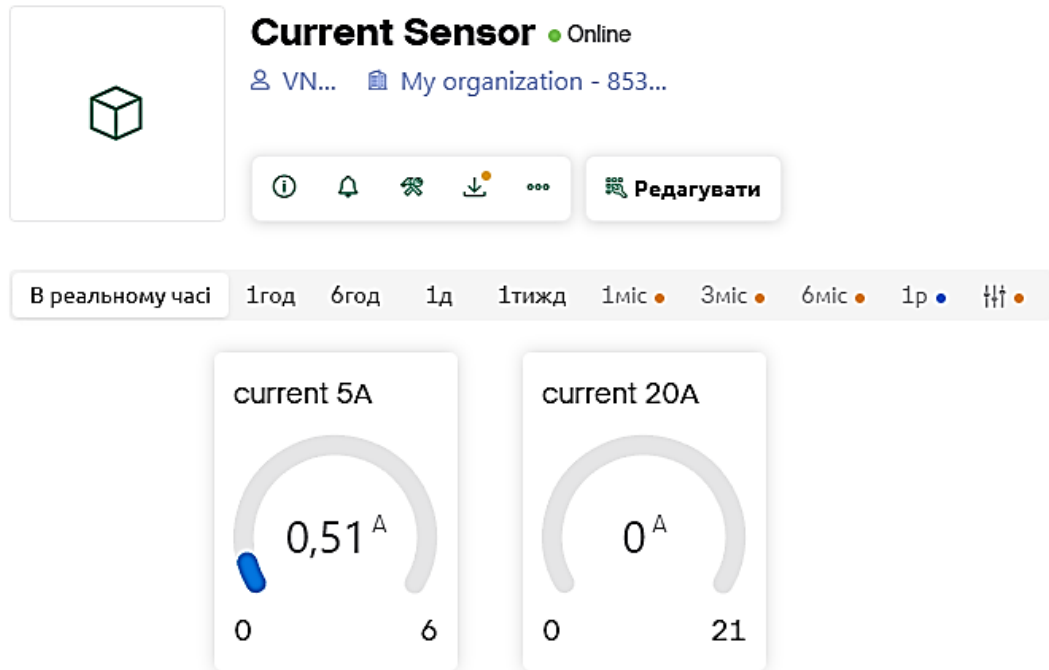


Рисунок 2.17 - Результат вимірювання у web-версії
при ACS712 5A (1 значення)

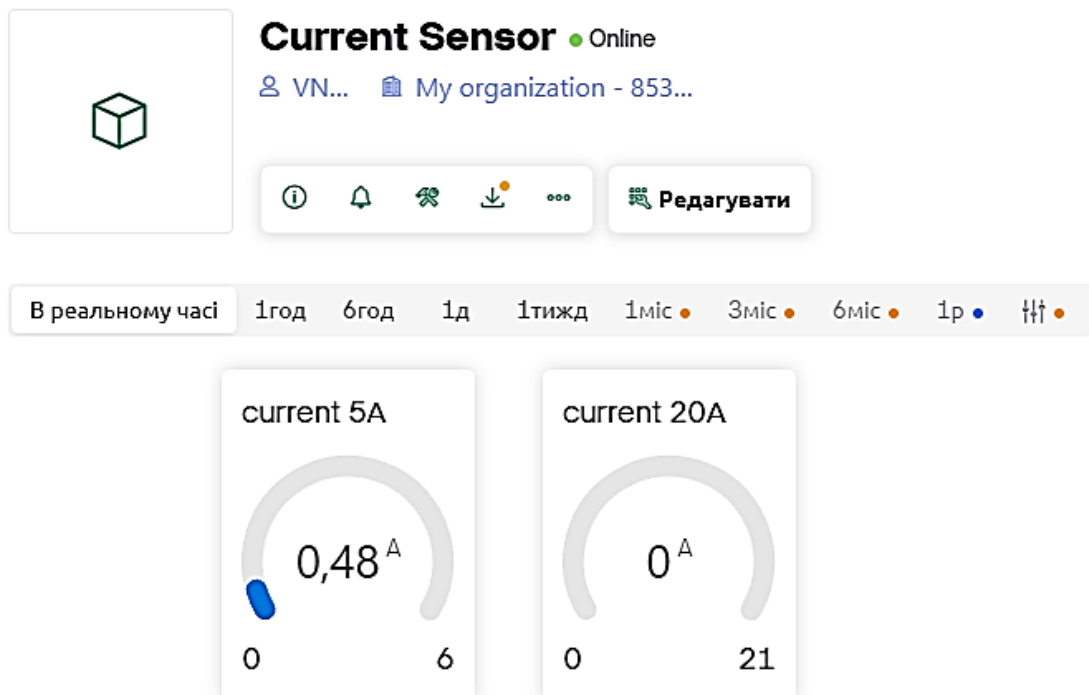


Рисунок 2.18 - Результат вимірювання у web-версії
при ACS712 5A (2 значення)

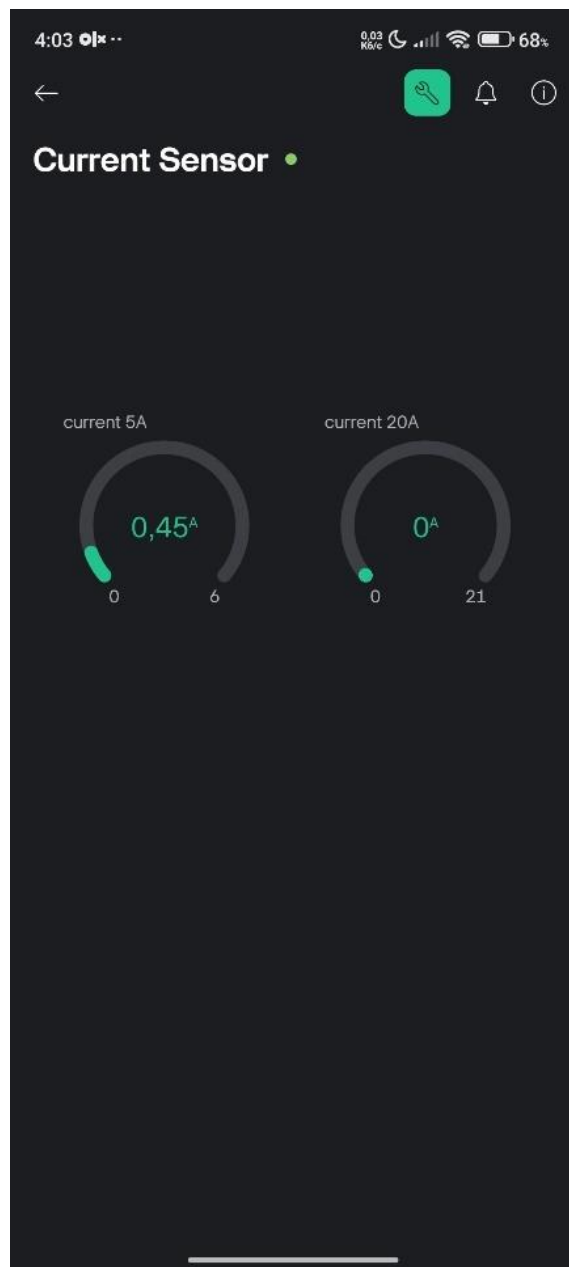


Рисунок 2.19 - Результат вимірювання у мобільній версії
при ACS712 5A (2 значення)

Функцію навантажувального компонента виконувала лампочка розжарювання, розрахована на 100 Вт, що підключалася поперемінно до двох розеток. У процесі тестування використовували лише один контур, другий – залишався без навантаження, відповідно, з нього зчитувалися нульові дані згідно з вимогами. Це тестування виявило незначне відхилення в перших значеннях під час ввімкнення, далі показники стабілізувалися. Відповідно до закону Джоуля-Ленца, що визначає потужність, в ідеальних умовах заміряне значення має бути в діапазоні 0,45 – 0,46.

У моєму випадку значення було дещо вищим у розряді сотих, що може бути обумовлено різними причинами, проте це відхилення не є критичним, а отже, система функціонує як слід.

Підсумовуючи, розроблений пристрій та програмне забезпечення до нього є фундаментальним компонентом сучасних систем моніторингу, адже воно комплексно поєднує в собі три критично важливі елементи: IoT-технології, енергоефективність та точність вимірювань. Ця інтеграція забезпечує надійну та ефективну взаємодію між фізичним світом датчиків і цифровим середовищем обробки даних. Використання IoT-технологій дозволяє збирати детальні дані в реальному часі з численних точок моніторингу, створюючи повну картину стану об'єкта. Одночасно, акцент на енергоефективності гарантує, що сам процес моніторингу споживає мінімум ресурсів, а отримані дані можуть бути використані для оптимізації енергоспоживання в цілому. Нарешті, точність вимірювань є незамінною для прийняття обґрунтованих рішень та забезпечення достовірності аналітичних висновків.

Саме таке комплексне поєднання робить мій пристрій ефективним та адаптивним засобом моніторингу в сучасному технологічному світі. Він не просто збирає дані, а перетворює їх на цінний ресурс для стратегічного управління та оптимізації.

Отже, у другому розділі було детально викладено процес розробки моєї інформаційно-вимірювальної системи, що охоплює вибір та обґрунтування її апаратної та програмної складових. Насамперед, було обґрунтовано важливість структурної та електричної схем як фундаментальних етапів проєктування. Представлена структурна схема чітко візуалізує взаємодію ключових компонентів: джерела живлення, датчика струму, елемента навантаження та мікроконтролера ESP32. Електрична схема, у свою чергу, надала детальне уявлення про фізичні з'єднання та використання подільника напруги, що є критично важливим для забезпечення сумісності напруг між модулем ACS712 та мікроконтролером ESP32.

Далі, було розроблено алгоритм вимірювання та обробки даних, що є основою для функціонування системи. Алгоритм забезпечує циклічне зчитування даних від датчика струму ACS712, їх математичну обробку та перетворення у зрозумілий числовий формат. Особливу увагу я звернув на те, що алгоритм також передбачає різні сценарії реагування на отримані дані, зокрема попередження про критичні значення та потенційне знеструмлення лінії, що підкреслює його гнучкість та орієнтованість на безпеку.

Ключовим кроком стала реалізація апаратних засобів. Мною було обґрунтовано вибір датчика струму ACS712 завдяки його високій точності, здатності працювати як зі змінним, так і з постійним струмом, низькому опору та гальванічній ізоляції. В якості основного обчислювального ядра було обрано мікроконтролер ESP32, що є оптимальним рішенням завдяки його двоядерній архітектурі, вбудованим модулям Wi-Fi та Bluetooth, широким можливостям розробки та підтримці активної спільноти, що робить його ідеальним для IoT-проектів.

Завершальним етапом другого розділу стала розробка програмних засобів. Програмне забезпечення, написане в середовищі Arduino IDE з використанням мови C/C++, є автономним та ефективним. Воно реалізує циклічний збір даних, їх обробку та передачу до хмарної платформи Blynk, забезпечуючи енергоефективність за рахунок періодичного відключення Wi-Fi. Точність вимірювань досягається завдяки 12-бітній роздільній здатності АЦП ESP32 та калібрувальним коефіцієнтам, а також системі відсікання шумів. Проведене тестування підтвердило коректність роботи системи, демонструючи незначні відхилення, що є прийнятними для даної реалізації.

Таким чином, розроблена інформаційно-вимірювальна система є комплексним рішенням, що вдало поєднує в собі апаратну та програмну гнучкість, точність вимірювань та інтеграцію з IoT-технологіями, що робить її ефективним та адаптивним засобом моніторингу енергоспоживання у сучасному технологічному світі.

3 МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ

3.1 Вибір інструментів для моделювання системи

Моделювання інформаційно-вимірювальної системи є важливим етапом розробки, який дозволяє оцінити її функціональність, виявити потенційні недоліки та оптимізувати роботу до створення фізичного прототипу. Вибір інструментів для моделювання залежить від цілей дослідження, типу системи, технічних вимог і доступних ресурсів. У контексті інформаційно-вимірювальної системи для вимірювання струму споживання електроприладів моделювання охоплює як апаратну частину (датчики, мікроконтролери, схеми), так і програмну (алгоритми обробки даних, інтерфейси). У цьому підрозділі розглядаються основні аспекти вибору інструментів для моделювання, їх класифікація, переваги та недоліки, а також обґрунтування вибору конкретного інструменту для даної роботи.

Моделювання інформаційно-вимірювальної системи струму споживання електроприладів передбачає імітацію роботи апаратних компонентів, обробки сигналів і взаємодії з програмним забезпеченням. Основні завдання моделювання включають:

- Перевірку працездатності схеми вимірювання струму.
- Оцінку точності та стабільності вимірювальних процесів.
- Аналіз поведінки системи за різних умов (наприклад, змін навантаження чи перешкод).
- Тестування алгоритмів обробки даних і їх інтеграції з апаратною частиною.
- Оптимізацію енергоспоживання та продуктивності системи.

Сучасні методи моделювання електронних систем можна класифікувати за рівнем абстракції та типом аналізованих процесів.

- Аналогове моделювання базується на розв'язанні диференціальних рівнянь, що описують поведінку електричних кіл, і використовує SPICE-подібні симулятори для точного відтворення електричних характеристик компонентів.
- Цифрове моделювання оперує дискретними логічними рівнями та часовими інтервалами, що дозволяє ефективно аналізувати роботу цифрових схем.
- Змішане аналогово-цифрове моделювання поєднує переваги обох підходів і є особливо актуальним для сучасних ІВС, які інтегрують аналогові датчики з цифровими системами обробки сигналів. Системний рівень моделювання дозволяє досліджувати взаємодію окремих функціональних блоків без деталізації внутрішньої структури компонентів.

Вибір відповідного інструменту моделювання визначається комплексом технічних та економічних факторів. Точність моделювання є первинним критерієм, оскільки від неї залежить достовірність отриманих результатів та можливість їх використання при прийнятті проєктних рішень. Точність моделювання визначається якістю математичних моделей компонентів, алгоритмами числового розв'язання рівнянь та методами обробки нелінійностей.

Повнота бібліотеки компонентів безпосередньо впливає на можливість створення адекватних моделей реальних систем. Сучасні ІВС використовують широкий спектр електронних компонентів, включаючи спеціалізовані інтегральні схеми, датчики, перетворювачі та мікроконтролери, що вимагає наявності відповідних моделей у бібліотеці симулятора.

Швидкість моделювання особливо критична при дослідженні складних систем з великою кількістю компонентів або при необхідності проведення множинних симуляцій з різними параметрами. Ефективні алгоритми симуляції та оптимізовані структури даних дозволяють значно скоротити час, необхідний для отримання результатів.

Класифікація інструментів для моделювання

1. Інструменти для схемотехнічного моделювання.

Ці інструменти призначені для створення та аналізу електронних схем, імітації роботи датчиків, мікроконтролерів та інших компонентів. Вони дозволяють

моделювати електричні сигнали, перевіряти правильність з'єднань і оцінювати поведінку системи в різних умовах. Приклади:

Multisim: програма від National Instruments для моделювання аналогових і цифрових схем, підтримує широкий набір компонентів, включаючи датчики струму та мікроконтролери.

LTspice: безкоштовний інструмент для моделювання аналогових схем, який використовується для аналізу електричних сигналів і перевірки роботи датчиків.

Tinkercad Circuits: онлайн-платформа для простого моделювання схем із підтримкою Arduino.

Переваги: висока точність моделювання апаратної частини, можливість тестування електричних параметрів.

Недоліки: обмежена підтримка програмування мікроконтролерів і складність моделювання складних алгоритмів.

2. Інструменти для програмного моделювання

Ці інструменти використовуються для розробки та тестування алгоритмів обробки даних, які реалізуються на мікроконтролерах або інших обчислювальних платформах. Вони дозволяють перевірити логіку роботи системи без фізичного обладнання. Приклади:

MATLAB/Simulink: потужна платформа для моделювання алгоритмів обробки сигналів, аналізу даних і створення моделей систем. Підтримує інтеграцію з апаратними платформами.

Python з бібліотеками (NumPy, SciPy): використовується для моделювання алгоритмів обробки даних і прогнозування енергоспоживання.

LabVIEW: інструмент для створення віртуальних приладів і тестування алгоритмів вимірювання.

Переваги: гнучкість у розробці алгоритмів, підтримка складних обчислень і аналізу даних.

Недоліки: обмежена підтримка моделювання апаратної частини, потреба в додаткових інструментах для схемотехніки.

3. Комбіновані інструменти

Ці інструменти дозволяють моделювати як апаратну, так і програмну частини системи, забезпечуючи інтеграцію схемотехнічного та програмного моделювання. Приклади:

Proteus: комплексна платформа, яка поєднує моделювання електронних схем і програмування мікроконтролерів, підтримує широкий спектр компонентів і симуляцію в реальному часі.

Altium Designer: інструмент для проєктування схем і плат, який підтримує базове моделювання.

Keil uVision: інструмент для програмування та симуляції мікроконтролерів, який інтегрується з апаратними моделями.

Переваги: можливість одночасного тестування апаратної та програмної частин, висока універсальність.

Недоліки: висока складність освоєння, потреба в потужному обладнанні для складних моделей.

Окрім класифікації інструментів для моделювання, розрізняють і типи програмних засобів за допомогою яких це реалізують:

- 1) спеціалізовані SPICE-симулятори, такі як LTspice, PSpice та Cadence Spectre, що забезпечують найвищу точність аналогового моделювання завдяки використанню детальних фізичних моделей напівпровідникових приладів. Ці інструменти оптимізовані для аналізу складних аналогових схем і підтримують широкий спектр видів аналізу, включаючи частотний, перехідний, температурний та статистичний;

- 2) інтегровані середовища проєктування, що поєднують можливості схемотехнічного моделювання з інструментами проєктування друкованих плат та системами керування проєктами. Такі програми, як Altium Designer, KiCad та Eagle, забезпечують повний цикл розробки електронних пристроїв від концептуального проєктування до виготовлення;

- 3) спеціалізовані інструменти для моделювання систем управління, такі як MATLAB Simulink, дозволяють досліджувати динамічні характеристики ІВС

на системному рівні, включаючи аналіз стійкості, якості перехідних процесів та робастності до параметричних збурень.

Для проведення моделювання інформаційно-вимірювальної системи контролю струму споживання в рамках даної роботи я обрав середовище Proteus 8 Professional. Цей вибір обґрунтований комплексом факторів, що роблять дану програму оптимальною для поставлених завдань дослідження.

Proteus 8 Professional представляє собою інтегроване середовище автоматизованого проєктування електронних систем, розроблене компанією Labcenter Electronics. Програма поєднує потужні можливості схемотехнічного моделювання з інструментами 3D-візуалізації та віртуального прототипування, що забезпечує комплексний підхід до проєктування та дослідження електронних пристроїв.

Основними перевагами Proteus 8 Professional є наявність обширної бібліотеки високоточних SPICE-моделей аналогових компонентів, підтримка змішаного аналогово-цифрового моделювання та можливість інтерактивної симуляції в реальному часі. Програма включає віртуальні вимірювальні прилади, такі, як осцилограф, мультиметр та генератор сигналів, що дозволяє проводити детальний аналіз характеристик системи без необхідності використання зовнішнього обладнання.

Інтеграція з популярними середовищами розробки мікроконтролерних систем забезпечує можливість co-simulation (спільне моделювання) програмного та апаратного забезпечення, що критично важливо для дослідження сучасних ІВС з цифровою обробкою сигналів. Зручний графічний інтерфейс та інтуїтивні засоби налаштування параметрів симуляції мінімізують час, необхідний для підготовки та проведення досліджень.

3.2 Моделювання процесу вимірювання струму споживання

Моделювання процесу вимірювання струму споживання є ключовим етапом розробки інформаційно-вимірювальної системи, який дозволяє переві-

рити працездатність схеми, оцінити точність вимірювань і оптимізувати алгоритми обробки даних перед створенням фізичного прототипу. У цьому підрозділі розглядаються основні аспекти моделювання процесу вимірювання струму споживання електроприладів, включаючи принципи моделювання, вибір компонентів для віртуальної схеми, налаштування умов симуляції, а також використання обраного інструменту — Proteus 8 Professional — для реалізації моделі.

Даний процес передбачає створення віртуальної моделі системи, яка імітує роботу реальних апаратних і програмних компонентів. Основні принципи моделювання включають:

- Імітація апаратної частини: моделювання датчика струму, аналогово-цифрового перетворювача (АЦП) і мікроконтролера для обробки сигналів.
- Симуляція електричних сигналів: відтворення струму, який протікає через електроприлад, і його перетворення в вимірювальний сигнал.
- Реалізація алгоритмів обробки: програмування логіки для збору, обробки та аналізу даних про струм споживання.
- Тестування в різних умовах: моделювання поведінки системи при зміні навантаження, наявності перешкод або інших зовнішніх факторів.
- Оцінка точності: перевірка відповідності вимірених значень реальним параметрам струму.

Для моделювання даної системи в Proteus 8 Professional необхідно визначити ключові компоненти, які імітують реальну систему. Основні елементи моделі включають:

1. Джерело струму – віртуальний електроприлад, який генерує струм для моделювання. У Proteus це може бути джерело змінного (AC) або постійного (DC) струму з регульованими параметрами (амплітудою, частотою).
2. Датчик струму – модель датчика, який вимірює струм (наприклад, на основі ефекту Холла чи шунтового методу). У бібліотеці Proteus доступні універсальні моделі датчиків, які дозволяють імітувати вихідний сигнал (напругу або струм).

3. Аналогово-цифровий перетворювач (АЦП) – компонент для перетворення аналогового сигналу від датчика в цифровий формат. У моделі використовується вбудований АЦП мікроконтролера або окремий модуль.

4. Мікроконтролер – центральний елемент для обробки даних, реалізації алгоритмів і виведення результатів. У Proteus підтримуються популярні мікроконтролери, такі як Arduino Uno, PIC, AVR або STM32.

5. Вихідні пристрої – віртуальні дисплеї (LCD, LED) або інтерфейси зв'язку (UART, I2C) для відображення результатів вимірювання.

6. Допоміжні елементи – резистори, конденсатори, фільтри для імітації реальних умов роботи схеми.

Також при створенні даної системи необхідно слідувати наступним етапам:

1. Створення схеми.

У модулі ISIS Proteus створюється схема, яка включає джерело струму, датчик, АЦП і мікроконтролер. Наприклад, для моделювання системи на основі ефекту Холла використовується віртуальний датчик, який генерує вихідну напругу, пропорційну струму. Схема підключається до мікроконтролера (Arduino Uno), який обробляє сигнал через вбудований АЦП.

2. Налаштування параметрів джерела струму.

Джерело струму налаштовується для імітації реальних умов роботи електроприладу. Наприклад, для побутового приладу задається змінний струм із частотою 50 Гц і амплітудою в діапазоні 0,1–20 А, що відповідає типовим значенням для побутової техніки (освітлення, холодильники, пральні машини).

3. Програмування мікроконтролера.

У Proteus створюється програмний код для мікроконтролера, який виконує такі функції:

- зчитування аналогового сигналу з датчика через АЦП;
- обробка даних (наприклад, масштабування сигналу для отримання значення струму в амперах);
- виведення результатів на віртуальний дисплей або через інтерфейс зв'язку.

Код пишеться в сумісному компіляторі (Arduino IDE) і завантажується в модель мікроконтролера.

4. Симуляція роботи системи.

У режимі реального часу Proteus імітує роботу схеми, дозволяючи спостерігати за вихідними сигналами датчика, обробкою даних і результатами вимірювання. Віртуальні інструменти (осцилограф, вольтметр) використовуються для аналізу сигналів на різних етапах.

5. Тестування в різних умовах.

Для оцінки стійкості системи моделюються різні сценарії:

- зміна величини струму (імітація пікових навантажень);
- додавання шумів або перешкод для перевірки фільтрації сигналу;
- зміна частоти струму (наприклад, від 50 до 60 Гц).

Це дозволяє оцінити стабільність і точність вимірювань.

Для достовірності моделі необхідно врахувати реальні параметри роботи системи, тобто налаштувати умови моделювання:

- Тип струму: змінний (AC) для побутових електроприладів або постійний (DC) для спеціалізованих пристроїв. У більшості побутових систем моделюється змінний струм із частотою 50 Гц;
- Діапазон вимірювання: залежить від типу електроприладу. Наприклад, для побутових приладів діапазон становить 0,1–20 А, для промислових — до сотень ампер;
- Точність датчика: модель датчика повинна мати похибку, близьку до реальних пристроїв (наприклад, 1–5% для датчиків на основі ефекту Холла);
- Швидкість обробки: частота дискретизації АЦП (1000 вимірювань за секунду) для забезпечення точного відображення змін струму;
- Енергоспоживання: моделювання враховує власне енергоспоживання системи, щоб оцінити її ефективність.

У своїй роботі я попередньо розглянув одну з ключових проблем під час розробки та впровадження будь-якої системи, а саме невідповідність номінального значення сигналу, що передається між її компонентами і є необхідним для

їхньої злагодженої роботи. Для її вирішення застосував подільник напруги та програмно врахував ці зміни. Оскільки подібні системи можна створювати як за допомогою мікроконтролерів ESP32, так і Arduino UNO, мною було вирішено створити апаратну частину з використанням ESP32 та подільника напруги, а моделювання виконати на базі Arduino UNO (рисунки 3.1, 3.2). Використовуючи електричну схему з технічного опису датчика ACS712 (рисунок 3.3), я реалізував її у середовищі Proteus (рисунок 3.4) та інтегрував у модуляційну схему свого пристрою загалом (рисунок 3.5). Дана схема була використана для проведення моделювання роботи мого пристрою та дослідження результатів.

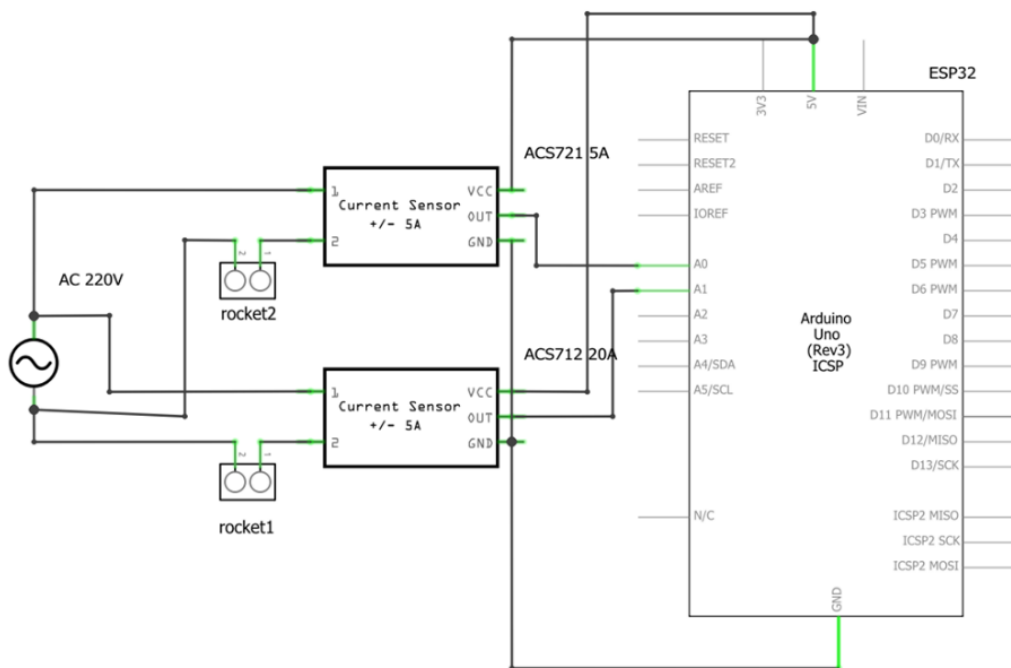


Рисунок 3.1 - Електрична схема пристрою при Arduino UNO

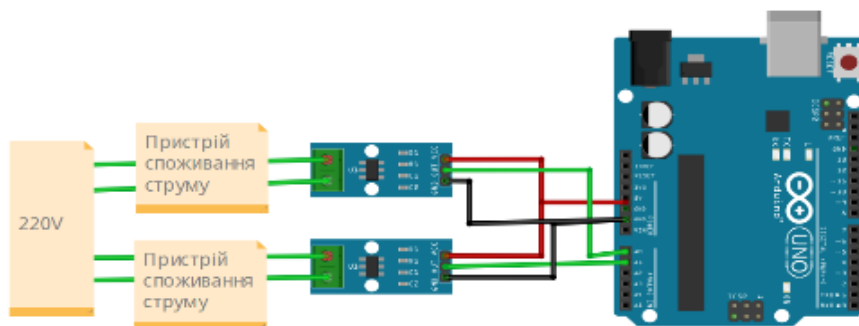


Рисунок 3.2 - Візуальне представлення функціональної схеми при Arduino UNO

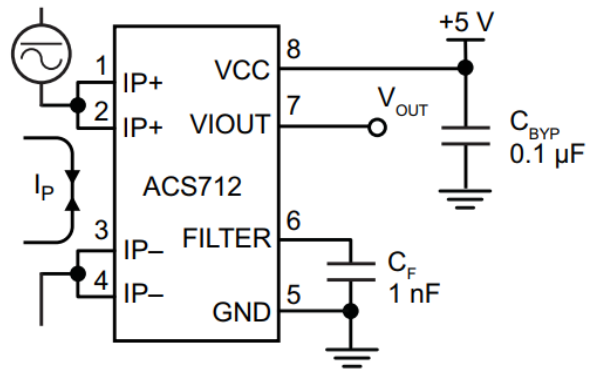


Рисунок 3.3 - Електрична схема ACS712

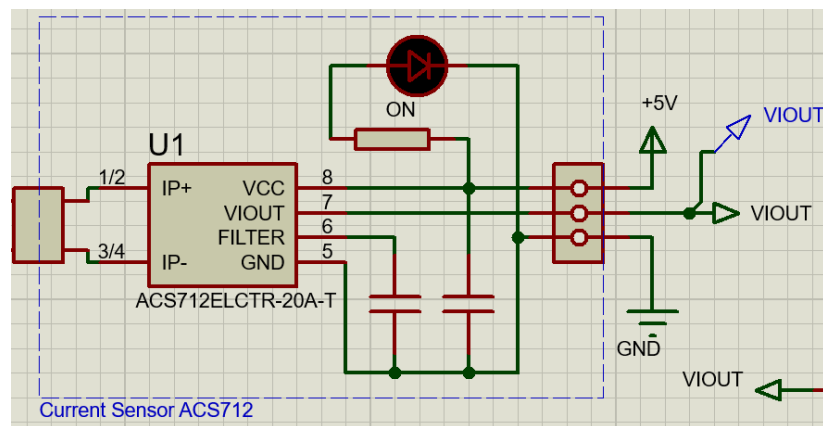


Рисунок 3.4 - Модуляційна схема ACS712 у Proteus

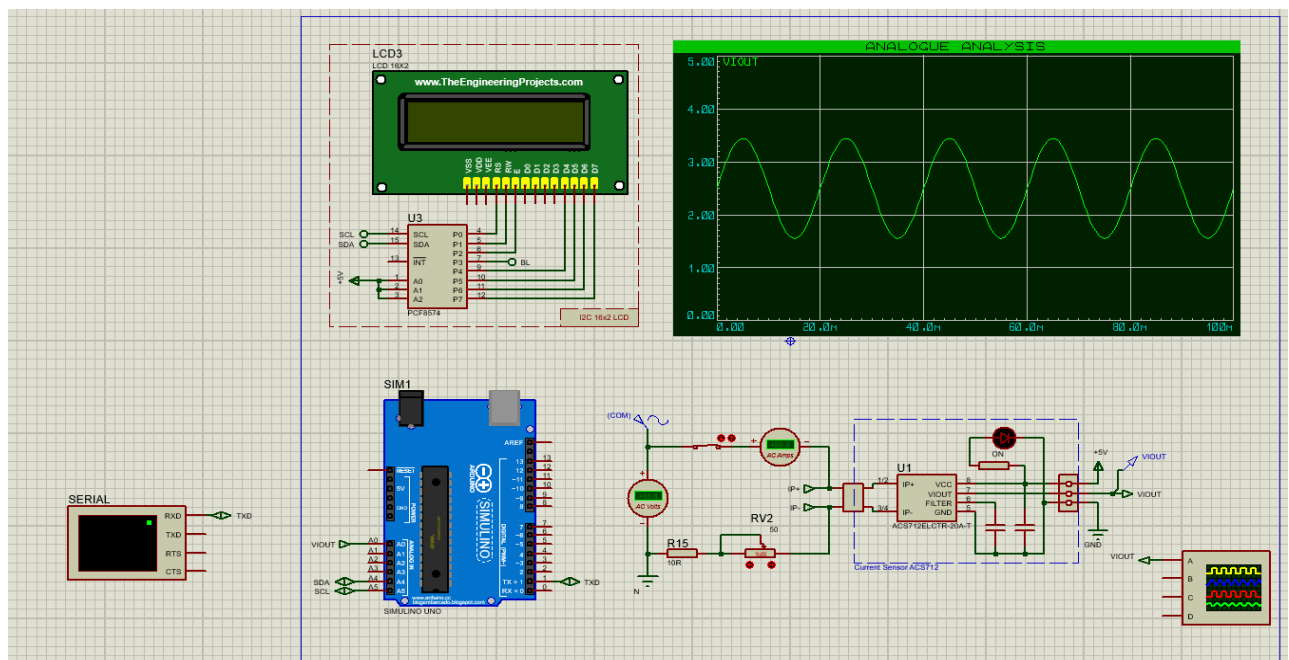


Рисунок 3.5 - Модуляційна схема системи у Proteus

Отже, змінивши мікроконтролер в апаратній частині та вилучивши процес роботи з WiFi і Blynk із програмної, я отримав наступні значення:

- при положенні змінного резистора у 10% амперметр показав 4,01 А, що відповідає математичному обрахунку у 4 А (рисунок 3.6);

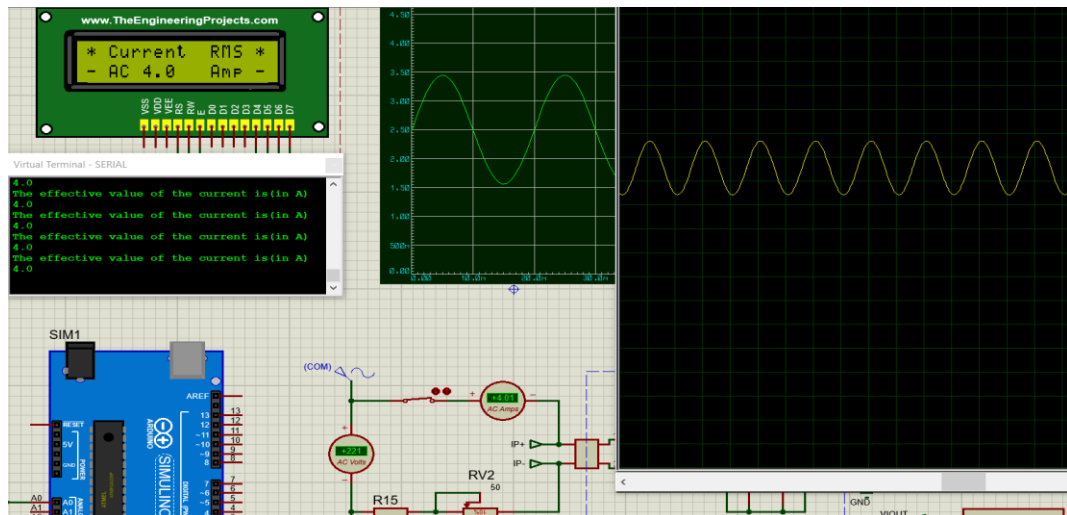


Рисунок 3.6 - Результат моделювання у Proteus при положенні змінного резистора 10%

- при положенні змінного резистора у 50% амперметр показав 6,27 А, що відповідає математичному обрахунку у 6,3 А (рисунок 3.7);

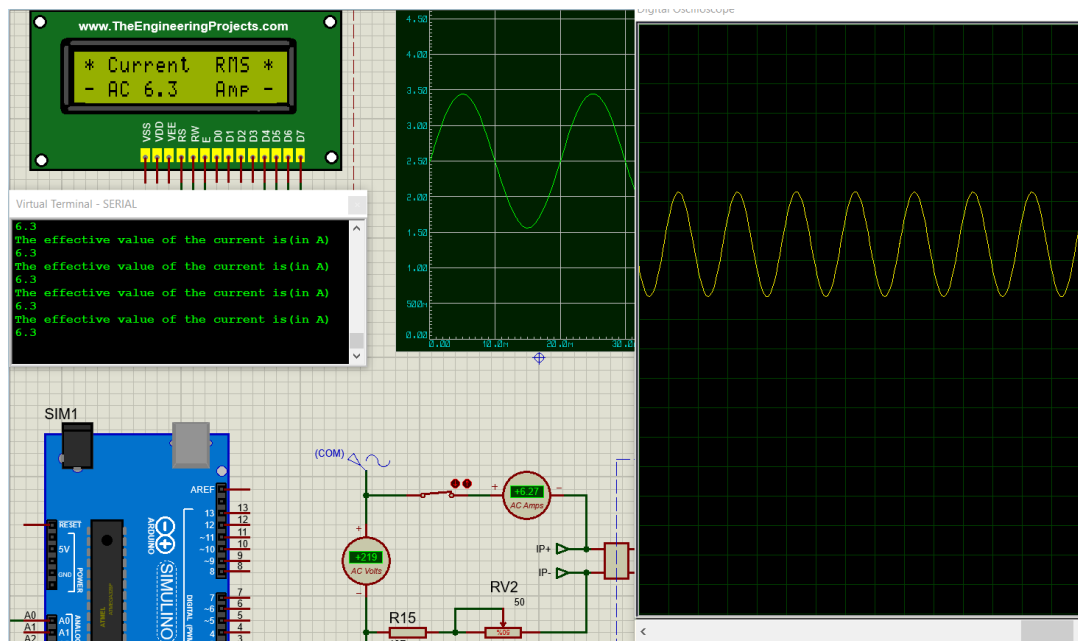


Рисунок 3.7 - Результат моделювання у Proteus при положенні змінного резистора 50%

- при положенні змінного резистора у 80% амперметр показав 10,9 А, що відповідає математичному обрахунку у 11 А (рисунок 3.8).

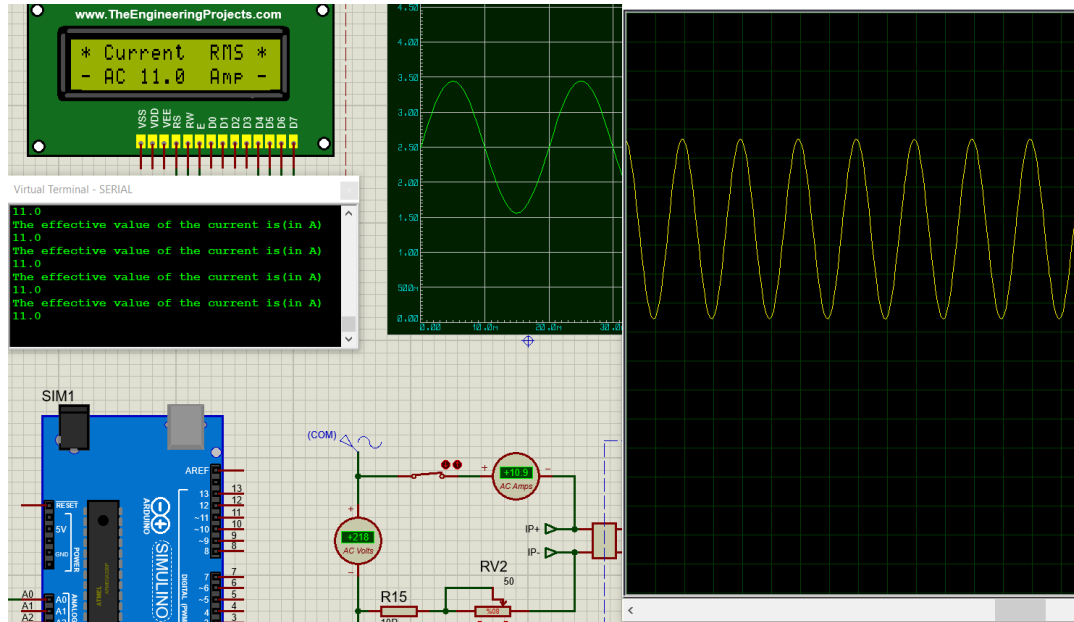


Рисунок 3.8 - Результат моделювання у Proteus при положенні змінного резистора 80%

Отримавши дані результати можна зробити висновок, що програмна та апаратна частини працюють коректно. Дані, які я отримав на виході, аналогічні показам амперметра із урахуванням математичного округлення.

3.3 Аналіз результатів моделювання та оцінка ефективності системи

Аналіз результатів моделювання інформаційно-вимірювальної системи струму споживання електроприладів є завершальним етапом віртуального тестування, який дозволяє оцінити працездатність системи, її точність, стабільність і відповідність заданим вимогам. У цьому підрозділі розглядаються методи аналізу результатів моделювання, отриманих у Proteus 8 Professional, оцінка ключових параметрів системи, таких як точність вимірювань, швидкість обробки даних і стійкість до перешкод, а також визначення ефективності системи для подальшого використання в реальних умовах. Аналіз результатів моделювання спрямований на досягнення таких цілей:

- перевірка коректності вимірювання струму споживання в заданих діапазонах;
- оцінка точності та похибки системи порівняно з еталонними значеннями;
- аналіз стабільності роботи системи за різних умов (зміна навантаження, наявність перешкод);
- визначення ефективності системи з точки зору енергоспоживання, швидкості обробки та зручності використання;
- виявлення потенційних недоліків моделі для їх усунення перед фізичною реалізацією.

Для аналізу результатів моделювання в Proteus 8 Professional використовуються вбудовані інструменти, такі як віртуальні осцилографи, вольтметри, амперметри, а також дані, отримані з вихідних пристроїв (наприклад, LCD-дисплея або інтерфейсу UART). Аналіз проводиться за такими етапами:

1. Збір даних – отримання вимірених значень струму, напруги та інших параметрів із моделі.
2. Порівняння з еталонними значеннями – оцінка відповідності вимірених даних заданим параметрам джерела струму.
3. Аналіз похибки – розрахунок відносної та абсолютної похибки вимірювань.
4. Тестування в різних умовах – оцінка поведінки системи при зміні амплітуди струму, частоти або додаванні перешкод.
5. Оцінка продуктивності – аналіз швидкості обробки даних і енергоспоживання системи.

На основі моделі, створеної в Proteus 8 Professional (описаної в підрозділі 3.2), аналіз результатів моделювання проводиться для системи, яка включає дже-

рело змінного струму, датчик струму (наприклад, на основі ефекту Холла), мікроконтролер із АЦП і вихідний пристрій для відображення даних. Нижче наведено ключові аспекти аналізу.

1. Точність вимірювань.

- Методика: у моделі задається джерело змінного струму з відомими параметрами (наприклад, амплітуда 5 А, частота 50 Гц). Виміряні значення струму, отримані з датчика через АЦП і оброблені мікроконтролером, порівнюються з еталонними значеннями.

- Результати: наприклад, для струму 5 А вихідна напруга датчика становить 2,5 В (з урахуванням лінійної характеристики датчика). Після обробки мікроконтролером значення струму відображається на дисплеї як 4,95–5,05 А, що відповідає похибці 1–2%.

- Висновки: точність вимірювань залежить від роздільної здатності АЦП (наприклад, 10 біт для Arduino Uno забезпечує 1024 рівні) і якості калібрування датчика. Похибка в межах 1–2% є прийнятною для побутових систем моніторингу.

2. Стабільність при зміні умов.

- Методика: у моделі змінюються параметри джерела струму (амплітуда від 0,1 до 20 А, напруга від 210 до 230 В) і додаються шумові перешкоди для імітації реальних умов.

- Результати: система стабільно вимірює струм у діапазоні 0,1–17 А з похибкою, що не перевищує 3% при зміні напруги. При додаванні шумів (наприклад, 10% від амплітуди сигналу) похибка зростає до 5%, якщо не застосовується фільтрація. Після додавання програмного(або апаратного фільтра (наприклад, середнього значення за 10 вимірювань) похибка знижується до 2%.

- Висновки: система демонструє достатню стійкість до змін навантаження, але потребує фільтрації для роботи в умовах перешкод.

3. Швидкість обробки даних.

- Методика: вимірюється час, необхідний для зчитування сигналу з датчика, його обробки та виведення на дисплей. У Proteus це оцінюється через частоту оновлення даних на вихідному пристрої.

- Результати: для моделі з Arduino Uno (частота АЦП 10 кГц) система обробляє дані за 1–2 мс на один вимір, що дозволяє оновлювати показники 500–1000 разів на секунду. Це відповідає вимогам реального часу для побутових пристроїв.

- Висновки: швидкість обробки достатня для моніторингу змінного струму з частотою 50 Гц, де період становить 20 мс.

4. Енергоспоживання системи.

- Методика: у Proteus оцінюється споживання струму мікроконтролером, датчиком і допоміжними компонентами за допомогою віртуального амперметра.

- Результати: наприклад, датчик струму споживає 5–10 мА, мікроконтролер — 20–50 мА залежно від режиму роботи, а дисплей — до 10 мА. Загальне енергоспоживання системи становить приблизно 50–70 мВт при живленні 5 В.

- Висновки: низьке енергоспоживання робить систему придатною для автономного використання (наприклад, із батарейним живленням).

5. Аналіз роботи вихідного інтерфейсу.

- Методика: перевіряється коректність відображення даних на LCD-дисплеї або через інтерфейс UART у Proteus.

- Результати: дані про струм (наприклад, “5.02 А”) виводяться на дисплей із частотою оновлення 1 Гц, що зручно для користувача. Передача через UART забезпечує стабільний потік даних для подальшого аналізу в зовнішніх програмах.

- Висновки: інтерфейс користувача є зручним і відповідає вимогам побутового використання.

Ефективність інформаційно-вимірювальної системи оцінюється за такими критеріями:

- Точність: похибка вимірювань у межах 1–2% відповідає стандартам для побутових систем моніторингу енергоспоживання.
- Швидкість: частота оновлення даних (500–1000 Гц) забезпечує реальний час обробки, що дозволяє виявляти швидкі зміни струму.
- Стійкість: система зберігає стабільність при зміні навантаження та частоти, а програмна фільтрація зменшує вплив перешкод.
- Енергоспоживання: низьке споживання (50–70 мВт) робить систему економічною для тривалого використання.
- Універсальність: модель підтримує вимірювання струму в широкому діапазоні (0,1–20 А), що робить її придатною для різних типів електроприладів.

Порівняння з аналогічними системами (наприклад, «розумними» розетками типу TP-Link Kasa) показує, що змодельована система має порівняну точність і швидкість, але є більш гнучкою завдяки можливості налаштування під конкретні задачі. Зауважу, що моделювання проводилося мною для конфігурації датчика ACS712 при номінальному струмі 20 А, оскільки цей діапазон є стандартним і частіше використовується, зокрема в побутових вимірюваннях, на відміну від діапазону 5 А.

Результати моделювання при зміні умов

Було виконано два дослідження, кожне з трьома вимірами, змінюючи умови. Кожне дослідження включало у себе різні входні параметри та відрізнялося положенням змінного резистора. Це дало можливість оцінити продуктивність системи в неідеальних умовах.

1) Дослідження за входної напруги 210 В:

- при положенні змінного резистора у 10% амперметр показав 3,81 А, що відповідає математичному обрахунку у 3.8 А (рисунок 3.9);

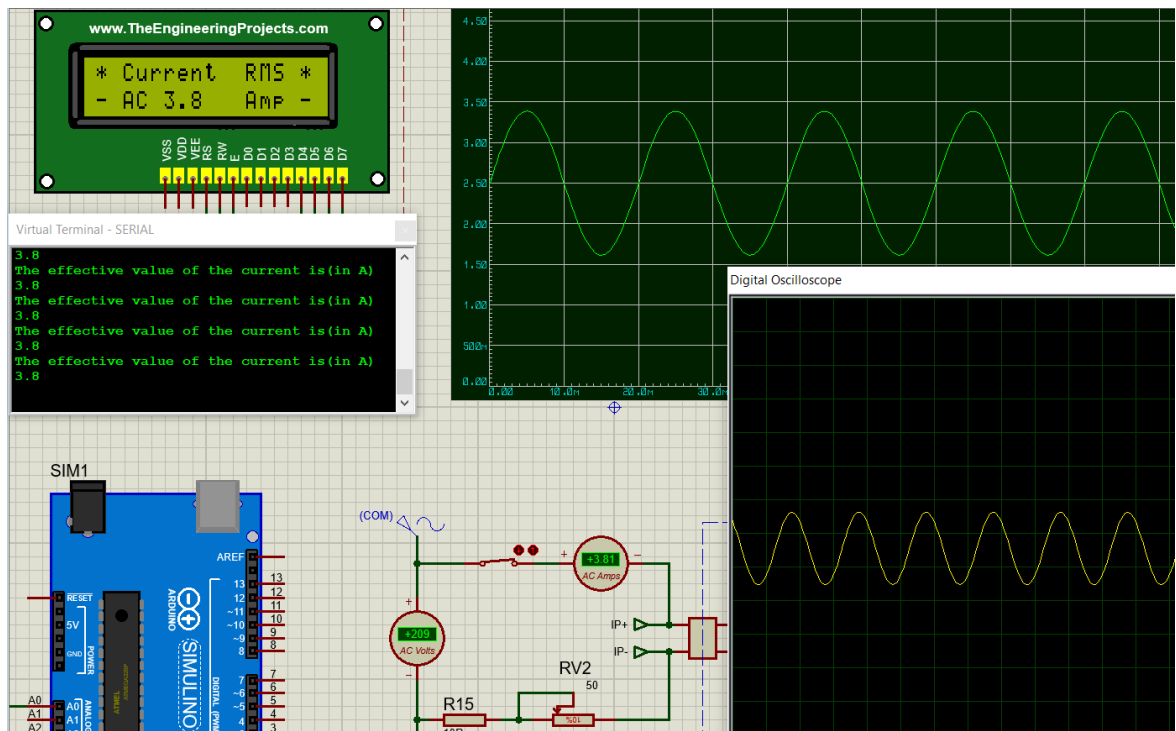


Рисунок 3.9 - Результат моделювання у Proteus при положенні змінного резистора у 10%

- при положенні змінного резистора 50% амперметр показав 5,94 А, що відповідає математичному обрахунку у 6 А (рисунок 3.10);

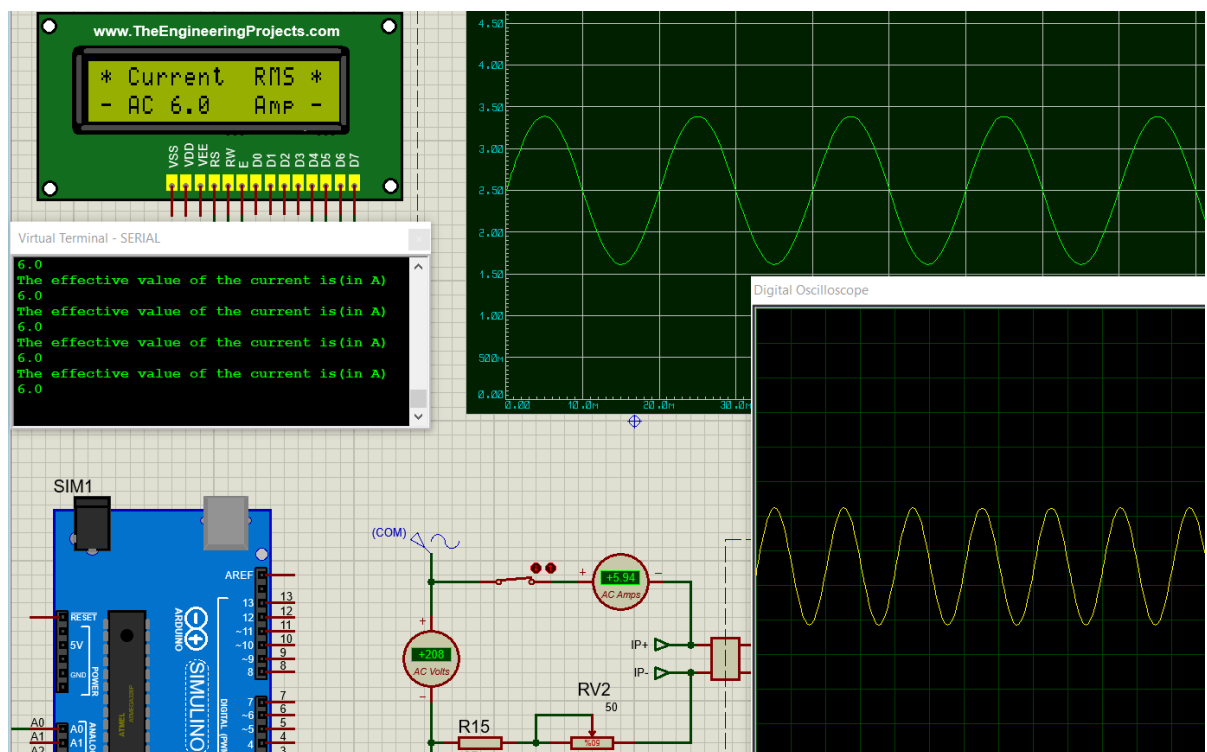


Рисунок 3.10 - Результат моделювання у Proteus при положенні змінного резистора 50%

- при положенні змінного резистора у 80% амперметр показав 10,5 А, що відповідає математичному обрахунку у 10,5 А (рисунок 3.11).

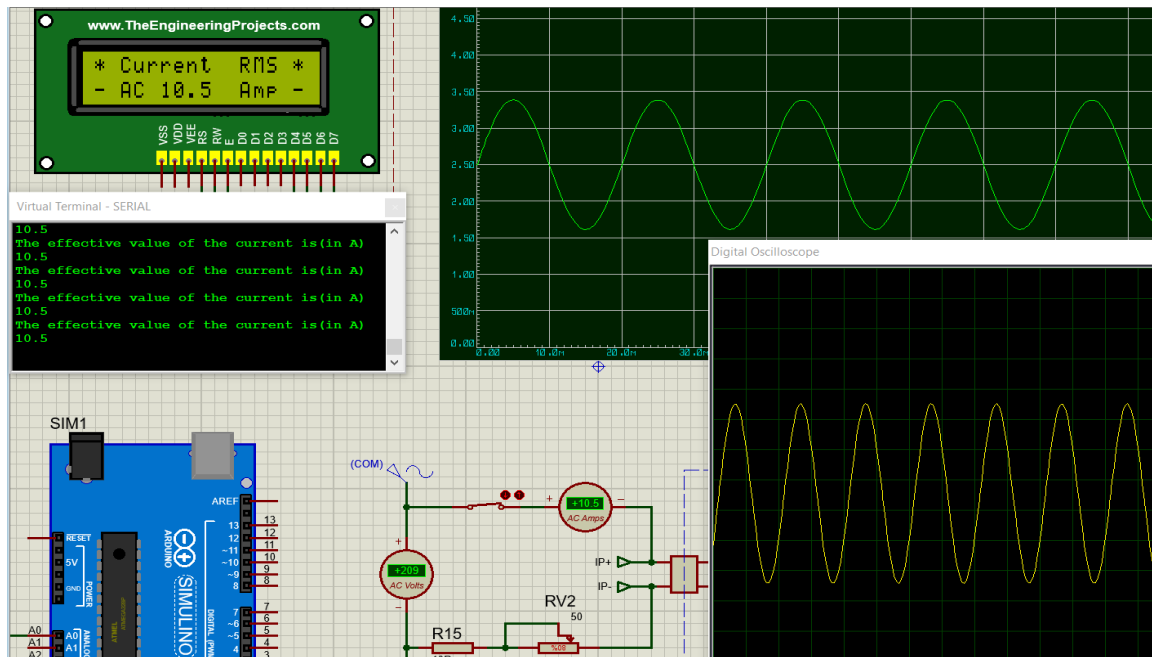


Рисунок 3.11 - Результат моделювання у Proteus при положенні змінного резистора 80%

2) Дослідження за входної напруги 230 В:

- при положенні змінного резистора у 10% амперметр показав 4,16 А, що відповідає математичному обрахунку у 4,2 А (рисунок 3.12);

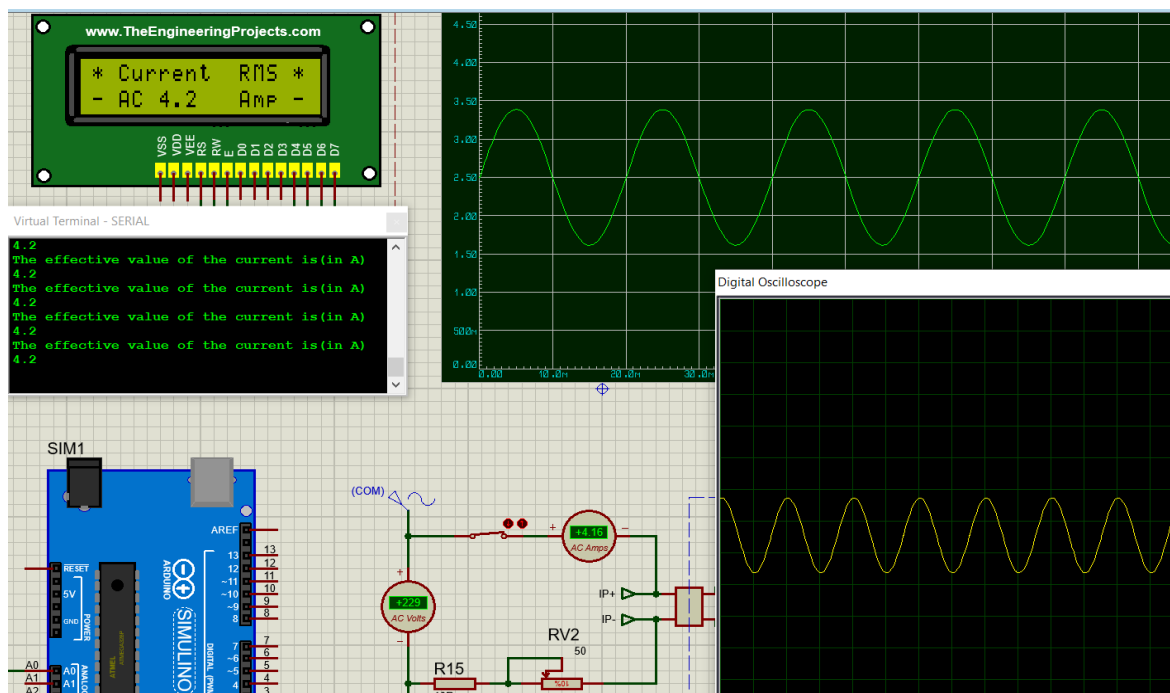


Рисунок 3.12 - Результат моделювання у Proteus при положенні змінного резистора 10%

- при положенні змінного резистора у 50% амперметр показав 6,58 А, що відповідає математичному обрахунку у 6,6 А (рисунок 3.13);

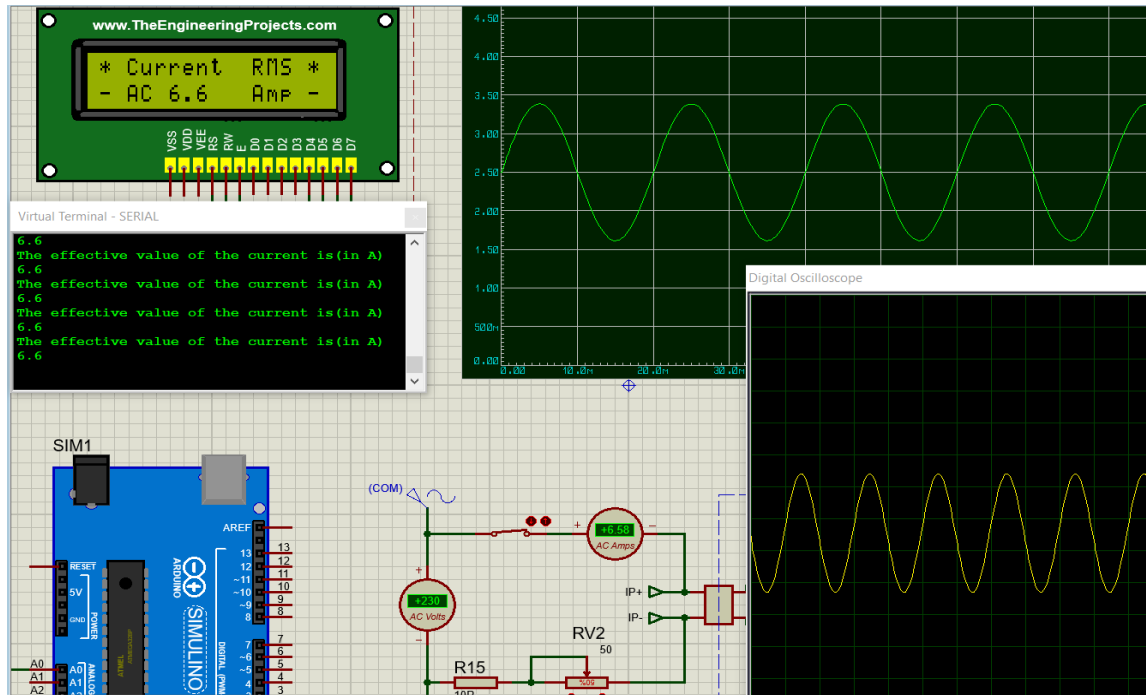


Рисунок 3.13 - Результат моделювання у Proteus при положенні змінного резистора 50%

- при положенні змінного резистора у 80% амперметр показав 11,5 А, що відповідає математичному обрахунку у 11,5 А (рисунок 3.14).

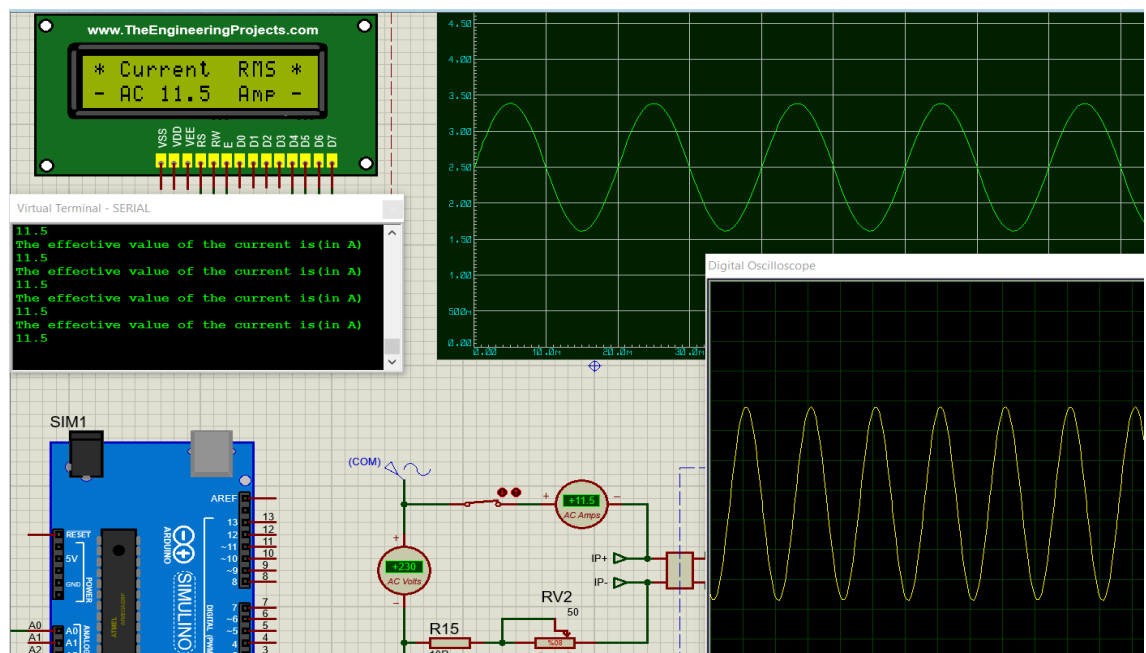


Рисунок 3.14 - Результат моделювання у Proteus при положенні змінного резистора 80%

Відповідно до рисунків 3.12 - 3.14 можна сказати, що система працює належним чином та демонструє стабільну роботу при вхідних не ідеальних параметрах. Результати обрахунків збігаються із виміряними значеннями амперметра, лише у деяких випадках мають незначене відхилення, що є допустимим. Однак, слід враховувати той факт, що при зміні вхідних даних змінюються і вихідні, тому вимірне значення не є достовірним та має зміщення. При точних вимірюваннях потрібно врахувати даний факт та вносити корективи в обрахунки.

Результати моделювання при перевищенні номінального струму

Окрім впливу умов, які призводять до зміни вимірюваних значень, важливо пам'ятати, що навіть за ідеальних умов існують межі допустимих вимірювань. Щодо змодельованої конфігурації, при 20 А (а це приблизно 17 А — максимум), все, що перевищує це значення, буде вимірюватися неправильно, оскільки сигнал матиме спотворення (рисунок 3.15).

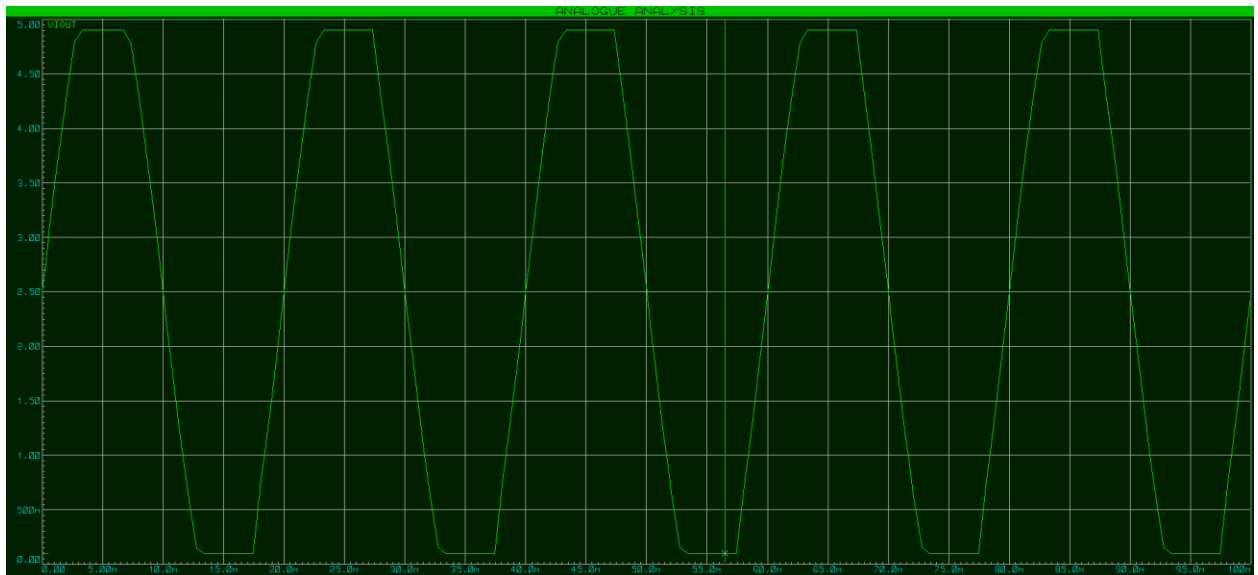


Рисунок 3.15 - Спотворення сигналу

Дослідження моделі пристрою при надпорогових значеннях струму:

- при положенні змінного резистора у 95% амперметр показав 16,9 А, що відповідає математичному обрахунку у 16,9 А (рисунок 3.16).

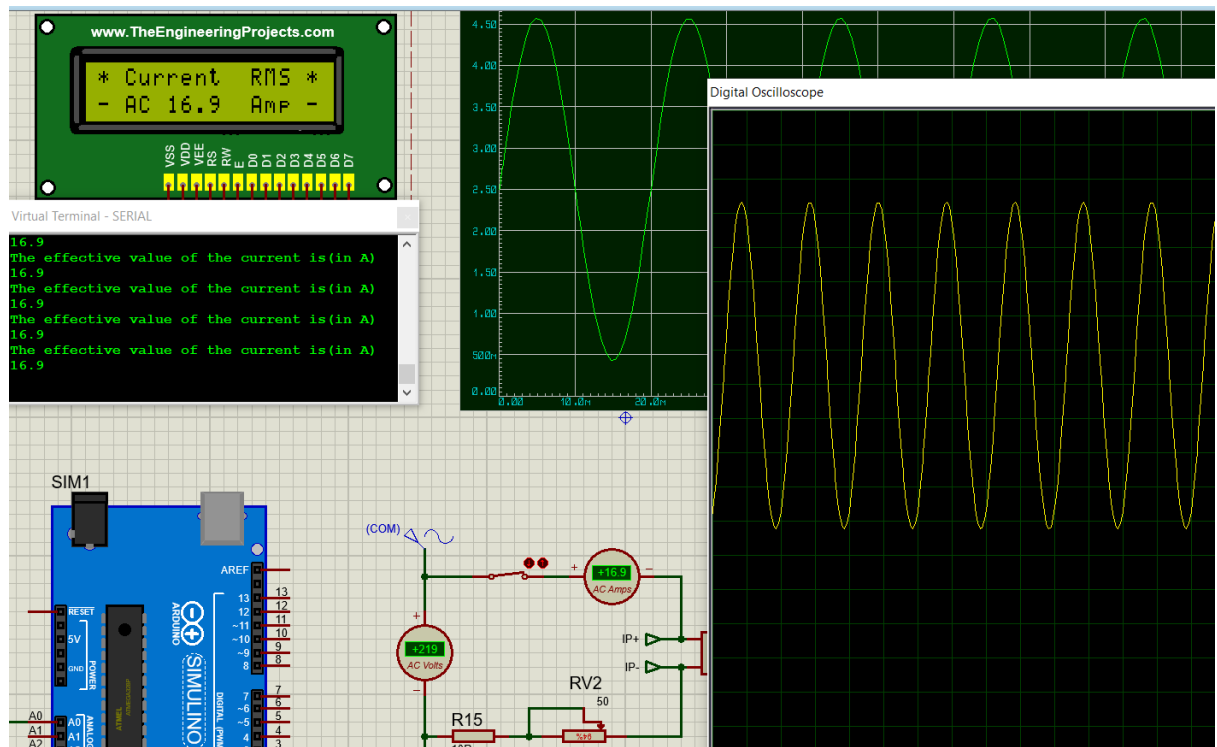


Рисунок 3.16 - Результат моделювання у Proteus при положенні змінного резистора 95%

- при положенні змінного резистора у 96% амперметр показав 18,3 А, що уже не відповідає математичному обрахунку у 17 А (рисунок 3.17) та супроводжується появою шумів.

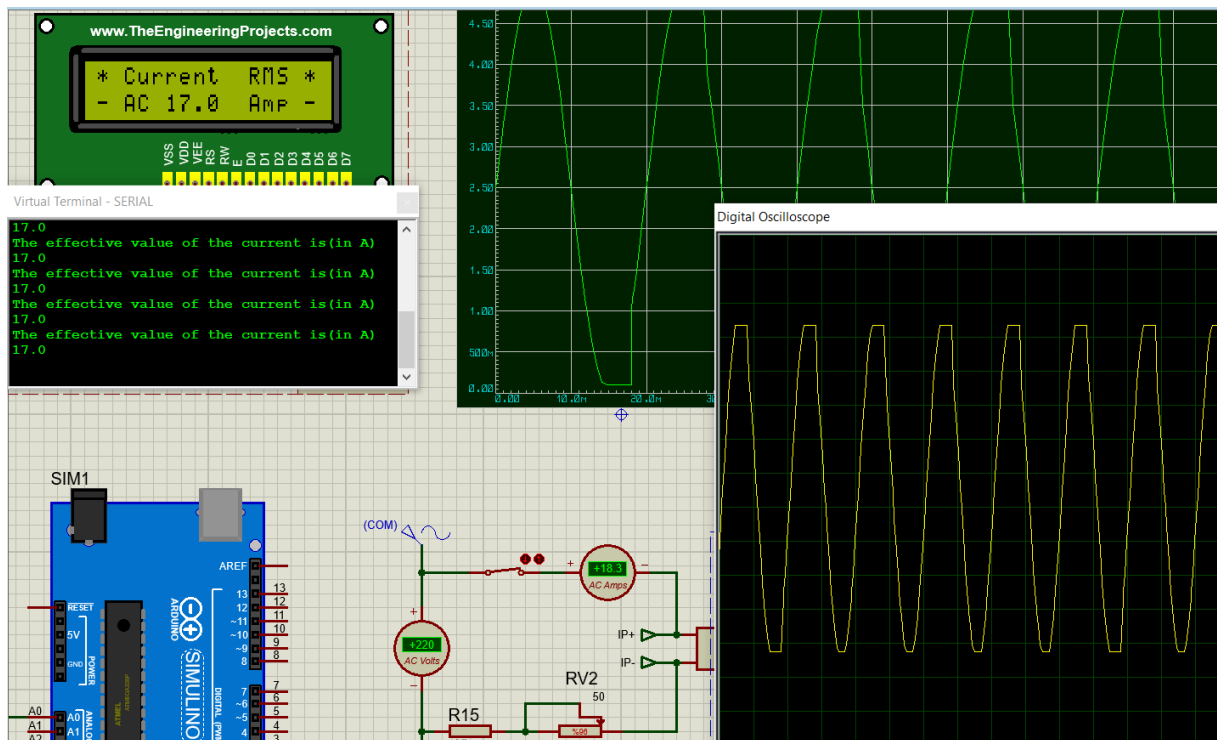


Рисунок 3.17 - Результат 8 моделювання у Proteus при положенні змінного резистора 96%

Отже, можна дійти висновку, що розроблена мною система функціонує коректно і демонструє низький рівень похибки в контрольованих умовах. Проте її чутливість до змін умов використання є значною. Це означає, що для типових побутових застосувань її точність може бути цілком прийнятною. Однак, у випадках, коли вимірювання мають бути дуже стабільними та послідовними при повторних перевірках, необхідно встановлювати додаткові апаратні або програмні фільтри для стабілізації сигналу, або ж забезпечувати максимально стабільні й контрольовані умови експлуатації пристрою. В іншому випадку, коли порогові значення перевищуються або умови відрізняються від ідеальних, отримані дані можуть мати значні спотворення. Незважаючи на ці особливості, потенціал даного пристрою величезний, а його актуальність і затребуваність у сучасних системах вимірювання є беззаперечною.

У третьому розділі моєї роботи було проведено моделювання та дослідження розробленої інформаційно-вимірювальної системи, що є критично важливим етапом для підтвердження її функціональності та ефективності до фізичної реалізації. На початковому етапі було обґрунтовано вибір інструментів для моделювання. Визначено, що для комплексного аналізу системи, яка поєднує аналогові датчики та цифрову обробку, найкраще підходять комбіновані інструменти. Серед них було обрано Proteus 8 Professional завдяки його потужним можливостям схемотехнічного моделювання, підтримці змішаного аналогово-цифрового моделювання, широкій бібліотеці компонентів та функції інтерактивної симуляції в реальному часі. Далі було проведено моделювання процесу вимірювання струму споживання. Детально описано принципи та етапи створення віртуальної моделі системи в Proteus, включаючи імітацію апаратної частини (датчика струму ACS712, мікроконтролера Arduino UNO), симуляцію електричних сигналів та реалізацію алгоритмів обробки даних. Важливою частиною моделювання було врахування невідповідності номінальних значень сигналів між компонентами та її програмна компенсація.

Проведений аналіз результатів моделювання та оцінка ефективності системи показали, що розроблена інформаційно-вимірювальна система функціонує

коректно і демонструє низький рівень похибки в контрольованих умовах. Результати симуляції підтвердили високу точність вимірювань (в межах 1-2% для побутових систем), достатню швидкість обробки даних (500-1000 Гц) для моніторингу змінного струму та енергоефективність системи.

Водночас, дослідження виявило чутливість системи до змін умов використання та вплив надпорогових значень струму на її точність, що може призводити до спотворень сигналу. Це свідчить про необхідність встановлення додаткових апаратних або програмних фільтрів для стабілізації сигналу або забезпечення максимально стабільних та контрольованих умов експлуатації для завдань, що вимагають високої послідовності та стабільності вимірювань.

Загалом, результати моделювання підтверджують високий потенціал розробленого пристрою як ефективного та адаптивного засобу моніторингу електроспоживання, підкреслюючи його актуальність та затребуваність у сучасних системах вимірювання.

ВИСНОВКИ

У даній бакалаврській кваліфікаційній роботі було розроблено та досліджено пристрій вимірювання, що базується на мікроконтролері та датчику ACS712. Проведені дослідження підтвердили, що розглянута система функціонує коректно та демонструє низький рівень похибки в контрольованих умовах, що є ключовим показником її працездатності. Аналіз результатів досліджень також виявив значну чутливість пристрою до змін умов експлуатації. Зокрема, при перевищенні номінальних значень струму, зафіксованих на рівні близько 17 А (для конфігурації з діапазоном 20 А), спостерігається спотворення сигналу, що призводить до неправильних вимірювань. Цей аспект підкреслює важливість дотримання специфічних умов використання для забезпечення високої прецизійності. Для досягнення підвищеної точності та надійності вимірювань, особливо в умовах, далеких від ідеальних, необхідно буде інтегрувати додаткові апаратні або програмні фільтри. Альтернативним рішенням може бути забезпечення максимально стабільних та контрольованих умов для роботи пристрою.

У роботі протягом трьох розділів було послідовно виконано ключові етапи проєктування, що дозволило створити функціональне та ефективне рішення. У розділі розробки системи було детально обґрунтовано вибір її архітектури, апаратних та програмних компонентів. Було доведено необхідність структурних та електричних схем для візуалізації та розуміння взаємодії елементів, а також розроблено алгоритм вимірювання та обробки даних, що забезпечує коректне функціонування системи. Вибір датчика струму ACS712 та мікроконтролера ESP32 обґрунтований їхніми технічними характеристиками, що дозволяють досягти високої точності та забезпечити інтеграцію з IoT-технологіями. Створення програмного забезпечення в Arduino IDE з використанням платформи Blynk підкреслило орієнтованість на енергоефективність та віддалений моніторинг.

Розділ моделювання та дослідження підтвердив працездатність та ефективність розробленої системи. Вибір Proteus 8 Professional як інструменту

моделювання виявився оптимальним для комплексного аналізу апаратної та програмної складових. Результати симуляції засвідчили, що система функціонує коректно, демонструючи низький рівень похибки та належну швидкість обробки даних у контрольованих умовах. Водночас, було виявлено чутливість системи до змін умов експлуатації та надпорогових значень струму, що вказує на необхідність подальшої оптимізації через впровадження додаткових фільтрів для забезпечення максимальної стабільності вимірювань.

Загалом, створена інформаційно-вимірювальна система є комплексним, функціональним та енергоефективним рішенням, що здатне точно вимірювати струм споживання та інтегруватися з сучасними IoT-платформами. Попри виявлені особливості чутливості до умов експлуатації, потенціал цього пристрою для моніторингу та оптимізації енергоспоживання у побутових та промислових застосуваннях є беззаперечним. На мою думку, розробка подібних пристроїв набуває особливої актуальності в умовах сьогодення, зокрема складного воєнного часу в Україні. Надійність та доступність вимірювального обладнання стають критично важливими для підтримки функціонування різноманітних систем – від побутових до промислових. У цьому контексті, даний пристрій виділяється своєю економічною вигідністю, оскільки його конструкція передбачає використання доступних компонентів та відносно низькі витрати на виробництво, що робить його привабливою альтернативою дорожчим аналогам.

Незважаючи на чутливість до умов, потенціал даного пристрою є величезним, а його актуальність і затребуваність у сучасних системах вимірювання, посилені потребами воєнного часу та прагненням до раціонального використання ресурсів, залишаються беззаперечними. Для типових побутових застосувань, де висока прецизійність не є критичною, його функціональність та точність цілком прийнятні. Маю надію, що це дослідження стане важливим кроком у розумінні можливостей і обмежень таких систем, відкриваючи шлях для їх подальшого вдосконалення та ширшого впровадження у практичній діяльності, особливо з урахуванням потреби у вірогідних, економічно обґрунтованих та доступних рішеннях.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ACS712 Current Sensor Datasheet. Allegro MicroSystems. URL: <https://www.allegromicro.com> (дата звернення: 06.03.2025).
2. Arduino Україна. Arduino Uno: Специфікації та посібники користувача. Доступно на: <https://arduino.ua/> (дата звернення: 20.03.2025).
3. Blynk Documentation. URL: <https://docs.blynk.io> (дата звернення: 12.03.2025).
4. Chapman, S. J. *Electric Machinery Fundamentals*. McGraw-Hill Education, 2017. 773 с.
5. Espressif Systems. ESP32 Technical Reference Manual. URL: <https://www.espressif.com> (дата звернення: 20.05.2025).
6. Horowitz, P., Hill, W. *The Art of Electronics*. 3rd ed. Cambridge University Press, 2015. 50 с.
7. Mohan, N., Undeland, T. M., Robbins, W. P. *Power Electronics: Converters, Applications, and Design*. 3rd ed. Wiley, 2002. 812 с.
8. Ziegler, H. *Smart Grid Sensors: Principles and Applications*. Springer, 2018. 35 с.
9. Блажевич, В. С. Основи електроніки : навч. посіб. Київ : Лібра, 2020. 320 с.
10. Бондар, П. М. Застосування мікроконтролерів у вимірювальних системах : практичний посібник. Київ : Технічна книга, 2018. 180 с.
11. Грабовий, П. Г., Макаренко, О. В. Мікропроцесорна техніка : навчальний посібник. Київ : Видавництво КНУ, 2017. 250 с.
12. Електронний журнал "Радіоаматор України": www.radioamator.com.ua. URL: <http://www.radioamator.com.ua/> (дата звернення: 20.03.2025).
13. Зінченко, В. І., Коваленко, Р. П. Системи автоматизації та мікроконтролери. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2019. 300 с.
14. Левченко, С. О. Сучасні методи вимірювання струму: від шунтів до оптичних технологій. *Науково-технічний журнал "Електротехніка України"*. 2022. № 1. С. 15–22.

- 15.Майборода, І. І. Основи мікроконтролерів. Харків : НТУ "ХПІ", 2021. 212 с.
- 16.Петренко, Ю. М., Бондаренко, А. В. Застосування датчиків Холла в сучасних вимірювальних системах. *Вісник Київського політехнічного інституту. Серія: Автоматизація та електротехніка*. 2021. № 2. С. 45–52.
- 17.Про затвердження Вимог до метрологічного забезпечення у сфері вищої освіти : Наказ Міністерства освіти і науки України від 08.06.2021 № 580.
- 18.Семенов І. В. Порівняльний аналіз методів вимірювання струму для електричних систем. *Електротехніка та енергетика*. 2020. № 6. С. 30–38.
- 19.Український портал для інженерів та розробників: chip.ua. URL: <https://chip.ua/> (дата звернення: 20.04.2025).
- 20.Шацький, І. М. Аналогова електроніка. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2019. 284 с.
- 21.Швець О. М. Програмування мікроконтролерів AVR: основи та застосування. Харків : Основа, 2020. 208 с.

Додаток А
(обов'язковий)

ІЛЮСТРАТИВНИЙ МАТЕРІАЛ

**ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНА СИСТЕМА СТРУМУ СПО-
ЖИВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИЛАДІВ.**

Виконав: студент 4-го курсу, групи КІВТ-216
Спеціальності 152 - Метрологія та інформа-
ційно-вимірювальна техніка

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

_____ Будз В.В.
(прізвище та ініціали)

Керівник: к.т.н., доц., доцент каф. ІРТС

_____ Савицький А.Ю.
(прізвище та ініціали)

« 12 » _____ 2025 р.

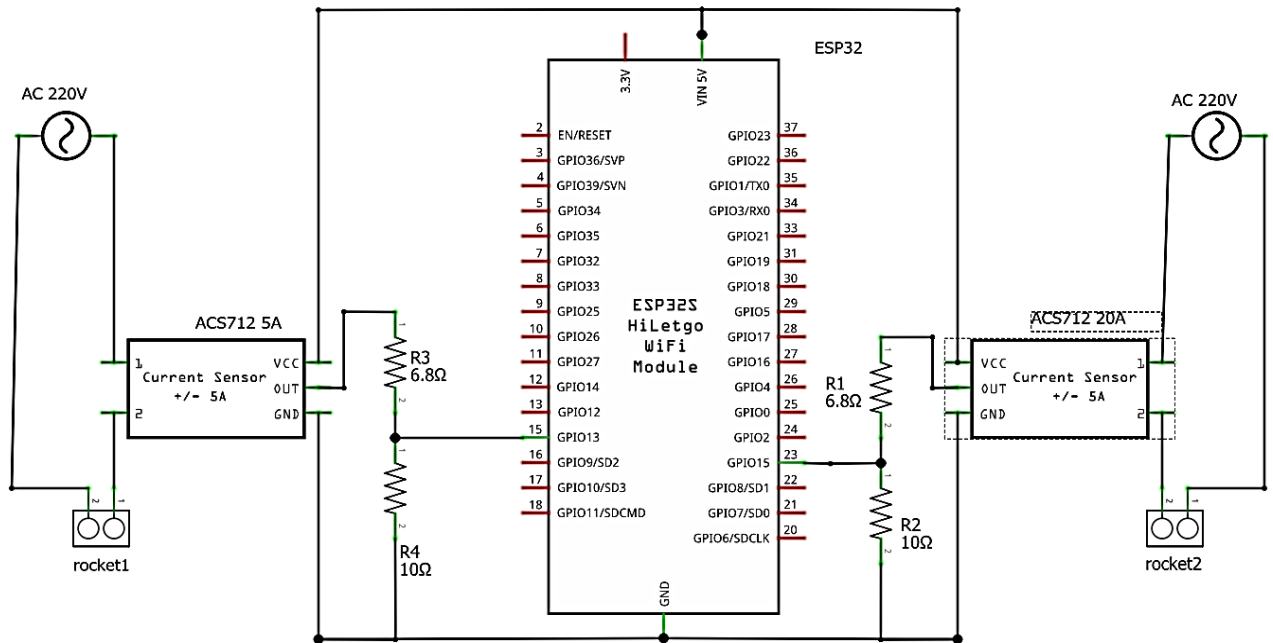


Рисунок 1 - Електрична схема пристрою

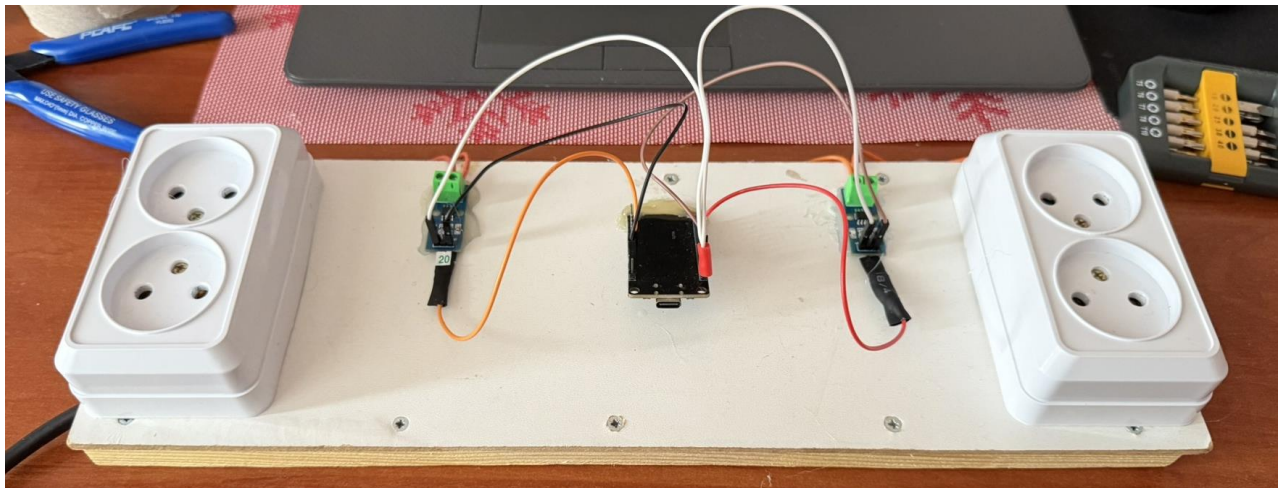


Рисунок 2 - Зовнішній вигляд розробленого пристрою

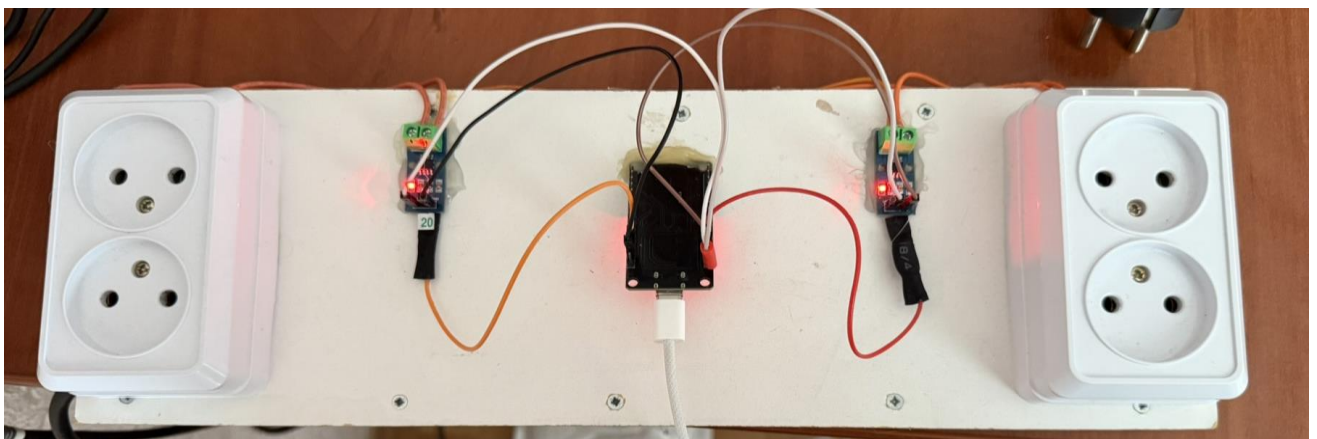


Рисунок 3 - Працююча система в стані спокою

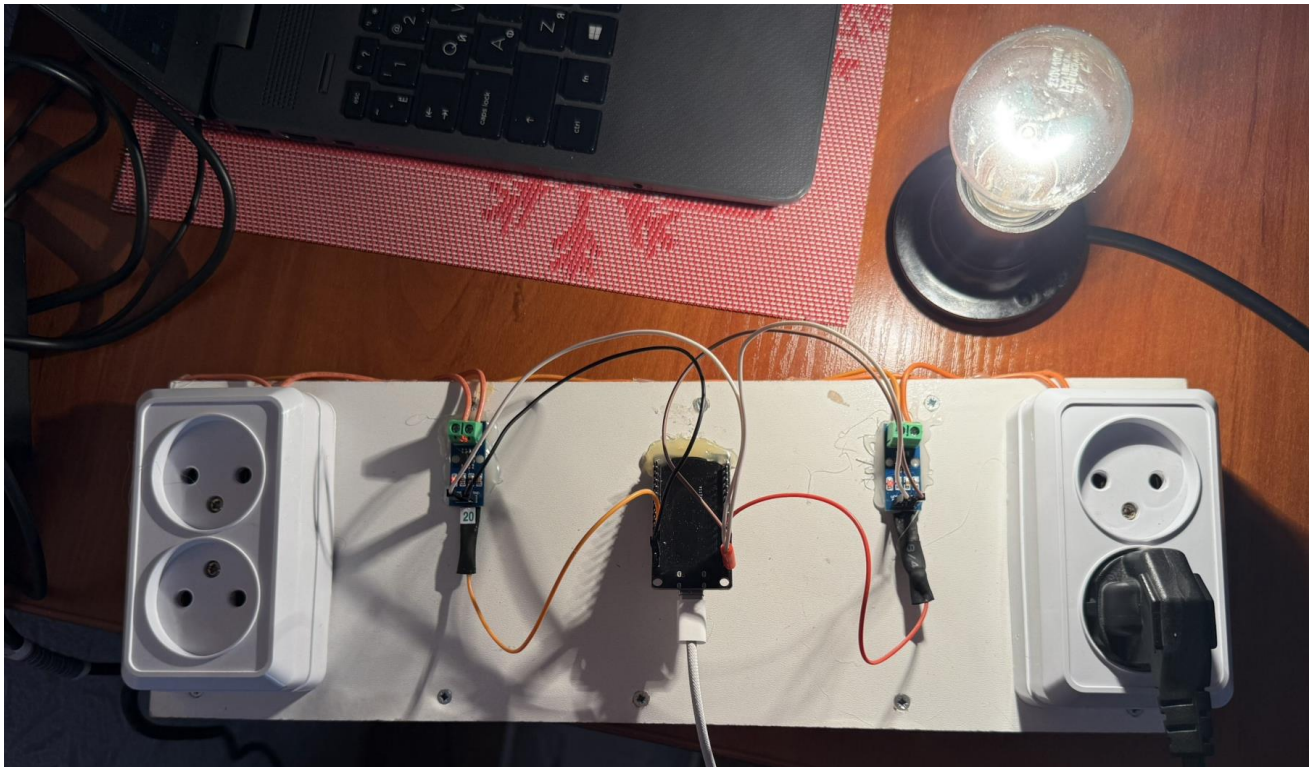


Рисунок 4 - Працююча система під навантаженням

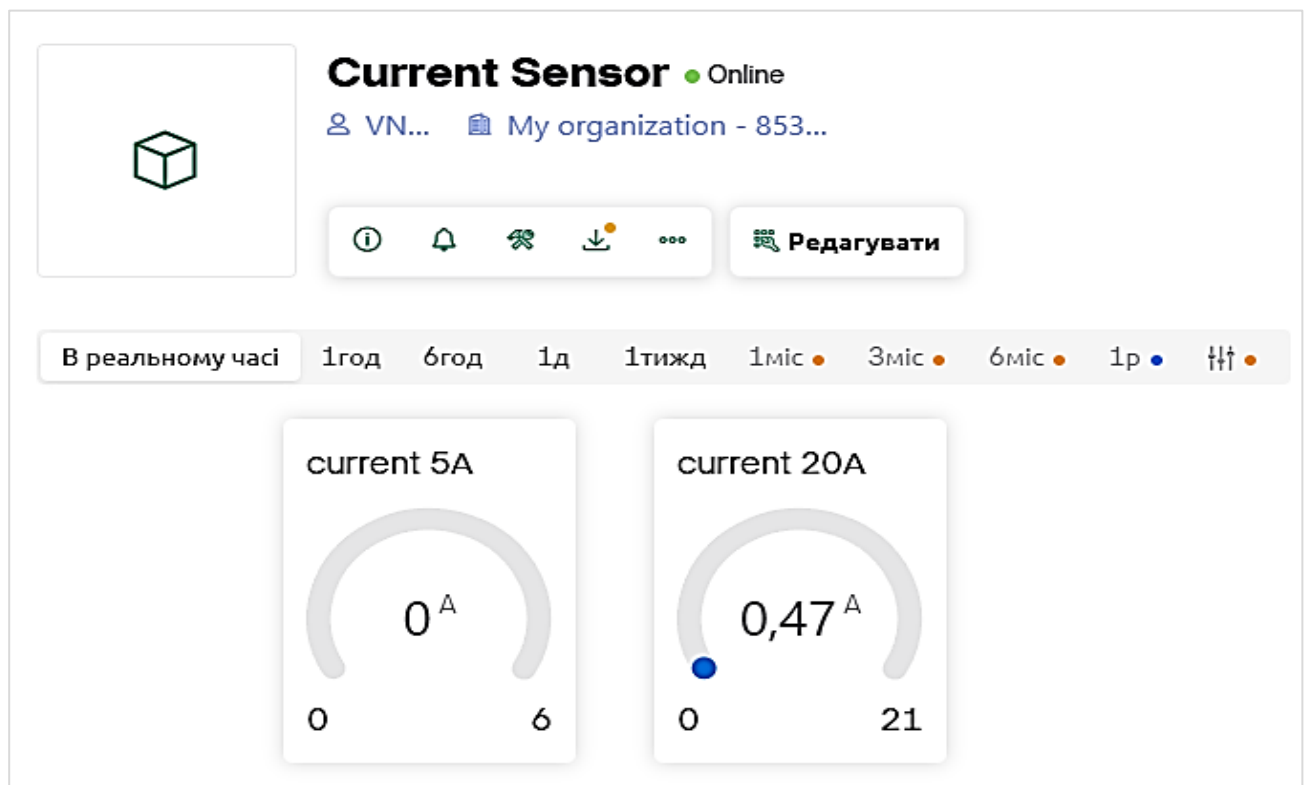


Рисунок 5 - Відображення результату вимірювання
у web-версії з ACS712 20A

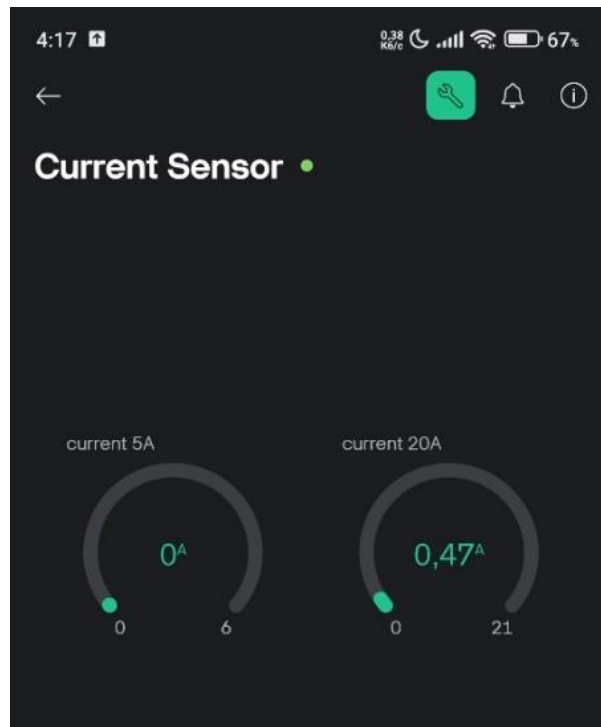


Рисунок 6 - Відображення результату вимірювання
у мобільному застосунку з ACS712 20A

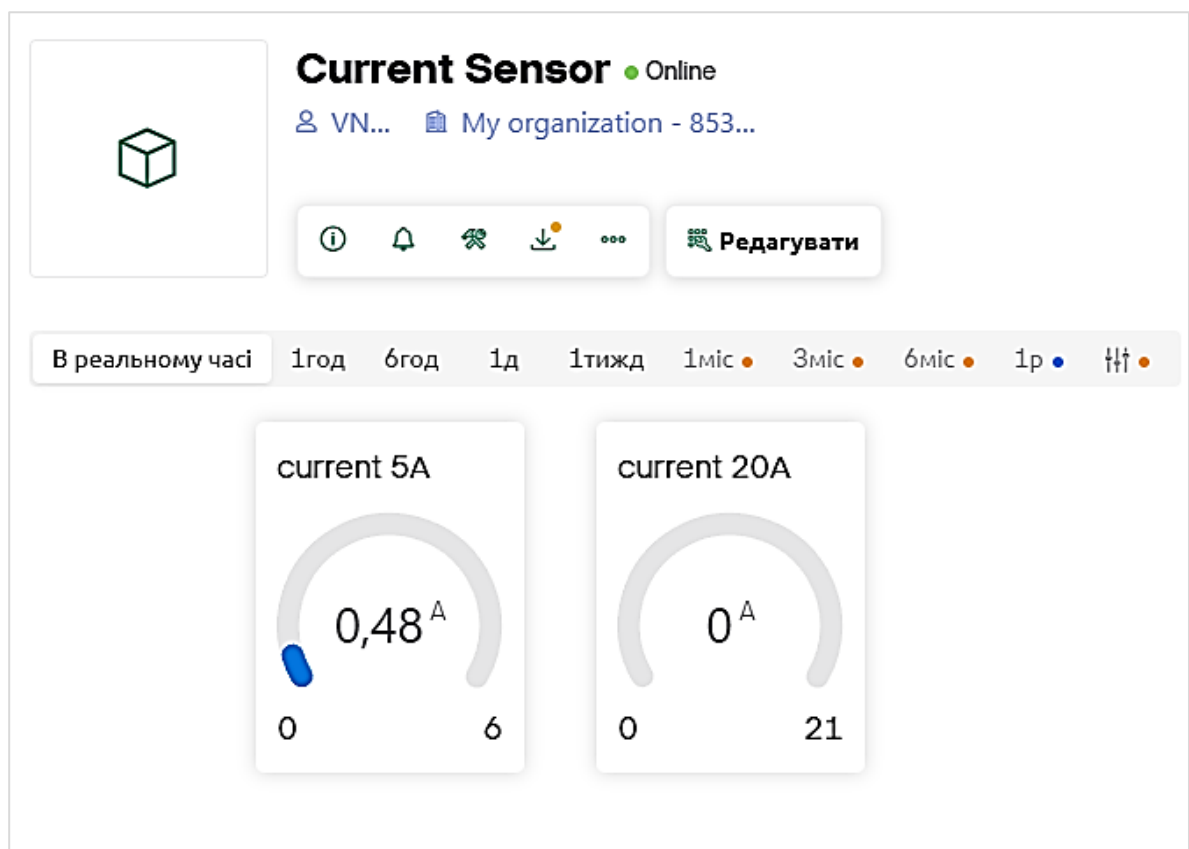


Рисунок 7 - Відображення результату вимірювання
у web-версії з ACS712 5A

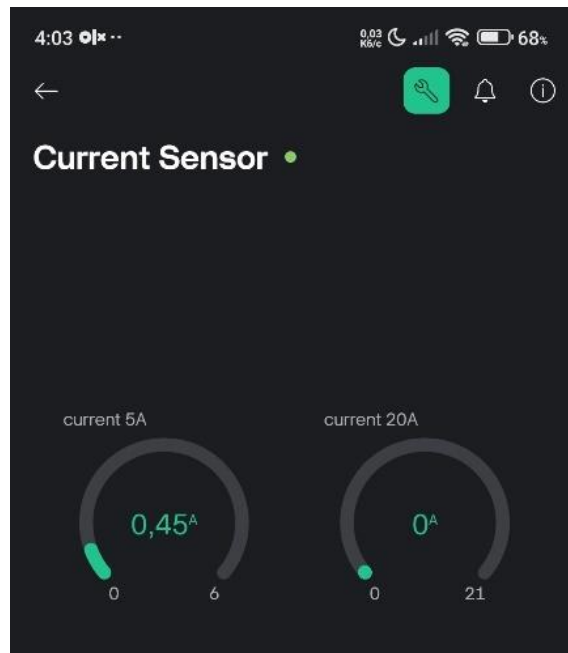


Рисунок 8 - Відображення результату вимірювання
у мобільному застосунку з ACS712 5A

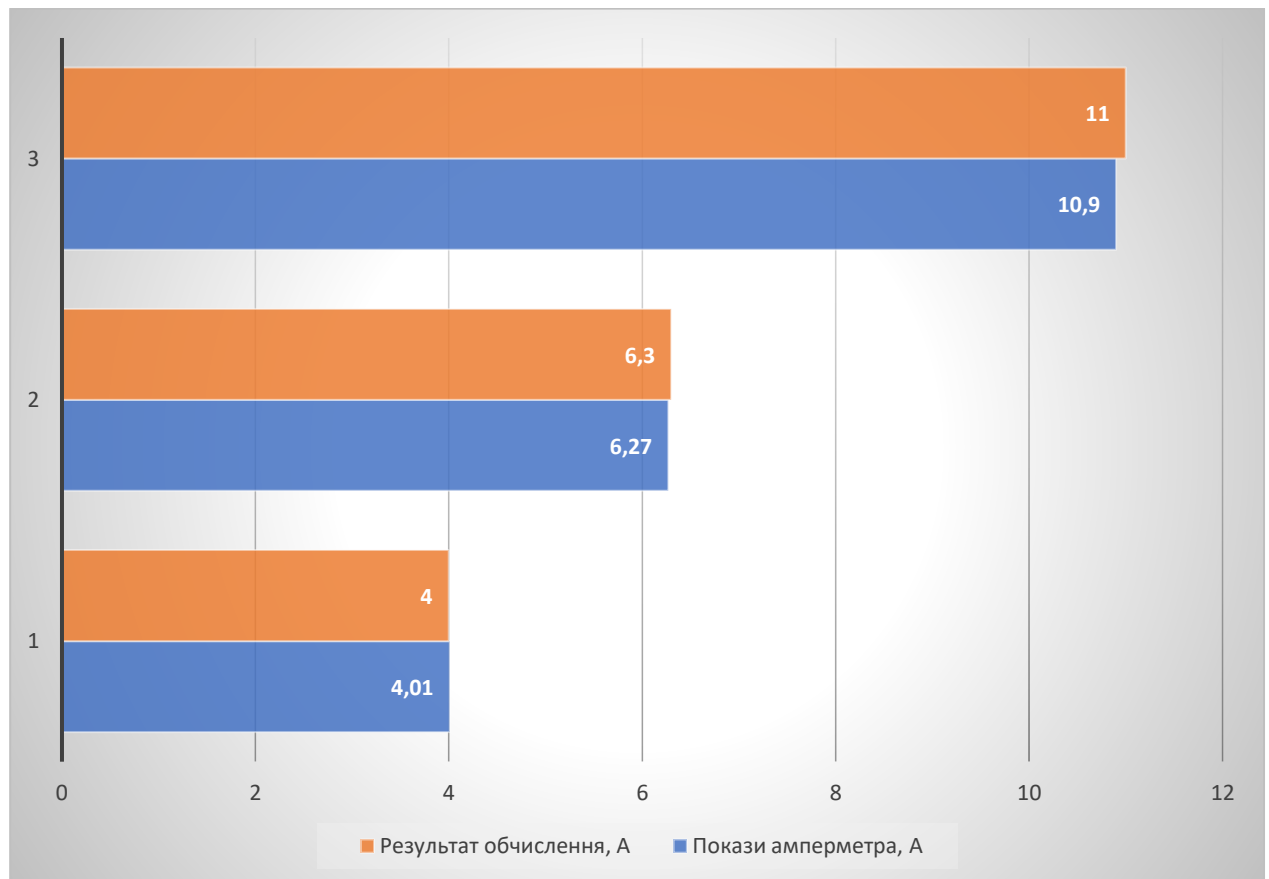


Рисунок 9 - Діаграма результатів вимірювань

Додаток Б
(обов'язковий)

**ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ НАВЧАЛЬНОЇ (БАКАЛАВРСЬКОЇ)
КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ**

**ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНА СИСТЕМА СТРУМУ
СПОЖИВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИЛАДІВ**

ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Назва роботи: «Інформаційно-вимірювальна система струму споживання електроприладів»

Тип роботи: Бакалаврська кваліфікаційна робота
(бакалаврська кваліфікаційна робота / магістерська кваліфікаційна робота)

Підрозділ Кафедра ІРТС
(кафедра, факультет, навчальна група)

Коефіцієнт подібності текстових запозичень, виявлених у роботі системою StrikePlagiarism 0,27%

Висновок щодо перевірки кваліфікаційної роботи (відмітити потрібне)

- ☒ Запозичення, виявлені у роботі, є законними і не містять ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації. Роботу прийняти до захисту
- ☐ У роботі не виявлено ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації, але надмірна кількість текстових запозичень та/або наявність типових розрахунків не дозволяють прийняти рішення про оригінальність та самостійність її виконання. Роботу направити на доопрацювання.
- ☐ У роботі виявлено ознаки плагіату та/або текстових маніпуляцій як спроб укриття плагіату, фабрикації, фальсифікації, що суперечить вимогам законодавства та нормам академічної доброчесності. Робота до захисту не приймається.

Експертна комісія:

Дудатьєв І.А. – к.т.н., доцент каф. ІРТС
(прізвище, ініціали, посада)

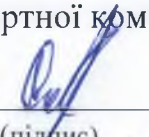
Осадчук О.В. – д.т.н., професор, зав. каф. ІРТС
(прізвище, ініціали, посада)

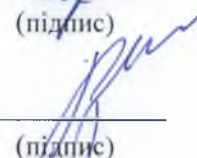

(підпис)

Особа, відповідальна за перевірку 
(підпис)

Семенов А.О.
(прізвище, ініціали)

З висновком експертної комісії ознайомлений(-на)

Керівник 
(підпис) Савицький А.Ю. – к.т.н., доцент, ІРТС
(прізвище, ініціали, посада)

Здобувач 
(підпис) Будз В.В.
(прізвище, ініціали)

Додаток В

(довідниковий)

Лістинг програми для апаратної частини

```

#define BLYNK_TEMPLATE_ID "TMPL48A5nzwC"
#define BLYNK_TEMPLATE_NAME "Current Sensor"
#define BLYNK_AUTH_TOKEN "1QBxPu1U835PYDxw0JOJNlUfmVBKz0N_"
#include <WiFi.h>
#include <WiFiClient.h>
#include <BlynkSimpleEsp32.h>
#define CURRENT_SENSOR0 13
#define CURRENT_SENSOR1 15
float amplitude_current0;
float amplitude_current1;
float effective_value0;
float effective_value1;
float cutOffLimit = 0.09;
char auth[] = BLYNK_AUTH_TOKEN;
char ssid[] = "****";
char pass[] = "****";
void setup() {
    Serial.begin(115200);
    analogReadResolution(12);
}

void loop() {
    int sensor_max0 = getMaxValue0();
    int sensor_max1 = getMaxValue1();

    amplitude_current0 = (float)(sensor_max0 - 2048) * 1.8 / 4095 * 3 / 85 * 1000;
    effective_value0 = (amplitude_current0 / 1.414) - 3.2;

    amplitude_current1 = (float)(sensor_max1 - 2048) * 1.8 / 4095 * 3 / 103 * 1000;
    effective_value1 = (amplitude_current1 / 1.414) - 2.8;

    if (effective_value0 < cutOffLimit) {
        effective_value0 = 0.0;
    }
    if (effective_value1 < cutOffLimit) {
        effective_value1 = 0.0;
    }
    OpenCloseWiFiendBlynk(effective_value0, effective_value1);
}

void OpenCloseWiFiendBlynk ( float value0, float value1) {
    WiFi.begin(ssid, pass);
    Serial.print("Підключення до Wi-Fi");
    while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
        delay(500);
    }
}

```

```

    Serial.print(".");
}
Serial.println("\nWi-Fi з'єднано");
Blynk.config();
Blynk.connect();
unsigned long startTime = millis();
while (!Blynk.connected()) {
    if (millis() - startTime > 5000) {
        Serial.println("Помилка Blynk з'єднання");
        break;
    }
    delay(100);
}
if (Blynk.connected()) {
    Blynk.virtualWrite(V0, value0);
    Blynk.virtualWrite(V1, value1);
    Serial.println("Дані передані в Blynk");
}
delay(1000);
Blynk.disconnect();
WiFi.disconnect();
}
int getMaxValue0() {
    int sensorValue0;
    int sensorMax0 = 0;
    uint32_t start_time = millis();
    while ((millis() - start_time) < 1000) {
        sensorValue0 = analogRead(CURRENT_SENSOR0);
        if (sensorValue0 > sensorMax0) {
            sensorMax0 = sensorValue0;
        }
    }
    return sensorMax0;
}
int getMaxValue1() {
    int sensorValue1;
    int sensorMax1 = 0;
    uint32_t start_time = millis();
    while ((millis() - start_time) < 1000) {
        sensorValue1 = analogRead(CURRENT_SENSOR1);
        if (sensorValue1 > sensorMax1) {
            sensorMax1 = sensorValue1;
        }
    }
    return sensorMax1;
}

```

Лістинг програми для моделювання

```
#include <Wire.h>
```

```

#include <LiquidCrystal_I2C.h>
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2);
#define CURRENT_SENSOR A0
float amplitude_current;
float effective_value;

void setup()
{
    Serial.begin(9600);
    pins_init();
    lcd.init();
    lcd.begin(16,2);
    lcd.backlight();
}
void loop()
{
    int sensor_max;
    sensor_max = getMaxValue();
    amplitude_current=(float)(sensor_max-512)/1024*5/100*1000;
    effective_value=amplitude_current/1.414;

    Serial.println("Current RMS in A");
    Serial.println(effective_value,1);

    lcd.clear();
    lcd.print("* Current  RMS *");
    lcd.setCursor (5,1);
    lcd.print(effective_value,1);
    lcd.setCursor (0,1);
    lcd.print("- AC");
    lcd.setCursor (11,1);
    lcd.print("Amp");
    lcd.setCursor (15,1);
    lcd.print("-");
    delay(500);
}
int getMaxValue()
{
    int sensorValue;
    int sensorMax = 0;
    uint32_t start_time = millis();
    while((millis()-start_time) < 1000)
    {
        sensorValue = analogRead(CURRENT_SENSOR);
        if (sensorValue > sensorMax)
        {
            sensorMax = sensorValue;
        }
    }
    return sensorMax;
}

```