

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет комп'ютерної інженерії та управління
(повна назва)

Кафедра електронних обчислювальних машин
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
Пояснювальна записка

Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

Пристрій моніторингу мережі електроживлення
приміщення

(тема)

Виконав:

здобувач 3 року навчання,

групи КІУКІу-22-1

Володимир БОРОДАЙ

(власне ім'я, прізвище)

Спеціальність

123 «Комп'ютерна інженерія»

(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна

(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма

Комп'ютерна інженерія

(повна назва освітньої програми)

Керівник: ст. викл. Дмитро РОСІНСЬКИЙ

(посада, власне ім'я, прізвище)

Допускається до захисту

Завідувач кафедри ЕОМ

(підпис)

Андрій КОВАЛЕНКО

(власне ім'я, прізвище)

2025 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет _____ комп'ютерної інженерії та управління _____

Кафедра _____ електронних обчислювальних машин _____

Рівень вищої освіти _____ перший (бакалаврський) _____

Спеціальність _____ 123 «Комп'ютерна інженерія» _____
(код і повна назва)

Тип програми _____ освітньо-професійна _____
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма _____ Комп'ютерна інженерія _____
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____
(підпис)

“ _____ ” _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачеві _____ Бородаю Володимиру Руслановичу _____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи _____ Пристрій моніторингу мережі електроживлення приміщення _____

затверджена наказом по університету від “ 26 ” травня 2025 р. № 425 Ст

2. Термін подання здобувачем роботи до екзаменаційної комісії _____ 14 липня 2025 р.

3. Вхідні дані до роботи _____ 1. Апаратна база – мікроконтролер.

_____ 2. Наявність джерела безперебійного живлення.

_____ 3. Можливість віддаленої комунікації з користувачем.

_____ 4. Ведення архіву вимірювань.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати у роботі _____

_____ 1. Аналіз проблеми та постановка задачі проектування

_____ 2. Огляд існуючих рішень

_____ 3. Вибір напрямку розробки

_____ 4. Вибір інструментальних засобів

_____ 5. Алгоритм роботи пристрою

_____ 6. Електричні схеми (структурна, принципова)

_____ 7. Програмне забезпечення

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій _____

Слайд-презентація – 10 слайдів _____

6. Консультанти розділів роботи (заповнюється за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1)

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Строк / терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз проблеми та огляд існуючих рішень	10.06.25-13.06.25	
2	Вибір напрямку розробки та інструментальних засобів	14.06.25-17.06.25	
3	Розробка алгоритмічного забезпечення	18.06.25-21.06.25	
4	Розробка електричних схем	23.06.25-26.06.25	
5	Розробка програмного забезпечення	27.06.25-02.07.25	
6	Оформлення матеріалів кваліфікаційної роботи	03.07.25-05.07.25	
7	Подання кваліфікаційної роботи керівникові та її попередній захист	07.07.25-09.07.25	
8	Подання кваліфікаційної роботи на рецензування	10.07.25-11.07.25	

Дата видачі завдання “ 09 ” червня 2025 р.

Здобувач


(підпис)

Керівник роботи

_____ (підпис)

ст. викл. Дмитро РОСІНСЬКИЙ

_____ (посада, власне ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи: 71 с., 24 рис., 2 дод., 24 джерела.

ВИМІРЮВАННЯ, ІНТЕРФЕЙС, МОНІТОРИНГ, ПАРАМЕТРИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ, СМАРТ-ЛІЧИЛЬНИК.

Метою кваліфікаційної роботи є розробка пристрою, який здатен забезпечити надійний контроль за параметрами електромережі, можливість попереджати аварійні ситуації, передачу даних користувачеві у будь-який час через WiFi або Bluetooth.

У ході виконання кваліфікаційної роботи реалізовано пристрій моніторингу на основі ATmega328P. Розглянуто як основні теоретичні, так і практичні аспекти створення автоматизованих систем моніторингу та керування електроспоживанням. Програмна логіка забезпечує зручний інтерфейс для користувача, можливість оперативної зміни налаштувань, а також візуалізацію інформації на LCD-дисплеї й передавання даних у зовнішні системи.

Завдяки відкритій архітектурі та можливості масштабування, запропонований пристрій за низкою показників може не лише конкурувати із заводськими рішеннями, а й перевищувати їх за співвідношенням ціни та функціональних можливостей.

ABSTRACT

Bachelor's thesis: 71 pages, 24 figures, 2 appendices, 24 sources.

ELECTRICAL NETWORK PARAMETERS, INTERFACE,
MEASUREMENT, MONITORING, SMART METER.

The objective of the qualification project is the development of a device capable of providing reliable monitoring of electrical network parameters, the ability to prevent emergency situations, and data transmission to the user at any time via WiFi or Bluetooth.

In the course of the project, a monitoring device based on the ATmega328P microcontroller was implemented. Both the theoretical foundations and practical aspects of developing automated systems for energy consumption monitoring and control were considered. The software logic provides a user-friendly interface, the ability to adjust settings in real-time, and visualizes information on an LCD display, while also transmitting data to external systems.

Thanks to its open architecture and scalability, the proposed device can, in several aspects, not only compete with industrial solutions but also surpass them in terms of cost-to-functionality ratio.

ЗМІСТ

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ	7
ВСТУП	8
1 АНАЛІЗ ПРОБЛЕМИ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ПРОЄКТУВАННЯ	10
1.1 Автоматизація обліку електричної енергії та контролю її параметрів	10
1.2 Якість електричної енергії	14
1.3 Огляд існуючих рішень	16
1.4 Постановка задачі проектування	23
2 ВИБІР НАПРЯМКУ ТА ЗАСОБІВ РОЗРОБКИ	24
2.1 Напрямок розробки	24
2.2 Засоби розробки апаратної складової пристрою	25
2.3 Засоби розробки програмного забезпечення.....	30
3 ПРОЄКТУВАННЯ ПРИСТРОЮ.....	35
3.1 Алгоритм роботи пристрою	35
3.2 Електрична структурна схема.....	37
3.3 Вибір елементної бази	38
3.4 Електрична принципова схема	54
ВИСНОВКИ.....	58
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	60
ДОДАТОК А Графічний матеріал кваліфікаційної роботи.....	63

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

АЦП – аналогово-цифровий перетворювач

ОС – операційна система

АМІ – інфраструктура автоматизованого обліку (англ., Automated Meter Infrastructure)

АММ – керування обліком електроенергії (англ., Automated Meter Management)

АМР – автоматичне зчитування показників лічильників (англ., Automatic Meter Reading)

СС/СV – сталий струм / стала напруга (англ., Constant Current / Constant Voltage)

LCD – рідкокристалічний дисплей (англ., Liquid Crystal Display)

UART – універсальний асинхронний приймач-передавач (англ., Universal Asynchronous Receiver-Transmitter)

АСКОЕ – автоматизовані системи обліку та контролю споживання електричної енергії

ВСТУП

На сьогоднішній день, через значне підвищення цін на енергетичні ресурси, актуальною є проблема ефективного використання і обліку електроенергії як в промисловому, так і побутовому секторах. Проблема полягає у значних втратах електроенергії від розкрадання, неефективному та нераціональному використанні обладнання [1]. З іншого боку, є потреба у контролі якості постачання електричної енергії. Одним з ефективних рішень тут можна вважати впровадження контролера системи електроживлення, який буде здійснювати моніторинг параметрів електромережі для ефективного контролю витрат електроенергії обладнанням як в підприємницьких установах, так і в побуті.

Наразі існує величезна кількість різноманітних аналогів, які вирішують ті ж самі проблеми, маючи схожий функціонал. Такі прилади можуть вимірювати параметри електромережі, вести архів та надавати інформацію про показники за різні проміжки часу, передавати дані безпосередньо користувачам на відстані за допомогою інтегрованих модулів зв'язку, тощо. Проте, зважаючи на функціонал таких приладів, можна виявити певні недоліки, а саме:

- складність підключення до системи;
- нерозуміння налаштування пристрою та його технічних характеристик;
- занадто висока ціна.

Під час розробки пристрою необхідно враховувати дані обмеження для забезпечення максимальної зручності і ефективності його використання.

В даній роботі розглядаються шляхи вирішення питань з моніторингу електроенергії і проводиться розробка сучасного пристрою, який здатен забезпечити надійний контроль за параметрами електромережі, можливість передбачити аварійні ситуації або ситуації, коли обладнання вийде з ладу,

передачу даних користувачеві у будь-який час через WiFi або Bluetooth.

Стратегія розробки обрана такою, щоб надати можливість удосконалення в майбутньому розробленого пристрою, зокрема, за рахунок модифікації керуючого програмного забезпечення, додавання або заміни відповідних складових, тощо.

1 АНАЛІЗ ПРОБЛЕМИ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ПРОЄКТУВАННЯ

1.1 Автоматизація обліку електричної енергії та контролю її параметрів

У сучасних умовах активного впровадження інтелектуальних технологій суспільство дедалі частіше стикається з низкою викликів і проблем, що виникають у зв'язку зі стрімким розвитком та значними перетвореннями в галузі смарт-технологій, особливо у сфері електроенергетики [2].

Смарт-технології в енергетиці проявляють себе у вигляді модернізованих мереж електропостачання, в яких інтегруються інформаційні та комунікаційні технології для отримання та аналізу даних щодо генерації та споживання електроенергії. В свою чергу, це дає змогу автоматично підвищити ефективність, надійність, економічність і стабільність процесів виробництва та розподілу електроенергії [2].

Подібні технології застосовуються в таких системах, як Smart Grid («розумні мережі») (рисунк 1.1), Smart Metering («розумний облік») (рисунк 1.2), Smart Home («розумний будинок»), Smart Ticket («розумний квиток»), тощо. Інтелектуальні пристрої для контролю та обліку електроенергії все частіше використовуються в інфраструктурі «розумних міст» (Smart City).

Поширенню концепції Smart Grid (рисунк 1.1) перешкоджають сучасні глобальні тенденції в електроенергетиці, серед яких – постійне зростання потужностей нелінійних, несиметричних та динамічних навантажень, а також масове впровадження сонячних і вітрових електростанцій, що часто не супроводжується належними заходами з корекції якості електроенергії [2].

Важливо зазначити, що центральна роль у вирішенні завдань, які ставить перед собою концепція Smart Grid, належить «розумним

лічильникам» (Smart Meters) та створеним на їхній основі системам Smart Metering Systems, які в Україні традиційно визначаються як АСКОЕ – автоматизовані системи обліку та контролю споживання електричної енергії [3].

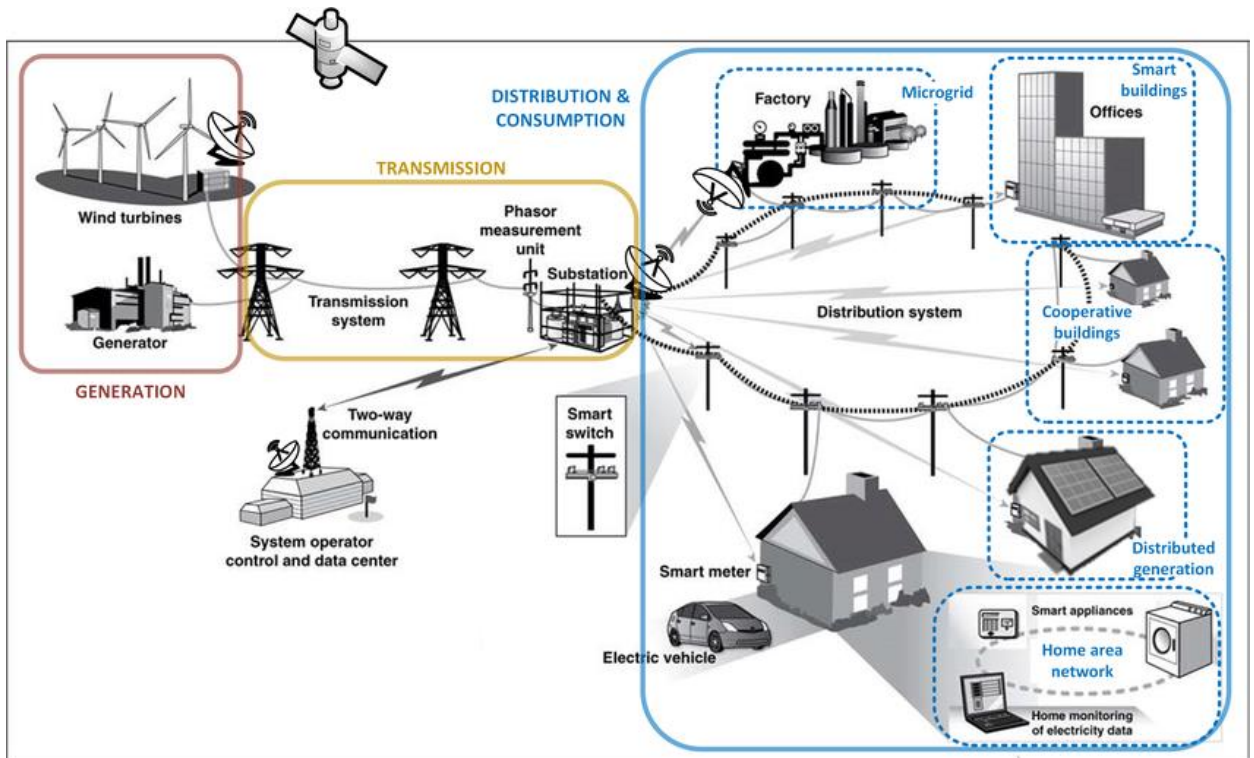


Рисунок 1.1 – Концептуальна модель Smart Grid

За результатами багаторічних досліджень, проведених в Інституті енергозбереження та енергоменеджменту НТУУ «КПІ», у 1997 році було запропоновано «Концепцію створення автоматизованих систем обліку електроенергії для умов енергетичного ринку України» [3]. У 2000 році була видана друга редакція цієї Концепції, що отримала офіційне затвердження спільним наказом Мінпаливенерго, НКРЕ, Держкоменергозбереження, Держстандарту, Держбуду та Держпромполітики.

У міжнародній практиці аналогічні системи мають назву AMR (англ., Automatic Meter Reading – автоматичне зчитування показників лічильників), а також більш удосконалені варіанти – АММ (Automated Meter Management) та АМІ (Automated Meter Infrastructure), які забезпечують можливість

управління режимами споживання енергії [2]. Такі системи інтегрують діяльність усіх учасників ринку електроенергії, виробників сучасного обладнання для розподілу електроенергії, а також законодавчих і регуляторних органів, що оптимізує їхню взаємодію в різних секторах, зокрема у житлово-комунальному господарстві, транспортній та інших галузях економіки. Вказані технології активно використовуються в електромережах багатьох європейських держав, а також за їх межами – в Єгипті, країнах Африки, Австралії, Нової Зеландії, на Близькому і Далекому Сході та в низці країн, що розвиваються. Подібні системи набувають все більшого значення як у побутовому секторі, так і на виробничих підприємствах, оскільки інноваційність та ефективність технічних рішень визначає загальну ефективність функціонування системи.

Smart Metering (рисунок 1.2) – це технологія використання інтелектуальних лічильників для здійснення детального аналізу та контролю за споживанням енергетичних ресурсів [1, 4]. Такі лічильники дають змогу ефективно здійснювати моніторинг, проводити точні розрахунки витрат на комунальні послуги, включаючи електроенергію, що позитивно впливає на загальну ефективність міської інфраструктури та сприяє оптимізації витрат ресурсів. Наприклад, система може автоматично визначати аварійні ситуації на основі даних, отриманих від вбудованих датчиків тиску, і оперативно повідомляти відповідні служби для своєчасного реагування та мінімізації втрат.

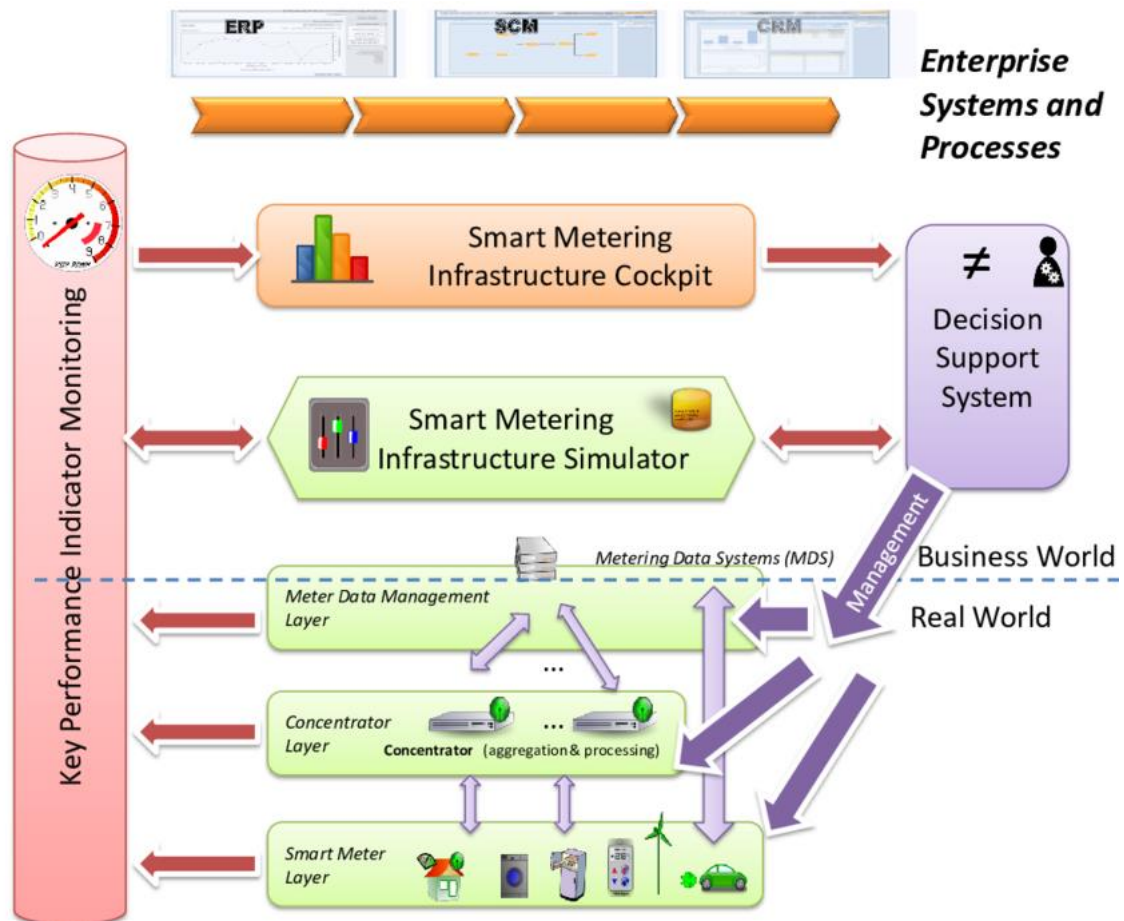


Рисунок 1.2 – Концептуальна модель Smart metering

Слід зазначити, що в українській фаховій термінології поняття «АСКОЕ» має дві основні інтерпретації:

- у вузькому розумінні означає автоматизовані системи комерційного обліку електроенергії, які є частиною більш загального класу автоматизованих систем обліку електроенергії;
- у більш широкому сенсі охоплює автоматизовані системи контролю, обліку та управління енергоспоживанням, що повною мірою розкриває сутність цих систем, створення та впровадження яких розпочалося ще у 70-і роки минулого століття на території колишнього Радянського Союзу.

Історія розвитку АСКОЕ в СРСР та Україні протягом понад півстоліття тісно пов'язана з діяльністю Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» ім. І. Сікорського (НТУ «КПІ») [3]. Науковці кафедри електропостачання КПІ (В. Винославський, А. Праховник,

В. Розен, В. Калінчик, С. Загородний, В. Тарадай, С. Шевчук, С. Гудименко, В. Холявенко та інші) одними з перших розпочали розробку та впровадження систем АСКОЕ на об'єктах електроенергетики та у кінцевих споживачів. Вони також заклали основу науково-методологічних підходів для інформаційного забезпечення задач контролю, обліку та управління режимами споживання електроенергії. На сучасному етапі науковці НТУ «КПІ» продовжують удосконалювати методики управління споживанням електроенергії за допомогою розподілених АСКОЕ, активно впроваджуючи передові енергоефективні рішення в контексті концепції Smart Grid. В кінцевому підсумку це спрямовано на досягнення двох ключових цілей [1, 3]:

- зменшення споживання викопних енергоресурсів;
- зниження негативного впливу на довкілля.

1.2 Якість електричної енергії

Особливу увагу в дослідженнях, присвячених системам електроживлення, займає питання якості електроенергії. Забезпечення високої якості електроенергії є фундаментальним завданням сучасної електротехніки, оскільки стабільне, надійне та якісне електропостачання є критично важливим для функціонування суспільства та економіки [2, 3].

Стандарти якості електроенергії безпосередньо впливають на надійність електропостачання. В умовах сучасного світу, коли підприємства, технології та сервіси дедалі більше залежать від стабільності енергопостачання, дотримання високих показників якості стає особливо важливим. Порушення цих стандартів, такі як коливання напруги, гармонічні спотворення або короткочасні просідання напруги, можуть призвести до суттєвих збоїв у роботі обладнання, економічних втрат, створити потенційну загрозу безпеці.

Технічні збої в електромережах, зумовлені проблемами якості електроенергії, можуть спричинити значні економічні витрати, включаючи

пошкодження обладнання, зниження продуктивності підприємств та зростання витрат на технічне обслуговування. Саме тому стабільний економічний розвиток напряду пов'язаний із забезпеченням надійності та високої якості електропостачання [3].

Вплив стандартів якості електроенергії на функціонування електротехнічного та електронного устаткування є одним із ключових аспектів забезпечення його надійності та довговічності. Недостатній рівень якості електроенергії може призводити до виникнення відмов або пошкоджень високочутливих електронних систем, зокрема комп'ютерної техніки, медичного обладнання, а також промислових верстатів. Більше того, регулярні порушення у стабільності електропостачання здатні суттєво зменшити строк служби таких пристроїв.

Окремо слід підкреслити роль безпеки як невід'ємного елементу якості електроенергії [1, 2]. Зокрема, в критично важливих сферах, таких як комунальна інфраструктура, охорона здоров'я, навіть незначні перебої у подачі електроенергії можуть спричинити надзвичайно небезпечні, а інколи й фатальні наслідки. Саме тому відповідність електроенергії вимогам якості та надійності постачання виступає одним із базових критеріїв у таких умовах.

До основних факторів, що визначають якість електроенергії, належать такі:

- коливання напруги;
- наявність гармонік;
- виникнення перехідних процесів;
- відхилення частоти;
- коефіцієнт потужності;
- рівень електричного шуму.

Колівання напруги (включаючи просідання та стрибки) є однією з найпоширеніших причин погіршення якості електроенергії. Просідання напруги характеризуються короткочасним зниженням її рівня, тоді як стрибки – різким підвищенням. Такі явища можуть призвести до зниження

ефективності роботи електроустаткування, його пошкодження або навіть виходу з ладу.

Гармоніки – це частотні компоненти електричного сигналу, що є цілими кратними основної частоти. Їх наявність може призводити до спотворення форми електричної хвилі, виникнення перегріву обладнання та зниження коефіцієнта потужності. Особливо поширеним джерелом гармонік виступають [1] нелінійні навантаження, такі як перетворювачі частоти та різноманітні електронні пристрої.

Перехідні процеси – це короткочасні високочастотні збурення, які виникають у мережі внаслідок зовнішніх впливів, наприклад, ударів блискавки, перемикачів або запуску потужного обладнання. Такі процеси не лише створюють ризики для стабільності роботи системи, але й можуть спричинити фізичне пошкодження обладнання та навіть пожежі.

Відхилення частоти від номінального значення (50 або 60 Гц) негативно впливають на роботу пристроїв, що потребують точної синхронізації (електронні годинники, окремі типи приводів та системи зв'язку).

Коефіцієнт потужності характеризує ефективність перетворення спожитої електроенергії на корисну роботу [1]. Зниження цього показника веде до нераціонального використання енергоресурсів та зростання експлуатаційних витрат.

Рівень електричного шуму, переважно у вигляді електромагнітних (EMI) або радіочастотних (RFI) завад, може суттєво впливати на функціонування електронних систем і засобів зв'язку [1], призводячи до погіршення якості передачі сигналів, появи помилок у даних та зниження загальної ефективності роботи обладнання.

1.3 Огляд існуючих рішень

Контроль в системах електропостачання охоплює комплекс завдань,

пов'язаних із моніторингом, регулюванням і керуванням параметрами електромережі, включаючи постійний нагляд за рівнем напруги, струму та частоти з метою попередження перевантажень і аварійних ситуацій [2, 3]. Ефективне автоматизоване управління процесами споживання та розподілу електроенергії забезпечується за рахунок впровадження спеціалізованих реле, стабілізаторів, пристроїв на основі мікроконтролерів, що дозволяє оптимізувати функціонування електроенергетичних систем у реальному часі. Особливу роль при цьому відіграють заходи захисту від перевантажень і коротких замикань. Це передбачає використання автоматичних вимикачів, запобіжників, а також стабілізаторів напруги для забезпечення високої надійності та безпеки експлуатації електрообладнання.

Сучасні пристрої для контролю електроживлення, що мають вбудовану підтримку інтернет-технологій, є затребуваними на ринку завдяки розширеному функціоналу. Такі контролери розроблені для комплексного керування електрогенераторними системами та організації дистанційного моніторингу параметрів електромережі через мережу Інтернет [2]. Для реалізації цих можливостей пристрої оснащуються інтерфейсами Ethernet і/або GSM/GPRS-модемами, що дозволяє забезпечити роботу у IP-мережах. Інтернет-шлюзи забезпечують інтеграцію різноманітних контролерів Datakom [4], що функціонують за протоколом MODBUS, а також дають змогу підключати обладнання сторонніх виробників із підтримкою цього протоколу після попередньої інтеграції їхніх таблиць у систему. Безкоштовне програмне забезпечення під ОС Windows забезпечує повний спектр функцій для налаштування, моніторингу та керування контролерами. Також хмарна платформа Rainbow Scada дозволяє здійснювати візуалізацію й контроль за необмеженою кількістю пристроїв у режимі онлайн через браузер комп'ютерів, планшетів або смартфонів.

Сучасні підходи до організації систем моніторингу, обліку та керування електроенергією включають використання енергомоніторів з WiFi-інтерфейсом. Прикладом можуть служити пристрої серії EV-030-140 кВт

(рисунки 1.3) [4]. Зазначене обладнання дає змогу здійснювати облік трифазної активної та реактивної електроенергії як за споживанням, так і за генерацією, а також дистанційно керувати вбудованими реле для активації електрообладнання безпосередньо зі смартфона або за допомогою попередньо визначеного графіка (добового чи тижневого). Додатково пристрій забезпечує захист однофазного і трифазного обладнання від впливу перенапруги, перевищення струму, потужності, температури й частоти, що значно підвищує загальну надійність експлуатації енергетичної системи.



Рисунок 1.3 – Пристрій WiFi-моніторингу EV-030-140 кВт

Цей пристрій також застосовується для організації систем багатотарифного комерційного обліку електроенергії. Він обладнаний енергонезалежним годинником реального часу, що забезпечує підтримку точного багатотарифного обліку, а також дозволяє вимірювати як активну, так і реактивну енергію в обох напрямках – як для споживання, так і для генерації [4]. Окрім цього, пристрій забезпечує вимірювання миттєвих значень основних електричних параметрів, таких як напруга, струм та потужність.

Завдяки інтеграції технології WiFi, пристрій надає можливість

дистанційного керування електрообладнанням незалежно від місцезнаходження користувача – як у режимі реального часу, так і за допомогою попередньо встановлених розкладів через інтерфейс смартфона. Передбачено керування трьома окремими реле, які можуть працювати як синхронно, так і незалежно одне від одного, що дає змогу гнучко автоматизувати роботу електроприладів відповідно до годинних, добових або тижневих сценаріїв.

Крім функцій моніторингу та керування, пристрій виконує роль комплексного захисту одно- та трифазного електрообладнання, здійснюючи постійний контроль величин напруги, струму, потужності й частоти з автоматичним відключенням живлення у разі виходу параметрів за допустимі межі [5]. Дані про контрольовані параметри зберігаються як у внутрішньому флеш-накопичувачі, так і, за наявності підключення до WiFi, у віддаленому хмарному сховищі.

Ще одним рішенням для моніторингу та контролю параметрів електромережі є контролер КМС-Ф1 (рисунок 1.4) [5]. Даний пристрій забезпечує вимірювання та відображення ключових показників однофазної мережі, зокрема діючих значень напруги, струму та частоти першої гармоніки. Контролер-монітор мережі може ефективно застосовуватися як складова вимірювальних систем для контролю та управління технологічними процесами на промислових підприємствах.



Рисунок 1.4 – Пристрій КМС-Ф1

Інноваційний пристрій забезпечує не лише постійний моніторинг стану електромережі, а й оперативне виконання керуючих впливів у разі виникнення аварійних або позаштатних ситуацій [5]. Зокрема, контролер КМС-Ф1 здійснює автоматичне захисне відключення обладнання у випадках, коли зафіксовані чи розраховані параметри електромережі виходять за допустимі межі, при цьому на панелі керування активується відповідний світловий індикатор для швидкої локалізації несправності.

Окрім вищенаведених можливостей, зазначений пристрій реалізує функції обчислення повної, активної та реактивної потужності обладнання, визначення коефіцієнта потужності ($\cos \phi$), підрахунку повної, активної та реактивної енергії. Результати вимірювань, обчислень, а також поточної дати й часу відображаються на вбудованих цифрових індикаторах.

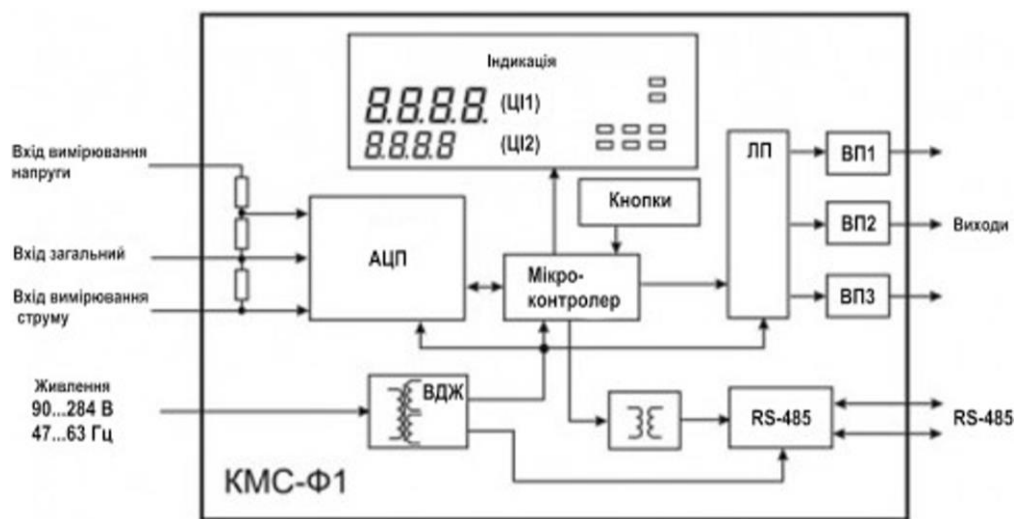


Рисунок 1.5 – Функціональна схема пристрою КМС-Ф1

Додатково контролер дозволяє здійснювати конфігурування та програмування параметрів як за допомогою вбудованої клавіатури, так і через мережу RS-485. Передача виміряних і розрахованих параметрів здійснюється за протоколами Modbus-RTU та Modbus-ASCII через RS-485, що дає змогу інтегрувати пристрій у сучасні автоматизовані системи керування [3]. Підтримується взаємодія із зовнішнім обладнанням через контакти вбудованих вихідних пристроїв, а також перетворення результатів

вимірювань на уніфіковані аналогові сигнали струму або напруги для подальшої обробки.

Окремо слід зазначити можливість як автоматизованого, так і ручного керування вихідними пристроями, а також наявність індикації аварійних ситуацій. Конструкція пристрою включає окремі канали для вимірювання напруги та струму, що підвищує точність і надійність контролю параметрів електромережі.

Функціональна схема пристрою наведена на рисунку 1.5.

Вирішення питань, пов'язаних із якістю електроенергії, вимагає комплексного та системного підходу, який передбачає як запобіжні, так і коригуючі заходи. Існує широкий спектр технічних засобів і методів для забезпечення належної якості електроенергії – від стабілізації напруги та фільтрації гармонік до впровадження систем захисту від перенапруг і оптимізації коефіцієнта потужності. Вибір конкретної стратегії залежить від природи і джерела проблеми, проте загальна концепція підвищення якості електроенергії включає такі ключові напрями [1, 3]:

- регулювання напруги;
- фільтрація гармонік;
- захист від перенапруг;
- контроль частоти;
- корекція коефіцієнта потужності;
- придушення електричних шумів;
- моніторинг та аналітика;
- системи резервування.

Регулювання напруги – це підтримання напруги в межах допустимих значень, яке забезпечується шляхом використання стабілізаторів напруги та пристроїв регулювання напруги під навантаженням у трансформаторах [1]. Це дозволяє суттєво зменшити ризик просідань і стрибків напруги.

Фільтрація гармонік дозволяє мінімізувати негативний вплив гармонічних спотворень у системах електропостачання, для чого

застосовують пасивні, активні та налаштовані фільтри [1, 3]. Такі пристрої забезпечують ефективне зниження рівня гармонік та захист чутливого обладнання.

Використання пристроїв захисту від імпульсних перенапруг (наприклад, пригнічувачів імпульсних перенапруг і грозорозрядників) сприяє запобіганню пошкодженню обладнання під час виникнення короточасних перенапруг за рахунок відведення надлишкової енергії [1, 3].

Для забезпечення стабільності частоти у мережі впроваджують частотні перетворювачі та спеціалізовані пристрої, що дає змогу підтримувати необхідний рівень частоти для обладнання, чутливого до її коливань [1].

Підвищення коефіцієнта потужності досягається шляхом встановлення компенсаційних конденсаторів, що дозволяє балансувати реактивну потужність, зменшувати втрати електроенергії та підвищувати енергоефективність системи розподілу [1, 3].

Зниження впливу електромагнітних і радіочастотних завад досягається шляхом застосування засобів екранування, заземлення та спеціальних фільтрів. Ізоляція чутливого обладнання та забезпечення правильного заземлення мінімізують ризики впливу шуму на його роботу.

Безперервний контроль якості електроенергії за допомогою сучасних аналізаторів і систем моніторингу дозволяє своєчасно виявляти та ідентифікувати порушення, а також оперативно вживати профілактичних або коригуючих заходів для їхнього усунення [2].

Для критично важливих об'єктів доцільним є впровадження резервних систем електропостачання, що гарантує наявність альтернативного джерела живлення у випадку виникнення проблем із основною мережею, забезпечуючи безперервність функціонування ключових технологічних процесів [3].

1.4 Постановка задачі проектування

В кваліфікаційній роботі проводиться проектування пристрою для контролю параметрів електричної мережі, який має забезпечувати оперативну, стабільну та надійну роботу. Особлива увага приділяється ергономічності та інтуїтивній зрозумілості інтерфейсу користувача, що дозволить споживачу у будь-який час отримати інформацію про поточні параметри споживання електроенергії в побутових умовах.

Апаратура рішення базується на мікроконтролері ATmega328P [6], який зарекомендував себе завдяки високій стабільності функціонування, низькому енергоспоживанню, широкій підтримці середовищ розробки та тривалому ресурсу експлуатації. Цей мікроконтролер оптимально підходить для побудови систем моніторингу електромереж у малих і середніх приватних об'єктах, де пріоритетними є надійність, точність, помірна вартість і можливість адаптації до специфічних потреб користувача.

Собівартість проектованого контролера очікується суттєво нижчою у порівнянні з промисловими аналогами, при цьому пристрій забезпечує повний спектр необхідних функцій [2]:

- моніторинг основних електричних параметрів (напруга, струм, рівень споживання);
- накопичення статистичних даних протягом встановленого терміну;
- виявлення та сигналізація про аварійні ситуації,
- реалізація захисного відключення.

Водночас передбачена можливість подальшої модернізації або кастомізації пристрою – наприклад, інтеграція з інтернет-сервісами для організації віддаленого доступу, розширення кількості каналів моніторингу тощо. Завдяки відкритій архітектурі та можливості масштабування, запропонований пристрій за низкою показників може не лише конкурувати із заводськими рішеннями, а й перевищувати їх за співвідношенням ціни та функціональних можливостей.

2 ВИБІР НАПРЯМКУ ТА ЗАСОБІВ РОЗРОБКИ

2.1 Напрямок розробки

На основі проведеного огляду сучасних рішень і визначення задачі проєктування можна сформулювати вимоги до розробки системи моніторингу параметрів електричної мережі [2].

1. Забезпечення високоточної інструментальної бази для вимірювань. Необхідність у прецизійному вимірюванні та реєстрації основних параметрів електричної мережі (зокрема напруги, струму, частоти, наявності гармонік, рівнів споживання) є критично важливою [3]. Саме ці дані становлять фундамент для подальшої стабільної та безпечної роботи електромережі, оскільки функціонування обладнання в умовах коливань або збоїв у енергопостачанні безпосередньо впливає на загальну надійність енергосистеми.

2. Забезпечення безперервної та надійної роботи пристрою контролю. Для реалізації регулярного моніторингу й контролю параметрів електромережі слід впроваджувати технічні рішення, що гарантують стабільне й безвідмовне функціонування контролера [2]. Це передбачає використання перевірених мікроконтролерів (зокрема ATmega328P), а також додаткових джерел живлення (наприклад, резервних батарей або конденсаторів), які дають змогу продовжити або коректно завершити роботу пристрою у разі втрати основного живлення.

3. Інтеграція функцій захисту та аварійного відключення. Захист споживачів є принципово важливим аспектом, оскільки виникнення аварійних ситуацій у мережі може призвести до виходу з ладу електротехнічного обладнання [3]. Впровадження механізмів аварійного відключення, а також можливість незалежного керування групами навантажень (освітлення, побутові прилади тощо) дозволяє суттєво

підвищити рівень безпеки й керованості електричної системи.

4. Організація збору, зберігання та передачі даних про енергоспоживання і параметри мережі [2]. Модуль збору та передачі даних є невід'ємною складовою сучасного контролера, оскільки дає змогу не лише аналізувати пікові навантаження та оптимізувати споживання енергії, а й прогнозувати потенційні несправності, планувати профілактичне обслуговування та підвищувати загальну ефективність і надійність електричної системи житлового чи промислового об'єкта. Крім того, накопичені дані дозволяють формувати графіки енергоспоживання та розраховувати економічну доцільність впроваджених заходів.

5. Впровадження інтернет-технологій для дистанційного моніторингу та керування. Використання апаратних та програмних рішень для організації інтернет-моніторингу відкриває нові можливості для оперативного контролю параметрів мережі в реальному часі з будь-якої точки, де доступний Інтернет [4]. Для підвищення зручності користувача передбачена розробка інтуїтивно зрозумілого інтерфейсу керування у вигляді веб-застосунку чи мобільного додатка, який містить увесь необхідний функціонал для налаштування і моніторингу параметрів електричної мережі.

Для реалізації поставленого завдання доцільно визначити основні етапи:

- розробка принципової електричної схеми пристрою;
- створення програмного забезпечення, яке реалізує необхідний функціонал пристрою;
- розробка інтуїтивно зрозумілого та зручного інтерфейсу для взаємодії з користувачем.

2.2 Засоби розробки апаратної складової пристрою

На сучасному етапі існує широкий вибір інструментів для створення принципових схем, які охоплюють як десктопні платформи (наприклад,

Microsoft Visio), так і численні веб-орієнтовані застосунки (Multisim [7], Tinkercad [8] тощо). Використання веб-застосунків виявляється особливо зручним завдяки відсутності необхідності встановлення програмного забезпечення на комп'ютер, при цьому їх функціональні можливості не поступаються традиційним десктопним рішенням.

Серед сучасних веб-інструментів доцільно виділити платформу Tinkercad (рисунок 2.1), яка є інтуїтивно зрозумілою для користувача, підтримує 3D-моделювання та дає змогу створювати принципові електронні схеми різної складності [8]. Окрім того, Tinkercad дозволяє розробляти програмне забезпечення для створених схем, що забезпечує можливість налаштування роботи пристрою відповідно до вимог проекту.

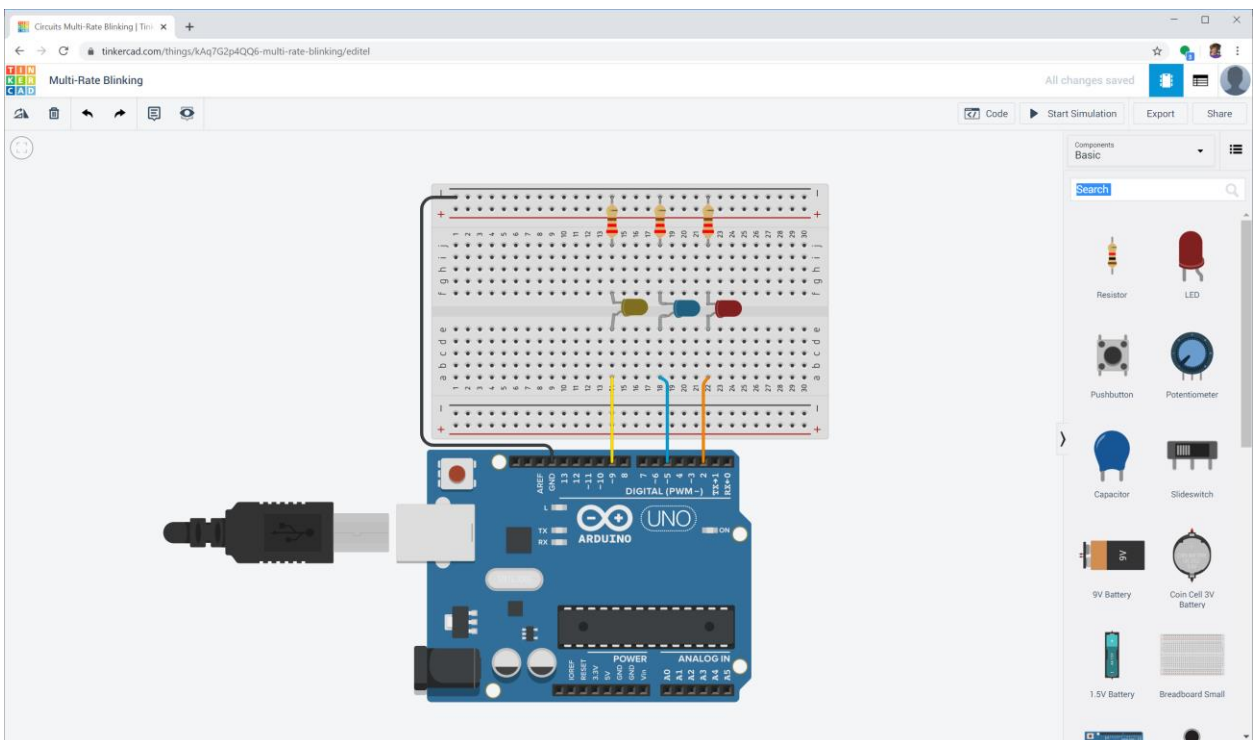


Рисунок 2.1 – Інтерфейс веб-застосунку Tinkercad

У Tinkercad розробка програмного забезпечення зазвичай орієнтується на плату Arduino Uno, побудовану на базі мікроконтролера ATmega328P [6]. Платформа підтримує різноманітні бібліотеки для роботи з периферійними модулями, що дозволяє ефективно інтегрувати, наприклад, рідкокристалічні

дисплеї (LiquidCrystal_I2C.h), інфрачервоні сенсори (IRremote.h) тощо. Завдяки простому інтерфейсу та широкому функціоналу, включно з можливістю кодування, Tinkercad ідеально підходить для розробки та моделювання проєкту в браузері: користувач може змодельовати підключення мікроконтролера, датчиків напруги й струму, модулів зв'язку, реле та інших компонентів, запрограмувати роботу мікроконтролера ATmega328P Arduino-кодом та протестувати функціонування системи у віртуальному середовищі [8].

Альтернативний підхід передбачає використання такого інструменту, як Multisim (рисунок 2.2) [7]. На відміну від Tinkercad, Multisim має десктопну версію з розширеним функціоналом, орієнтованим на моделювання складних промислових електронних схем. Програма надає можливість переглядати графіки зміни електричних величин під час роботи схеми: у веб-версії це реалізується через функцію «Grapher», а у десктопній – шляхом підключення віртуального осцилографа до відповідних вузлів розроблюваної схеми.

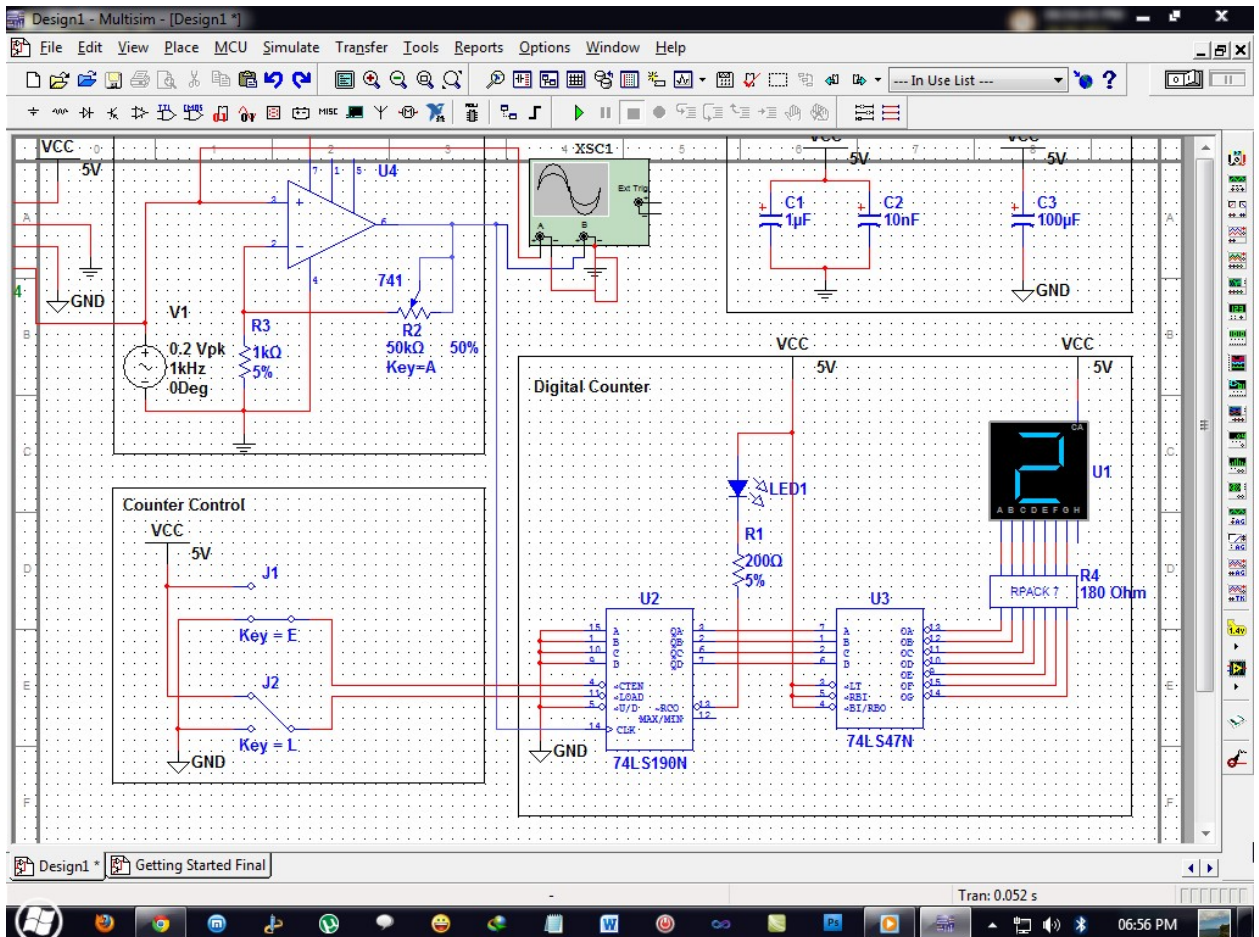


Рисунок 2.2 – Інтерфейс завантажуваної версії застосунку Multisim

Multisim належить до небагатьох програмних продуктів, що ґрунтуються на оригінальному програмному ядрі Berkeley SPICE [7], яке є галузевим стандартом у сфері схемотехнічного моделювання. Програмне забезпечення Multisim представлено як у вигляді десктопної версії, так і у форматі веб-застосунку (рисунок 2.3). Водночас функціональні можливості веб-версії суттєво обмежені, що ускладнює застосування цього інструменту для проєктування складних та великомасштабних електронних схем.

Серед недоліків десктопної версії Multisim варто відзначити комерційну ліцензійну політику, оскільки програма є платною. Хоча розробник передбачає можливість завантаження ознайомлювальної пробної версії, остання, як правило, має обмежений функціонал, що може бути недостатнім для повноцінної розробки й тестування складних проєктів. Враховуючи зазначені обмеження, використання Multisim у ряді випадків

може бути не найоптимальнішим вибором для індивідуальних розробників та невеликих проєктів.

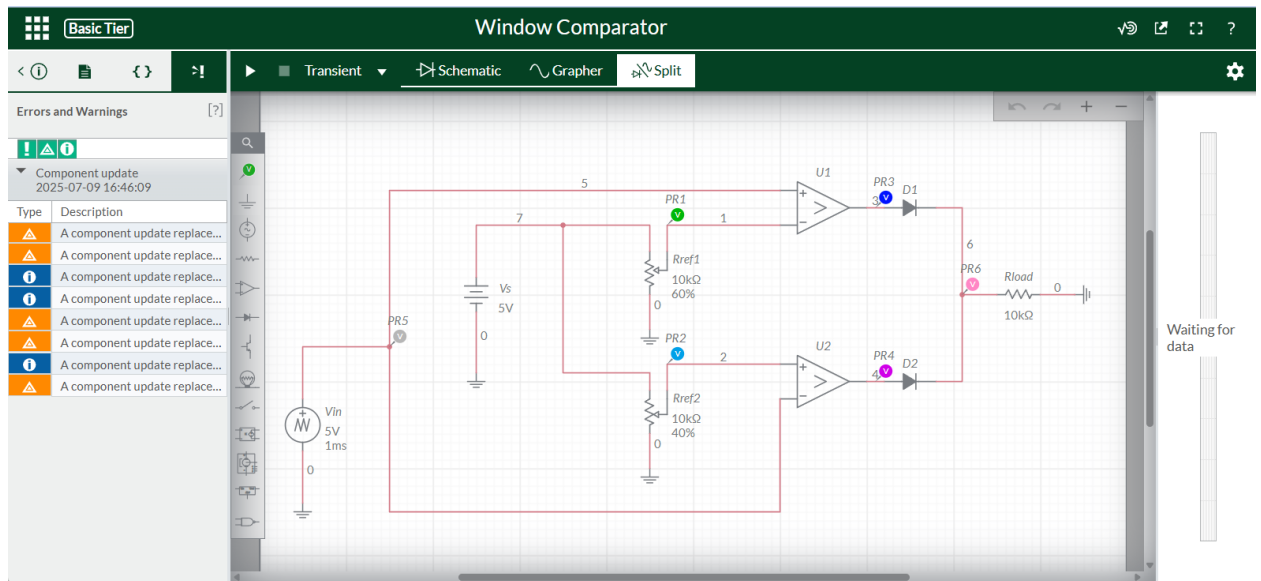


Рисунок 2.3 – Інтерфейс веб-версії застосунку Multisim

Ще одним із можливих інструментів для створення електронних схем є Microsoft Visio – професійне програмне забезпечення, що використовується для розробки блок-схем, діаграм, організаційних структур, технічних креслень і різноманітних системних схем. Хоча Visio не належить до класичних CAD-редакторів, спеціалізованих на схемотехніці, цей інструмент цілком ефективний на етапі побудови логічних та структурних схем майбутнього пристрою. Завдяки широкому набору графічних елементів і можливості створювати індивідуальні компоненти, програма надає розробнику гнучкість у візуалізації принципів електронних схем. До переваг Visio відносять інтуїтивно зрозумілий інтерфейс, багатий набір форматувальних інструментів (наприклад, різні стилі, шрифти для підвищення презентабельності роботи), а також зручність у підготовці проектної документації.

Однак, Visio не є безкоштовною – для використання повного функціоналу необхідно придбати ліцензію. Крім того, програмне забезпечення не призначене для повноцінного моделювання чи верифікації

працездатності електронних схем, як це реалізовано у Tinkercad чи Multisim. Його застосування доцільне насамперед на етапах проєктування та документаційного оформлення.

2.3 Засоби розробки програмного забезпечення

Для реалізації програмного забезпечення пристрою можна використовувати різні мови програмування. Вибір конкретної мови повинен базуватися на її ефективності, відповідності технічним вимогам проєкту та наявності необхідного інструментарію для роботи з апаратною частиною контролера [9]. Серед найпоширеніших мов для розробки вбудованих систем виділяють Python, C#, C++, Assembler, Arduino Language. Вибір мови визначається низкою факторів: рівнем її підтримки сучасними бібліотеками, функціональними можливостями, продуктивністю, актуальністю для задач реального часу, а також особистим досвідом розробника.

Python – це високорівнева мова програмування, що активно застосовується для розробки веб-застосунків, програмного забезпечення, а також у сфері машинного навчання та автоматизації [10]. Популярність Python серед розробників обумовлена простотою синтаксису, ефективністю, мультиплатформністю та зручністю в освоєнні. Python є скриптовою мовою з динамічною типізацією, що дозволяє гнучко працювати з різними типами даних без попереднього оголошення. Інтерпретована природа мови дає можливість оперативно знаходити помилки ще на етапі написання коду, причому повідомлення про помилки зазвичай є інформативними та дозволяють швидко локалізувати джерело проблеми.

Програмне забезпечення, розроблене мовою Python, організовується у вигляді структурованих моделей, які можуть групуватися у логічні пакети [10]. Під час виконання програми є можливість динамічно отримувати інформацію про тип і структуру будь-якого об'єкта, а також доступатися до детальної інформації щодо його внутрішніх атрибутів і властивостей. Python

вирізняється логічним і лаконічним синтаксисом, що робить вихідний код зрозумілим і легко читабельним навіть для початківців. Гнучкість і масштабованість цієї мови дозволяють розробникам адаптувати логіку застосунку під специфічні вимоги, а також розширювати складні програмні продукти за потреби. Як правило, створення програмних рішень на Python здійснюється значно швидше порівняно з багатьма іншими мовами програмування. Python є інтерпретованою мовою, тому написаний код можна виконувати на різних платформах без необхідності компіляції. Окрім того, наявність великої та активної спільноти сприяє оперативному вирішенню складних задач завдяки досвіду і підтримці інших розробників.

Водночас слід враховувати деякі особливості, які можуть виступати недоліками [10]: відносно низька швидкість виконання (у порівнянні з компільованими мовами), підвищені вимоги до апаратних ресурсів, а також залежність від системних бібліотек.

C# [11] є об'єктно-орієнтованою мовою програмування, розробленою компанією Microsoft для створення програмних рішень під платформу .NET. Завдяки цьому розробники мають у розпорядженні широкий спектр бібліотек, інструментів і сервісів для створення потужних та якісних програмних продуктів. C# характеризується низкою важливих переваг [11]:

- є високорівневою мовою, яка вирізняється простотою у вивченні, що забезпечує доступність як для новачків, так і для досвідчених програмістів;
- містить вбудовані механізми безпеки, що підвищує захищеність створюваних застосунків від різноманітних атак та вразливостей;
- підтримує швидку розробку програмного забезпечення, даючи змогу скоротити час написання коду і зменшити кількість помилок;
- надає сучасні інструменти для розробки, такі як IntelliSense і розширені засоби налагодження, що значно полегшує процес програмування;
- забезпечує кросплатформену підтримку, що спрощує створення програм для різних операційних систем (Windows, Linux, macOS);
- має велику, активну спільноту, яка забезпечує доступ до навчальних

матеріалів, прикладів коду та вирішень типових задач.

Як і будь-яка інша мова програмування, C# має свої обмеження. До основних недоліків цієї мови можна віднести наступні аспекти [11]:

- певна залежність від екосистеми Microsoft, зокрема початковий фокус на платформі Windows;
- нижча ефективність виконання програм порівняно з мовами, що компілюються безпосередньо у машинний код;
- використання віртуальної машини CLR (Common Language Runtime), що може призводити до додаткових накладних витрат під час виконання програм;
- C# не є оптимальним вибором для створення програмного забезпечення, розрахованого на пристрої з обмеженими ресурсами або низьким енергоспоживанням.

C++ [12] – це високорівнева мова програмування, яка підтримує кілька парадигм: об'єктно-орієнтовану, узагальнену та процедурну. Вона широко застосовується у системному програмуванні, розробці програмного забезпечення, драйверів, високопродуктивних серверних і клієнтських застосунків, а також у сфері розробки ігор та розважальних програм. C++ суттєво вплинула на формування багатьох сучасних мов програмування, зокрема C# та Java.

Серед ключових переваг мови C++ можна виокремити такі [12]:

- висока швидкість виконання програм, яка майже не поступається продуктивності програм, написаних на мові C;
- масштабованість, що дозволяє створювати застосунки для найрізноманітніших платформ і операційних систем;
- можливість роботи з пам'яттю на низькому рівні, з адресами та портами, що забезпечує гнучкість і контроль (разом з тим, неправильне використання цих можливостей може призводити до серйозних помилок і є потенційним недоліком);
- підтримка створення узагальнених алгоритмів для різних типів

даних, їх спеціалізації та компіляції під час використання шаблонів;

- гнучкість у виборі стилів програмування: C++ підтримує традиційне процедурне програмування, об'єктно-орієнтований підхід, узагальнене програмування та метапрограмування (шаблони, макроси).

Серед основних недоліків мови програмування C++ можна виділити такі [12]:

- висока складність для вивчення та реалізації, що ускладнює освоєння мови для початківців;

- хоча C++ позиціонується як мультипарадигмова мова, фактично вона не забезпечує повноцінної підтримки функціонального програмування;

- обмежена підтримка модульності: підключення зовнішніх інтерфейсів за допомогою препроцесорних директив (наприклад, `#include`) суттєво сповільнює процес компіляції, особливо при роботі з великими проектами, що складаються з багатьох модулів;

- складність виявлення і виправлення помилок: значна кількість можливостей, які порушують типобезпечність, призводить до ризику появи важковловимих помилок у програмному коді.

Мова Асемблер є низькорівневою, машинно-орієнтованою мовою програмування, що дає змогу максимально використовувати апаратні ресурси мікропроцесорних систем. Вона забезпечує доступ до всіх структурних можливостей конкретної архітектури, набору машинних команд, роботи з периферійними пристроями тощо. Асемблер – це символічне відображення машинних команд, що реалізується через мнемонічні позначення. Програмування на асемблері вимагає глибокого розуміння принципів подання і обробки даних на рівні машинних команд, знань систем числення та архітектури мікропроцесорів. Ця мова часто використовується для розробки системного програмного забезпечення, написання драйверів, програмування систем реального часу для управління технологічними процесами, а також для створення рішень, що забезпечують ефективне використання ресурсів МПС (у тому числі в захищеному режимі) [13]. Однак,

попри ефективність, асемблер вважається складною для вивчення та застосування мовою, а також морально застарілою через наявність сучасних більш функціональних і зручних мов програмування, які поєднують зрозумілий синтаксис і широку функціональність.

Мова програмування Arduino, яка базується на C/C++, використовує бібліотеку AVR Libc, що дозволяє застосовувати будь-які її функції [14]. Попри те, що вона ґрунтується на потужній базі C/C++, Arduino вирізняється простотою в освоєнні та є, фактично, одним із найзручніших способів програмування мікроконтролерів на даний час.

З урахуванням проведеного аналізу інструментальних засобів було обрано для розробки та тестування електронної схеми програму Tinkercad. Даний програмний продукт зарекомендував себе як функціональне середовище з широким спектром можливостей, включаючи програмування схем і перевірку їх працездатності у віртуальному середовищі. Мова програмування, що використовується в Tinkercad, заснована на C++, що забезпечує надійність, швидкість та ефективність обробки вхідних даних.

3 ПРОЄКТУВАННЯ ПРИСТРОЮ

3.1 Алгоритм роботи пристрою

В кваліфікаційній роботі здійснюється проєктування пристрою на основі мікроконтролера ATmega328P [6], який здійснює моніторинг мережі електроживлення приміщення.

Відповідно до технічного завдання, пристрій має бути оснащений кнопкою введення, яка дає змогу користувачу обирати один з двох підтримуваних способів комунікації – WiFi або Bluetooth. Логіка роботи кнопки передбачає використання лічильника натискань: залежно від кількості зафіксованих натискань реалізується певний сценарій взаємодії. Зокрема, при одноразовому натисканні кнопки SB2 активується WiFi-модуль, при подвійному – Bluetooth-модуль. При більшій кількості натискань пристрій переводиться у режим налаштувань, у якому можна задати часовий інтервал роботи.

Після вибору відповідного модуля зв'язку мікроконтролер ініціює опитування датчиків струму та напруги. На основі отриманих значень відбувається обробка даних і обчислення поточного рівня енергоспоживання. У разі, якщо зафіксовані показники перевищують встановлені порогові значення, користувачеві відображається відповідне попередження на екрані. Якщо ж параметри перебувають у межах норми, на дисплеї виводиться інформація про штатний режим роботи.

Дані також передаються на обраний модуль зв'язку: якщо це модуль ESP-01 (WiFi), індикація здійснюється блиманням синього світлодіоду, якщо HC-05 (Bluetooth) – зеленого. Після опрацювання сигналів від сенсорів та мікроконтролера, а також виведення відповідної інформації на екран та модулі зв'язку, система переходить у стан очікування із затримкою, що визначається заданим інтервалом часу.

На рисунку 3.1 наведено загальний алгоритм функціонування пристрою.

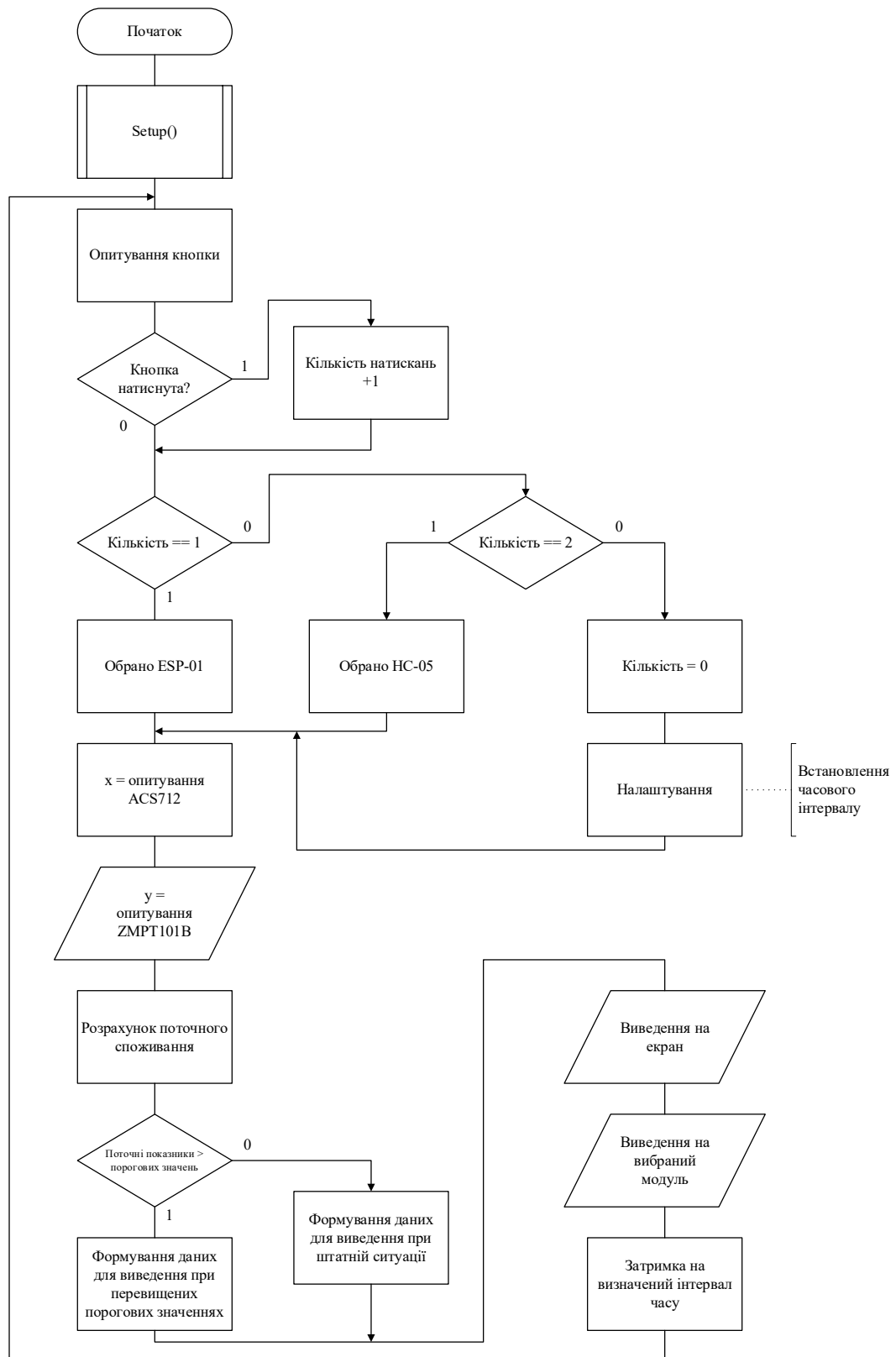


Рисунок 3.1 – Алгоритм функціонування пристрою

3.2 Електрична структурна схема

З урахуванням алгоритму функціонування пристрою розроблено електричну структурну схему (рисунок 3.2), яка є ключовим етапом для цілісного розуміння логіки роботи системи та її компонентів. Розроблена схема містить низку функціональних блоків, кожен з яких виконує певні функціональні задачі, розглянуті нижче.

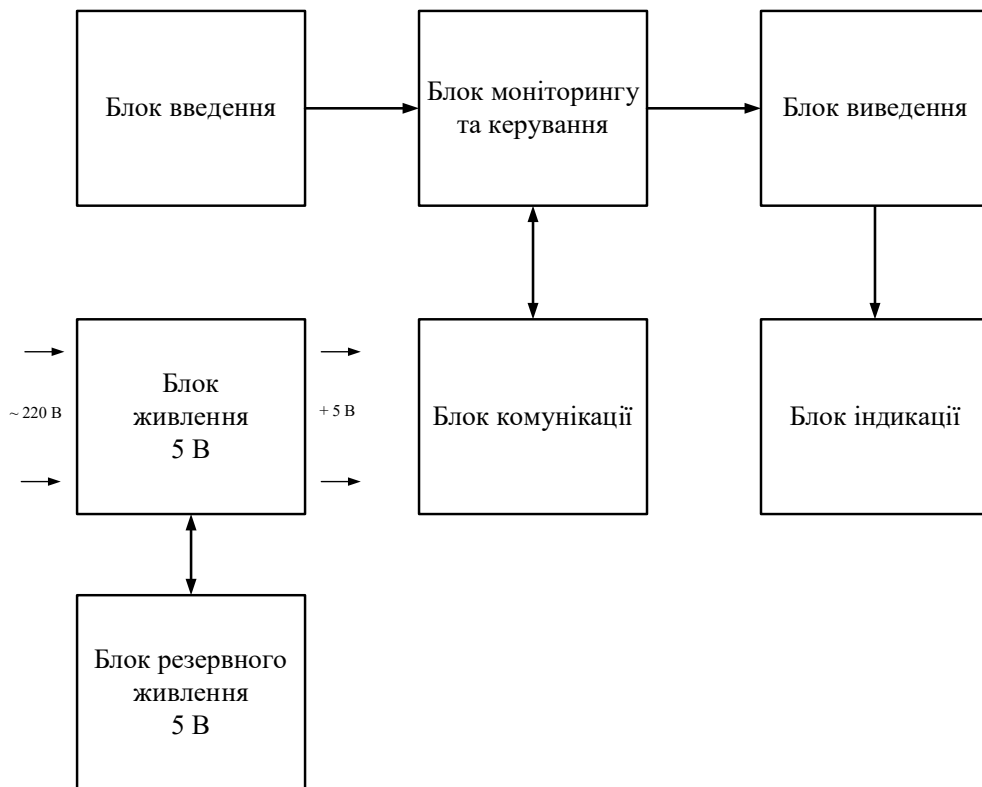


Рисунок 3.2 – Структурна схема пристрою

Блок введення на початковому етапі здійснює опитування кнопки вибору режиму роботи. Пристрій підтримує три режими: перший і другий – це режими вибору способу передавання даних, третій – переведення системи у режим налаштувань.

Блок моніторингу та керування реалізує опитування датчиків струму і напруги, отримані від них сигнали надходять до основного мікроконтролера, який здійснює обробку та розрахунок необхідних параметрів для подальшої

роботи.

Блок виведення відповідає за збереження підготовлених даних у пам'яті мікроконтролера та формування інформації для виведення на екран.

Блок індикації на основі отриманих даних забезпечує їх візуалізацію на LCD-дисплеї, включаючи індикацію обраного режиму роботи та способу передавання інформації.

Блок комунікації забезпечує обмін даними з користувачем через відповідні бездротові інтерфейси (модулі зв'язку).

Блок живлення виконує функцію перетворення мережевої напруги 220 В у стабілізовану напругу 5 В для забезпечення роботи всіх компонентів пристрою.

Блок резервного живлення гарантує безперебійну роботу пристрою у випадку відсутності основного живлення, автоматично підключаючи резервне джерело живлення.

3.3 Вибір елементної бази

В результаті проведеного аналізу проблеми, огляду існуючих рішень, розробки алгоритму функціонування та структурної схеми пристрою визначено перелік електронних компонентів, що використовуються для реалізації даного проєкту.

Arduino – це відкрита апаратно-програмна платформа, яка стала стандартом у сфері розробки простих електронних систем, прототипування автоматизованих пристроїв та робототехніки [9, 14]. Програмування мікроконтролерів на основі Arduino дає змогу як створювати компактні електронні системи та автоматизовані робототехнічні рішення, так і реалізовувати масштабні автономні проєкти, наприклад, концепції «розумного будинку». Попри хибне уявлення про мову Arduino як мову для простих задач, за умови належного рівня знань вона дозволяє створювати високофункціональні та складні електронні системи [15].

Вибір апаратної платформи має забезпечити стабільну і коректну роботу всієї системи. Потрібен ретельний аналіз вимог проекту для відбору лише тих елементів, які оптимально відповідають поставленим завданням.

Основою апаратної платформи пристрою є мікроконтролер ATmega328P (рисунок 3.3). Він є представником сімейства megaAVR компанії Atmel (нині Microchip). Серед основних технічних характеристик ATmega328P можна відзначити такі [6]:

- тактова частота: від 0 до 20 МГц;
- об'єм Flash-пам'яті: 32 кБ;
- об'єм оперативної пам'яті SRAM: 2 кБ;
- об'єм енергонезалежної пам'яті EEPROM: 1 кБ;
- діапазон робочої напруги: 1,8 – 5,5 В;
- споживаний струм у робочому режимі: 0,2 мА (1 МГц, 1,8 В);
- споживаний струм у режимі сну: 0,75 мкА (1 МГц, 1,8 В);
- таймери/лічильники: два восьмибітних і один шістнадцятибітний;
- загальна кількість портів введення/виведення: 23;
- кількість PWM-виходів: 6;
- кількість каналів АЦП (аналогових входів): 6;
- наявність апаратного USART (Serial): 1;
- наявність апаратного SPI: 1 (Master/Slave);
- наявність апаратного I²C/SPI: 1;
- роздільна здатність АЦП: 10 біт.

Конструкцією передбачено захист від короткого замикання на виході.



Рисунок 3.4 – Блок живлення HLK-PM01

Цей модуль може застосовуватися як джерело живлення для електроніки з невеликим енергоспоживанням, у тому числі для вбудованих сенсорів, модулів систем розумного будинку тощо, які працюють від напруги 5 В. Основні технічні характеристики HLK-PM01 [16]:

- вхідна напруга: 100 – 240 В (AC);
- вихідна напруга: 5 В (DC);
- вихідний струм: до 600 мА;
- робочий температурний діапазон: від -20°C до $+60^{\circ}\text{C}$;
- вага: 18 г;
- габаритні розміри: $34 \times 20 \times 15$ мм.

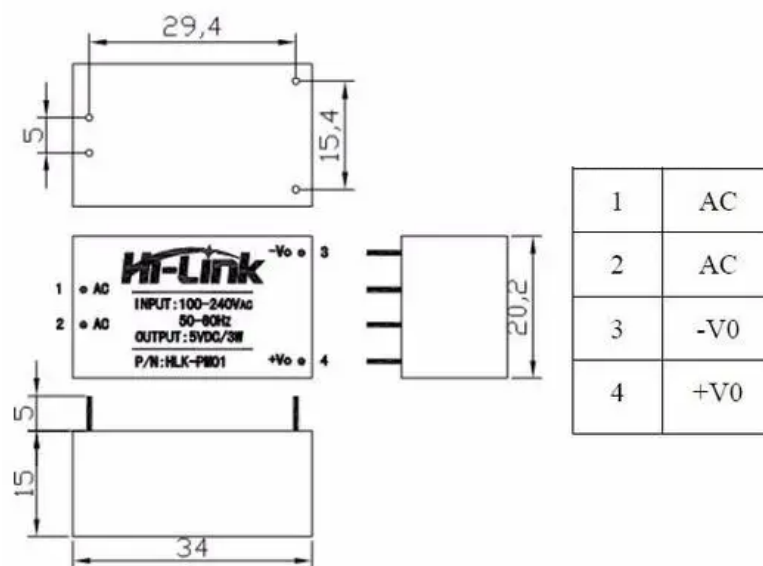


Рисунок 3.5 – Розміри корпусу блоку живлення

Для підвищення напруги використовується імпульсний підвищувальний перетворювач MT3608 (рисунок 3.6), який дозволяє отримувати вихідну напругу до 28 В при струмі навантаження до 2 А з низьковольтного джерела. На платі перетворювача передбачений регулятор для встановлення бажаного рівня вихідної напруги.

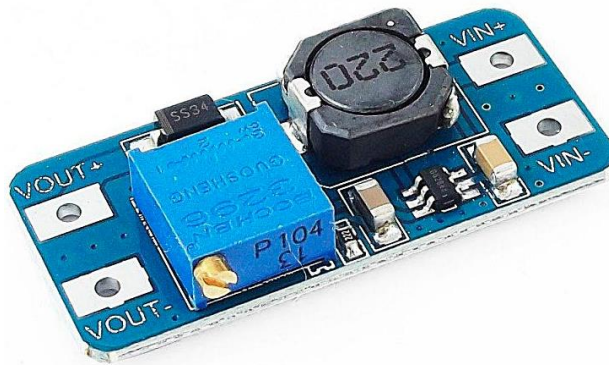


Рисунок 3.6 – Підвищуючий імпульсний перетворювач напруги

В якості джерела живлення для пристрою можуть використовуватися сонячна батарея, мобільний зовнішній акумулятор або мережевий блок живлення AC/DC з діапазоном вихідної напруги 2 – 24 В. Основні характеристики підвищуючого імпульсного перетворювача напруги такі [17]:

- максимальний вихідний струм: 2 А;
- вхідна напруга: 2 – 24 В;
- максимальна вихідна напруга: 28 В;
- ККД: до 93%;
- габаритні розміри: 36 × 17 × 14 мм.

Для забезпечення безперебійної роботи системи у випадку зникнення основного електроживлення необхідне впровадження резервного джерела живлення. З цією метою застосовується літій-іонний акумулятор формату 18650 (рисунок 3.7), який широко використовується у пристроях із підвищеними вимогами до потужності. Цей акумулятор відзначається

високою ємністю, компактністю та універсальністю застосування.



Рисунок 3.7 – Літій-іонний акумулятор 18650

Основні технічні характеристики акумулятора формату 18650 [18]:

- номінальна ємність: 3800 мА·год;
- мінімальна ємність: 3650 мА·год;
- мінімальна робоча напруга: 2,5 В;
- номінальна напруга: 3,6 В;
- максимальна напруга: 4,2 В;
- максимальний струм розряду при постійному навантаженні: 10 А;
- максимальний струм розряду при короткочасному навантаженні: 12,5 А;
- струм розряду при стандартній зарядці: 1,5 А;
- струм розряду при швидкій зарядці: 2 А;
- внутрішній опір: близько 17 мОм (АС, 1 кГц);
- маса: 49 г;
- габарити: 18,3 × 69,6 мм.

Для організації процесу заряджання акумулятора обрано зарядний модуль TP4056 (рисунок 3.8), що вирізняється своєю ефективністю, надійністю та актуальністю для сучасних електронних систем [19]. Модуль базується на інтегральній мікросхемі TP4056 – високоточному лінійному контролері заряду, який реалізує оптимальний алгоритм зарядки за принципом сталого струму/сталої напруги (CC/CV).

Модуль підтримує вхідну напругу у діапазоні 4,0 – 8,0 В (стандартно – 5 В через Micro-USB) і забезпечує зарядний струм до 1 А, що дозволяє ефективно заряджати одноелементні літій-іонні акумулятори (3,7 В) ємністю

від 1000 мА·год [19]. Особливістю даного рішення є наявність вбудованої схеми захисту, яка забезпечує багаторівневий захист акумулятора: від перезаряду, глибокого розряду та короткого замикання, що суттєво підвищує рівень безпеки експлуатації як самого акумулятора, так і цілого електронного пристрою.

Для зручності користувача модуль оснащено світлодіодними індикаторами, які дають змогу в реальному часі відстежувати статус процесу зарядки. Компактні габарити та простота підключення забезпечують легку інтеграцію модуля TP4056 до складу електронних систем будь-якої складності.

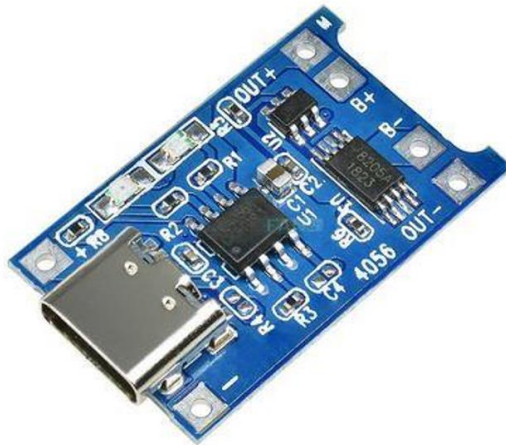


Рисунок 3.8 – Зарядний модуль TP4056 Type-C

Основні технічні характеристики зарядного модуля TP4056 [19]:

- основна мікросхема: TP4056 (лінійний контролер заряду);
- мікросхема захисту: DW01A + 8205A (захист реалізований у відповідних версіях модуля);
- діапазон вхідної напруги: 4,0 – 8,0 В (оптимально 5 В) постійного струму;
- вихідна напруга заряду: 4,2 В із точністю $\pm 1,5\%$ (відповідає стандарту для Li-ion акумуляторів);
- максимальний зарядний струм: до 1 А (регулюється відповідно до

вимог);

- алгоритм заряджання: поетапний – спочатку постійний струм, далі постійна напруга (CC/CV);

- точність регулювання вихідної напруги: $\pm 1,5\%$;

- захист від перезаряду: активація при напрузі $> 4,2$ В;

- захист від глибокого розряду: спрацьовує при напрузі $< 2,5 - 2,9$ В (залежно від моделі модуля);

- захист від короткого замикання: інтегрований у конструкцію;

- захист від перевищення струму: типовий поріг спрацювання – 3 А;

- індикація статусу заряджання: червоний світлодіод – активний процес зарядки; синій/зелений – акумулятор повністю заряджено;

- автоматичне завершення заряджання: процес зупиняється, коли струм заряду зменшується до 10% від встановленого номіналу;

- вхідний інтерфейс: USB Type-C;

- тип підтримуваних акумуляторів: одноелементні літій-іонні/літій-полімерні 3,7 В;

- рекомендована ємність акумуляторів: від 1000 мА·год;

- робочий температурний діапазон: від -10°C до $+85^{\circ}\text{C}$;

- габарити модуля: приблизно $25 \times 19 \times 10$ мм (залежить від конкретної версії);

- маса: близько 2,5 г;

- власний споживаний струм: менше 10 мкА у стані очікування (без навантаження).

Для забезпечення можливості вимірювання основних електричних параметрів мережі необхідно застосовувати відповідні сенсори та вимірювальні модулі. Зокрема, для контролю струму доцільно використовувати датчик ACS712 (рисунок 3.9).

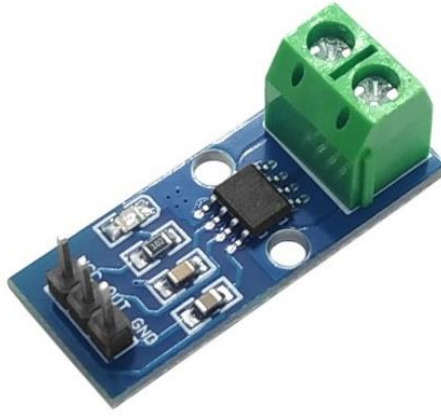


Рисунок 3.9 – Датчик струму ACS712

Датчик струму ACS712 (на струм до 30 А) є надійним та високоточним електронним сенсором, призначеним для вимірювання сили струму в різноманітних електричних колах і пристроях [20]. Сенсор використовує ефект Холла, що забезпечує прецизійне та безпечне вимірювання струму, сприяючи ефективній роботі електронного обладнання.

Завдяки здатності вимірювати струми до 30 ампер, ACS712 знаходить застосування у промислових, енергетичних системах, а також у побутових пристроях, де важливою є точність та надійність визначення струму. Пристрій відзначається високою чутливістю й точністю вимірювань, що особливо важливо для критичних застосувань.

Датчик функціонує при живленні 5 В і підключається до аналогового входу мікроконтролера, формуючи на виході напругу, пропорційну вимірюваному струму – з розрахунку 66 мВ на 1 А (наприклад, при напрузі на виході 132 мВ через сенсор протікає струм 2 А). Датчик здатний здійснювати як вимірювання прямого, так і зворотного струму (від 0 до 30 А або від 0 до –30 А залежно від схеми підключення).

При роботі з вимірюванням змінного струму важливо враховувати, що значення струму коливатимуться в залежності від фази синусоїдального сигналу, тому для точного визначення слід проводити вимірювання у пікових точках синусоїди.

Основні характеристики ACS712 [20]:

- діапазон вимірювання: $-30 \dots +30$ А;
- точність вимірювання: 1,5%;
- вихідна напруга при нульовому струмі: 2,5 В;
- коефіцієнт передачі: 100 мВ/А;
- робоча напруга живлення: 5 В.

Функціональна схема сенсора наведена на рисунку 3.10:

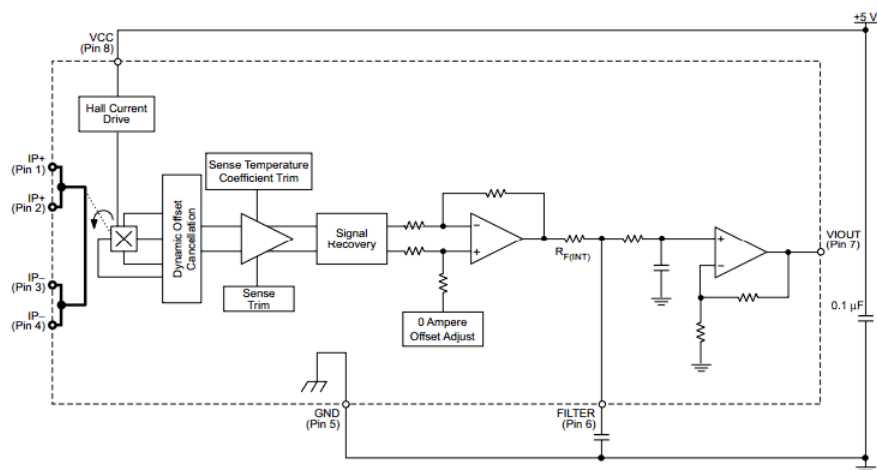


Рисунок 3.10 – Функціональна схема ACS712

Для здійснення вимірювання напруги в системі доцільно використовувати спеціалізований модуль на основі трансформатора напруги, наприклад, ZMPT101B (рисунок 3.11), який формує аналоговий сигнал, пропорційний величині вхідної напруги [21].



Рисунок 3.11 – Модуль ZMPT101B

ZMPT101B є високоточним сенсором змінної напруги, що побудований на прецизійному трансформаторі з коефіцієнтом трансформації 1:1. Вихідний аналоговий сигнал даного модуля може бути безпосередньо підключений до входу АЦП мікроконтролера для подальшої цифрової обробки.

Цей модуль характеризується високою точністю, стабільністю вимірювань напруги в діапазоні до 250 В та потужності. Конструкцією передбачено багатооборотний потенціометр для тонкого налаштування (калібрування) вихідного сигналу для АЦП.

Основні технічні характеристики ZMPT101B [21]:

- вихідна напруга: аналогова, у діапазоні 0–5 В;
- робочий температурний діапазон: від -40°C до $+70^{\circ}\text{C}$;
- елементна база: мікросхема ZMPT101B;
- діапазон вимірюваної напруги: 195–250 В; живлення модуля: 4–12 В;
- габаритні розміри: $50 \times 19 \times 20$ мм;
- споживаний струм: до 2 мА.

Схема підключення даного модуля до плати Arduino представлена на рисунку 3.12.

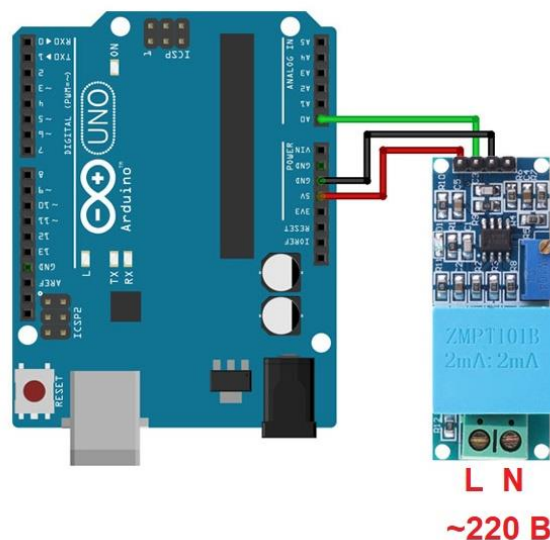


Рисунок 3.12 – Підключення ZMPT101B до плати Arduino

У разі впровадження WiFi-технологій доцільно використати

комунікаційний модуль ESP8266 (рисунок 3.13) [22], який забезпечить передачу даних на віддалений сервер або у мобільний застосунок.

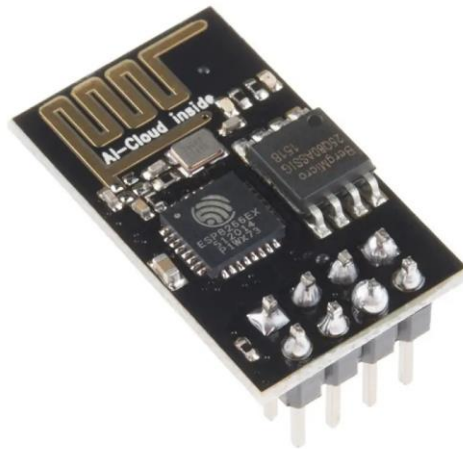


Рисунок 3.13 – WiFi-модуль ESP-01

WiFi-модуль ESP8266 ESP-01 є однією з найпопулярніших версій у серії модулів ESP і широко використовується в різноманітних IoT-проектах, зокрема у «розумних» розетках, mesh-мережах, IP-камерах, бездротових сенсорах, носимій електроніці тощо. Основні відмінності плат цієї серії полягають у кількості портів введення/виведення, обсязі FLASH-пам'яті та типі конекторів.

Живлення ESP-01 здійснюється від зовнішніх джерел або безпосередньо від плати Arduino чи іншого мікроконтролера. Рекомендована напруга живлення модуля становить 3,3 В. Наявність живлення індикується світлодіодом PWR, підключеним до живильної шини, а світлодіод D0 сигналізує про передачу даних через інтерфейс UART.

Основні характеристики ESP8266 ESP-01 [22]:

- основна мікросхема: ESP8266EX;
- робоча напруга живлення: 2,5 – 3,6 В;
- максимальний споживаний струм: до 215 мА;
- інтегрований стек TCP/IP;
- управління здійснюється через AT-команди;

- максимальна відстань передачі даних: до 100 м;
- робочий температурний діапазон: $-40^{\circ}\text{C} \dots +125^{\circ}\text{C}$;
- габарити: $24,5 \times 14$ мм.

Для організації локального бездротового керування та моніторингу також доцільно застосовувати Bluetooth-модуль HC-05 (рисунок 3.14).



Рисунок 3.14 – Модуль HC-05

Основні технічні характеристики Bluetooth-модуля HC-05 [23]:

- стандарт протоколу: Bluetooth Specification v2.0 + EDR;
- модуляція сигналу: GFSK (Gaussian Frequency Shift Keying);
- потужність передавача: ≤ 4 dBm, клас 2;
- чутливість приймача: ≤ -84 dBm при 0,1% BER;
- швидкість передачі: асинхронна – до 2,1 Мбіт/с (максимум) / 160 кбіт/с, синхронна – 1 Мбіт/с (прийом/передача);
- захист: підтримка автентифікації та шифрування;
- профіль: Bluetooth Serial Port Profile (SPP);
- робоча напруга: +5 В постійного струму, споживаний струм – 50 мА;
- діапазон робочих температур: $-20 \dots +75^{\circ}\text{C}$;
- габарити: $26,9 \times 13 \times 2,2$ мм.

Стандартна схема підключення модуля HC-05 до плати Arduino UNO на базі мікроконтролера ATmega328P наведена на рисунку 2.13:

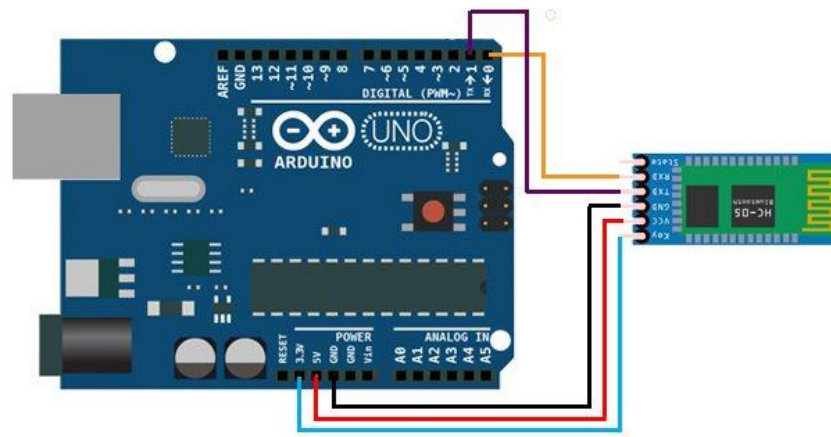


Рисунок 3.15 – Підключення модуля HC-05 до плати Arduino UNO

Для реалізації функції налаштування пристрою – зокрема вибору модуля зв'язку чи зміни параметрів у режимі конфігурації – у схемі використовуються кнопки (на схемі позначені як SB), що підключаються до цифрових портів введення/виведення мікроконтролера.

Існує два основних підходи до підключення кнопки до плати Arduino [15]:

- на цифровому вході за замовчуванням підтримується високий рівень напруги (+5 В), і відповідно мікроконтролер фіксує логічну одиницю до моменту натискання кнопки, після чого на вхід подається нульовий потенціал (логічний нуль);
- на вході підтримується низький потенціал, а при натисканні кнопки подається високий рівень напруги, тобто зчитується логічний нуль у стані спокою та логічна одиниця при активації.

У наведених схемах використовується підтягувальний резистор (pull-up resistor), призначений для встановлення визначеного потенціалу на вході Arduino до моменту натискання кнопки. Відсутність такого резистора призводить до нестабільного стану входу, оскільки рівень напруги може змінюватися під впливом електромагнітних завад, що ускладнює точне зчитування сигналу. Значення резистора обирається залежно від необхідної швидкодії, для даного проекту доцільно використовувати резистор

номіналом 10 кОм.

Оскільки кнопка є механічним елементом, під час її натискання виникає явище, відоме як «брязкіт контактів» – короткочасне багаторазове змикання й розмикання контактів через їхню механічну інерцію. Цей процес може тривати декілька мілісекунд, унаслідок чого при зчитуванні сигналу мікроконтролером можуть фіксуватися кілька хибних натискань, що призводить до помилок у роботі системи.

Для усунення цього ефекту у проєкті передбачене використання програмного методу боротьби з брязкотом контактів: після першого фіксування спрацювання кнопки програмно встановлюється коротка затримка (debounce delay), яка дозволяє ігнорувати подальші коливання контактів до завершення цього інтервалу.

Для індикації стану системи та організації елементів керування доцільно використовувати світлодіоди, які відображають поточний статус пристрою. Для відображення параметрів у реальному часі (наприклад, струму, напруги, стану живлення) застосовано рідкокристалічний дисплей LCD I2C 16x2 (рисунок 3.16) [24].

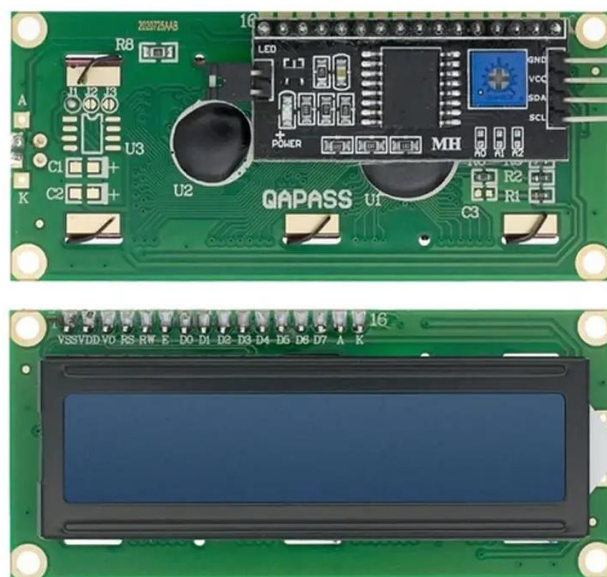


Рисунок 3.16 – LCD-дисплей 16x2 з I²C модулем

LCD 1602 із вбудованим I²C адаптером є універсальним символьним

рідкокристалічним дисплеєм, що дозволяє виводити до 16 символів у два рядки. Завдяки інтегрованому I²C-інтерфейсу, підключення до Arduino чи іншого мікроконтролера здійснюється за допомогою лише чотирьох проводів, що значно спрощує монтаж, скорочує кількість необхідних цифрових входів/виходів та оптимізує простір на платі.

Дисплей має регулювання яскравості підсвічування та контрастності, що забезпечує оптимальну видимість у різних умовах освітлення. Завдяки такій гнучкості модуль ідеально підходить для застосування у найрізноманітніших DIY-проектах – від метеостанцій та годинників до систем автоматизації, розумних пристроїв і робототехніки. За допомогою спеціалізованих бібліотек можна виводити як латиницю, так і кирилицю, а також створювати власні символи для відображення на дисплеї.

Основні технічні характеристики LCD 1602 з I²C [24]:

- тип дисплея: символний рідкокристалічний (LCD);
- розмітка: 16 символів × 2 рядки;
- розмір символу: 5 × 8 пікселів;
- інтерфейс: I2C (ІС), адаптер на мікросхемі PCF8574;
- типові I2C-адреси: 0x27 або 0x3F (визначаються автоматично);
- напруга живлення: 5 В (деякі версії адаптера сумісні з 3,3 В);
- колір підсвічування: синій з білими символами (існують модифікації із зеленим підсвічуванням);
- регулювання контрастності: за допомогою потенціометра на адаптері;
- регулювання підсвічування: програмно через I2C-команди;
- пам'ять для користувачьких символів: до 8 символів розміром 5 × 8 пікселів (CG RAM);
- контролер дисплея: HD44780 або сумісний;
- підтримка кирилиці: реалізується з використанням додаткових бібліотек (наприклад, LCD_1602_RUS_ALL);
- сумісність: Arduino, Raspberry Pi, ESP8266, ESP32, STM32 та інші

платформи із підтримкою I2C;

- робочий температурний діапазон: $-20^{\circ}\text{C} \dots +70^{\circ}\text{C}$;
- розміри модуля: близько $80 \times 36 \times 15$ мм.

Важливою складовою надійності системи є наявність елементів електричного захисту. Для захисту від перенапруги і коротких замикань застосовуються запобіжники та варистори, а для захисту електроніки від індуктивних імпульсів при роботі реле – захисні діоди.

3.4 Електрична принципова схема

Електрична принципова схема пристрою наведена в додатку Б. Під час подачі живлення від основної електромережі (220 В), імпульсний блок живлення HLK-PM01 здійснює перетворення змінної напруги 220 В у стабілізовану постійну напругу 5 В. Ця напруга забезпечує живлення усіх основних компонентів системи: мікроконтролера ATmega328P, модуля WiFi ESP-01, Bluetooth-модуля HC-05, рідкокристалічного дисплея LCD I2C 16×2, а також інших елементів, які функціонують від 5 В.

Одночасно із цим зарядний модуль DD1 (TP4056) отримує живлення від джерела DA1 (HLK-PM01) через вхід IT+, підключений до лінії +5 В, або безпосередньо через роз'єм XS1 (microUSB Type-C) у випадку використання останнього як основного джерела живлення для заряджання. Модуль TP4056 автоматично ініціює процес зарядки резервного акумулятора GB1 (18650) через виходи V+ і V-, якщо виявляє, що батарея розряджена.

Після зарядного модуля напруга подається на підвищуючий перетворювач U1 (MT3608), який стабілізує вихідну напругу 5 В для живлення мікроконтролера й решти функціональних модулів, незалежно від того, яке джерело живлення використовується в даний момент (мережа або акумулятор).

У разі зникнення напруги в основній мережі, система автоматично перемикається на резервне живлення від акумулятора. Це відбувається

безперервно завдяки реалізованій у модулі DD1 функції Power Path Management. На виході схеми живлення встановлені діоди Шоттки VD2 та VD3, які забезпечують вибір джерела живлення: якщо напруга мережі присутня, діод VD2 блокується і живлення здійснюється виключно від блока HLK-PM01; за відсутності напруги у мережі відкривається діод VD3, і живлення пристрою здійснюється від акумулятора.

Після подачі живлення ініціюється автоматичний запуск і конфігурування мікроконтролера DD3 (ATmega328P), що супроводжується послідовною ініціалізацією усіх підключених зовнішніх пристроїв:

- здійснюється ініціалізація HG1 (LCD I²C 16x2), на якому відображається інформація про запуск системи та її поточний статус;
- сенсори струму та напруги B1 (ACS712) і B2 (ZMPT101B) проходять етап калібрування та підготовки до зчитування даних;
- після подачі живлення вбудований мікроконтролер ESP8266 у складі модуля DD2 (ESP-01) починає виконання власної прошивки (AT-прошивки), оскільки використовується як модем для зв'язку з ATmega328P;
- модуль DD4 (HC-05) отримує стабілізовану напругу 5 В, проте для власної роботи використовує напругу 3,3 В; після подачі живлення проходить етап самотестування.

Після завершення етапу ініціалізації система переходить у робочий режим, де реалізуються такі функції:

- комунікація між ATmega328P та ESP-01;
- комунікація між ATmega328P та HC-05;
- опитування датчиків;
- відображення інформації.

Взаємодія між ATmega328P та ESP-01 відбувається через послідовний інтерфейс UART. ATmega328P передає модулю ESP-01 AT-команди та дані (зокрема, показники струму й напруги з відповідних датчиків), а ESP-01 здійснює передачу отриманих даних на віддалений сервер або у локальну мережу. Обмін інформацією організовано через лінії TX та RX.

Для Bluetooth-зв'язку ATmega328P налаштовує відповідний UART (апаратний або програмний) із типовою швидкістю 9600 бод. Після встановлення з'єднання мікроконтролер може приймати та передавати команди, а також надсилати дані з датчиків на мобільний пристрій через модуль HC-05.

З інтервалом в 1 секунду мікроконтролер знімає показники з ACS712 і ZMPT101B, розраховує поточне енергоспоживання (потужність), аналізує відхилення від порогових значень (наприклад, виявлення перевантаження, різких стрибків струму тощо).

ATmega328P виводить ключову інформацію (напруга, струм, потужність) на дисплей HG1.

З огляду на те, що обидва комунікаційні модулі (ESP-01 та HC-05) підключаються до одного апаратного інтерфейсу UART (виводи RX/PD0 та TX/PD1), виникає ймовірність конфлікту при одночасній передачі даних. Для вирішення цієї проблеми до схеми додано транзисторні ключі (VT1 і VT2 типу n-p-n), які дозволяють вибірково подавати живлення лише на той модуль зв'язку, який необхідний у поточному режимі. Керування цими ключами здійснюється з вільних виходів мікроконтролера, а схема доповнена резисторами для обмеження струму. Перемикання між режимами зв'язку здійснюється за допомогою кнопки SB2: одноразове натискання активує ESP-01, подвійне натискання – HC-05, потрійне – переводить пристрій у режим налаштування.

У режимі налаштування користувач отримує можливість модифікувати низку ключових параметрів пристрою:

- вибір основного каналу передачі даних. Даний параметр дозволяє визначити, через який комунікаційний модуль (ESP-01 або HC-05) буде здійснюватися передача даних за замовчуванням. За необхідності можливе використання режиму «автовибір», який забезпечує автоматичне перемикання залежно від наявності зв'язку;

- зміна інтервалу оновлення даних. Користувач може регулювати

частоту опитування сенсорів і передачі показників у системі. Значення інтервалу можуть бути встановлені, наприклад, у 5, 10 або 30 секунд. Для налаштування даного параметра використовується кнопка SB3;

- відображення дати та часу. У цьому розділі можна встановити поточні дату і час вручну або синхронізувати їх автоматично. Це дозволяє формувати точну історію виміряних показників;

- вихід із режиму налаштування. Повертає пристрій у штатний робочий режим із збереженням усіх нових налаштувань.

Для здійснення апаратного перезавантаження або скидання налаштувань пристрою використовується окрема кнопка SB1.

ВИСНОВКИ

У уваліфікаційній роботі реалізовано пристрій моніторингу електроживлення приміщення, який базується на мікроконтролері ATmega328P.

В процесі виконання роботи розглянуто як основні теоретичні, так і практичні аспекти створення автоматизованих систем моніторингу та керування електроспоживанням. На основі проведеного аналізу визначено головні проблеми сучасних побутових електромереж, зокрема, підвищення вимог до енергоефективності, надійності та безпеки, а також необхідність впровадження смарт-технологій для дистанційного моніторингу та керування електроспоживанням.

Для розробки було обрано середовище Tinkercad, що дозволило не лише створити робочу модель пристрою, але й відтестувати її основні функції безпосередньо в онлайн-режимі.

Вибір апаратних компонентів дозволив реалізувати систему, що забезпечує вимірювання основних параметрів електромережі (струм, напруга), індикацію режимів роботи, автоматичне реагування на аварійні ситуації, а також гнучке налаштування режимів опитування датчиків і способу передачі даних (WiFi або Bluetooth). Передбачена програмна логіка забезпечує зручний інтерфейс для користувача, можливість оперативної зміни налаштувань, а також візуалізацію інформації на LCD-дисплеї й передавання даних у зовнішні системи.

Розроблений пристрій вирізняється низькою собівартістю, універсальністю застосування, простотою в експлуатації й адаптацією до специфічних вимог користувача. За результатами моделювання було підтверджено коректність роботи основних алгоритмів, а також відповідність функціоналу поставленим завданням проєктування.

Впровадження подібних контролерів у побутових умовах сприяє

підвищенню енергоефективності житла, забезпеченню безпеки електроспоживання, запобіганню аварійним ситуаціям та оптимізації витрат на енергоресурси. Перспективами подальшої роботи є розширення функціоналу системи, зокрема, інтеграція із хмарними сервісами, додатковими датчиками, надання можливостей аналітики та віддаленого керування.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. O'Driscoll E. Industrial Power and Energy Metering – a state-of-the-art review : Journal of Cleaner Production. – 2013. – Vol. 41. – P. 53–64.
2. Picot Y. P., Bellamy P. Definition and Implementation of an Energy Metering Plans for Energy Efficiency : Eng. and Tech. J. – Apr. 2023. – Vol. 8, № 4. – P. 2130–2137.
3. Кошар О. В. Автоматизовані системи контролю, обліку та управління енергоспоживанням [електронне видання] : навч. посіб. / О. В. Кошар. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського ; Дніпро : Середняк Т. К., 2017. – 44 с.
4. Wi-Fi енергомоніторинг EV-030-140 кВт [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.bakler.com.ua/product/wi-fi-energy-monitoring-ev-030-140-kw/> (дата звернення: 11.06.2025).
5. КМС-Ф1 контролер-монітор мережі [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://aqteck.ua/ua/vumiryuvachi-regulatory/kms-fl-kontroler-monitor-merezhi> (дата звернення: 12.06.2025).
6. Мікроконтролер ATmega328 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://diylab.com.ua/p64493856-mikrokontroler-atmega328.html> (дата звернення: 20.06.2025).
7. Multisim Software Options [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://surl.li/ggdqgk> (дата звернення: 13.06.2025).
8. Tinkercad [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.tinkercad.com> (дата звернення: 13.06.2025).
9. Програмування Arduino [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://doc.arduino.ua/ru/prog/> (дата звернення: 18.06.2025).
10. Що таке мова програмування Python? [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://surl.li/kmssso> (дата звернення: 14.06.2025).
11. Introduction to C#: definition and utilities [Електронний ресурс]. –

Режим доступу: <https://www.mytaskpanel.com/introduction-to-csharp/> (дата звернення: 15.06.2025).

12. Переваги та недоліки C++ [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://informatikpml1.blogspot.com/p/c.html> (дата звернення: 16.06.2025).

13. Пархоменко А. А., Смирнов Є. М. Розробка радіоелектронних схем на основі мікроконтролерів (на прикладі AVR мікроконтролерів фірми Atmel): Методичний посібник. – Київ: КНУ імені Тараса Шевченка, 2013. – 110 с.

14. Мова програмування Arduino C: просто про складне [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://cloud.itstep.org/ru/blog/arduino-c-programming-language-simple-about-complex> (дата звернення: 19.06.2025).

15. Плата Розробника Nano V3.0 mini ATmega328P TypeC [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://myproject.com.ua/plata-rozrobnika-nano-v30-mini-atmega328p-typec-ua.html> (дата звернення: 21.06.2025).

16. Блок живлення компактний Hi-Link HLK-PM01 5В 0.6А [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.minitech.com.ua/ua/blok-pitaniya-5v-600ma-kompakt> (дата звернення: 22.06.2025).

17. DC-DC підвищуючий перетворювач MT3608 (вхід 2-24В, вихід 5-28В 2А) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://radiostore.ua/products/mt3608-dc-dc-povyshaushiy-preobrazovatel-vhod-2-24v-vyhod-5-28v-2a-2> (дата звернення: 23.06.2025).

18. Аккумулятор 18650 VarCell F38 3800 mAh Li-Ion INR, 3.7В, 10А, Red [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://bestbattery.com.ua/li_ion_1850/li_ion_18650/18650_protected/f38p (дата звернення: 24.06.2025).

19. TP 4056 Модуль для заряджання Li-ion 5V 1A [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://myproject.com.ua/tp-4056-modul-dlja-zarjadzhannja-li-ion-type-c-5v-1a-ua.html> (дата звернення: 25.06.2025).

20. Датчик струму ACS712 (30А) [Електронний ресурс]. – Режим

доступу: <https://radiostore.ua/products/modul-datchika-toka-acs712-30a> (дата звернення: 26.06.2025).

21. Модуль трансформатора змінної напруги ZMPT101B [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://surl.li/jmrsng> (дата звернення: 27.06.2025).

22. Wi-Fi модуль ESP8266 ESP-01 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ardushop.in.ua/arduino/wi-fi-module-esp8266-esp-01> (дата звернення: 28.06.2025).

23. Bluetooth модуль HC-05 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://surl.li/bzpfsm> (дата звернення: 29.06.2025).

24. LCD 1602 дисплей + модуль ІС/І2С [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://myproject.com.ua/lcd-1602-displej-iici2c-ua.html> (дата звернення: 30.06.2025).