ВСТУП

Актуальність теми розробки мікроконтролерної системи моніторингу та керування сонячної електростанції малої потужності на базі мікроконтролера зумовлена сучасними тенденціями розвитку енергетики, що характеризуються зростанням частки відновлюваних джерел енергії у загальному енергобалансі та необхідністю підвищення енергоефективності автономних і розподілених систем електропостачання, при цьому сонячна енергетика займає провідне місце серед альтернативних джерел завдяки екологічній безпечності, доступності та невичерпності ресурсу сонячного випромінювання [1]. Водночас ефективність функціонування сонячних електростанцій малої потужності значною мірою залежить від умов експлуатації, орієнтації фотомодулів, режимів заряджання акумуляторних батарей та характеру навантаження, що обумовлює необхідність впровадження інтелектуальних систем керування, здатних у реальному часі здійснювати збір, обробку та аналіз параметрів роботи системи з подальшим прийняттям оптимальних керуючих рішень [2]. Застосування мікропроцесорних засобів, зокрема мікроконтролерів сімейства STM32, дозволяє реалізувати функції автоматизованого керування, включаючи відстеження положення Сонця за допомогою сенсорів освітленості та інерціальних модулів, що забезпечує підвищення коефіцієнта корисної дії фотоелектричних систем до 20–30% порівняно зі стаціонарними установками [3]. Крім того, інтеграція датчиків струму, температури та напруги забезпечує можливість комплексного моніторингу стану енергосистеми, що є важливим для запобігання аварійним режимам, перевантаженням та деградації акумуляторних батарей, особливо гелевих, які широко застосовуються в автономних системах живлення [4]. Актуальність також підсилюється необхідністю реалізації дистанційного контролю та диспетчеризації, що досягається шляхом використання промислових інтерфейсів зв’язку, таких як RS-485 із підтримкою протоколу Modbus, що забезпечує надійність передачі даних у складних умовах

експлуатації та інтеграцію з інформаційно-керуючими системами вищого рівня [5]. У контексті енергетичної безпеки та децентралізації енергопостачання в Україні особливого значення набувають автономні та резервні джерела живлення, здатні забезпечувати стабільне електропостачання об’єктів критичної інфраструктури та приватних домогосподарств, що додатково обґрунтовує доцільність дослідження і розробки подібних систем [6].

Таким чином, створення мікроконтролерної системи моніторингу та керування сонячної електростанції малої потужності є актуальним науково-практичним завданням, спрямованим на підвищення ефективності використання відновлюваних джерел енергії, забезпечення надійності енергопостачання та впровадження сучасних інформаційно-керуючих технологій у сферу енергетики [1–6].

Мета роботи полягає у розробці мікроконтролерної системи моніторингу та керування сонячної електростанції малої потужності на базі мікроконтролера STM32, яка забезпечує ефективний збір, обробку та передачу даних про параметри її функціонування.

Об’єкт дослідження: сонячна електростанція малої потужності.

Предмет дослідження: методи та засоби мікропроцесорного керування і моніторингу СЕС.

Практичне значення виконаної роботи полягає у створенні працездатної мікроконтролерної системи моніторингу та керування сонячної електростанції малої потужності, яка може бути використана для підвищення ефективності експлуатації автономних та гібридних енергетичних установок. Запропоновані технічні рішення забезпечують можливість реалізації контролю основних параметрів системи, зокрема напруги, струму, температури та рівня освітленості, що дозволяє своєчасно виявляти відхилення від нормальних режимів роботи та запобігати аварійним ситуаціям.

1 АНАЛІЗ ОБ'ЄКТА ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ НЕОБХІДНОСТІ РОЗРОБКИ МІКРОКОНТРОЛЕРНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ СОНЯЧНОЮ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЄЮ МАЛОЇ ПОТУЖНОСТІ

1.1 Огляд сонячних електростанцій

Сонячні електростанції є складними енергетичними системами, що здійснюють перетворення енергії сонячного випромінювання в електричну або теплову енергію. Залежно від принципу дії, конструктивного виконання та умов експлуатації розрізняють декілька основних типів сонячних електростанцій, класифікація яких узагальнено наведена у таблиці 1.1 [1].

Таблиця 1.1 – Огляд сонячних електростанцій та їх основних характеристик

Тип сонячної електростанції	Принцип роботи	Основні компоненти	Переваги	Недоліки	Область застосування
Фотоелектрична (PV)	Перетворення сонячного випромінювання в електричну енергію за рахунок фотоелектричного ефекту	Сонячні панелі, інвертор, контролер заряду, акумулятори	Висока надійність, екологічність простота експлуатації	Залежність від освітлення, відносно низький ККД	Приватні будинки, малі та середні СЕС
Сонячна теплова (CSP)	Концентрація сонячного випромінювання для нагріву робочого тіла та генерації електроенергії	Дзеркала, концентратори, парогенератор, турбіна	Висока потужність, можливість акумулюван-ня тепла	Складність конструкції, висока вартість	Великі промислові електростанції
Гібридна СЕС	Поєднання сонячної генерації з іншими джерелами енергії	Сонячні панелі, дизель-генератори, акумулятори, інвертор	Підвищена надійність, стабільність роботи	Складність системи, висока вартість	Віддалені об'єкти, автономні системи
Автономна СЕС	Робота без підключення до електромережі	Сонячні панелі, акумулятори, контролер заряду	Незалежність від мережі, мобільність	Обмежена потужність, залежність від АКБ	Сільські райони, мобільні системи
Мережева СЕС	Робота паралельно з електромережею	Сонячні панелі, мережевий інвертор	Економічна ефективність, відсутність АКБ	Залежність від мережі	Комерційні та житлові об'єкти

Найбільш поширеними є фотоелектричні сонячні електростанції, у яких перетворення енергії здійснюється за рахунок фотоелектричного ефекту. Основними елементами таких систем є фотоелектричні модулі, інвертори, контролери заряду та акумуляторні батареї. Зазначені системи характеризуються відносною простотою конструкції, високою надійністю та можливістю масштабування [2]. Водночас їх ефективність суттєво залежить від рівня сонячної інсоляції, температурного режиму та умов експлуатації.

Сонячні теплові електростанції функціонують на основі концентрації сонячного випромінювання з подальшим перетворенням теплової енергії в електричну. У таких системах використовуються дзеркальні концентратори, теплоносії та паротурбінні установки. Вони забезпечують високу встановлену потужність та можливість акумулювання енергії [3]. Разом із тим, складність конструкції та значні капітальні витрати обмежують їх застосування переважно у великих енергетичних комплексах.

Гібридні сонячні електростанції поєднують декілька джерел енергії, зокрема сонячну генерацію та традиційні або альтернативні джерела, такі як дизельні або вітрові установки. Такий підхід дозволяє підвищити надійність електропостачання та забезпечити стабільність функціонування системи [4]. Однак реалізація подібних систем супроводжується ускладненням структури та збільшенням вартості.

Автономні сонячні електростанції призначені для роботи незалежно від централізованої електромережі. Вони використовують акумуляторні батареї для накопичення енергії та забезпечують електроживлення у віддалених або важкодоступних районах. Основними обмеженнями таких систем є залежність від ємності акумуляторної підсистеми та обмежена потужність [2].

Мережеві сонячні електростанції працюють паралельно з централізованою електромережею. Вони дозволяють передавати надлишкову електроенергію у мережу та забезпечують високу економічну ефективність експлуатації [5].

Водночас їх функціонування залежить від наявності зовнішнього електропостачання та відповідної інфраструктури.

Проведений аналіз основних типів сонячних електростанцій показує, що для систем малої потужності найбільш доцільним є використання фотоелектричних установок. Вони забезпечують оптимальне поєднання технічної простоти, надійності та можливості інтеграції з мікропроцесорними системами керування, що відповідає задачам даного дослідження та узгоджується з наведеною класифікацією у таблиці 1.1 [1–5].

Об’єктом дослідження є сонячна електростанція малої потужності як складна електротехнічна система. Вона включає сукупність взаємопов’язаних елементів. До них належать фотоелектричні модулі, система накопичення енергії на основі акумуляторних батарей, контролер заряду, інвертор та споживачі електроенергії. Функціонування системи відбувається в умовах змінного впливу зовнішніх факторів. До таких факторів належать інтенсивність сонячного випромінювання, температура навколишнього середовища та режим споживання електроенергії. Основною особливістю об’єкта дослідження є нестабільність вхідної енергії, що надходить від сонячного випромінювання. Це обумовлює необхідність застосування ефективних методів керування та оптимізації режимів роботи системи [1].

У процесі функціонування сонячної електростанції відбувається перетворення сонячної енергії в електричну за допомогою фотоелектричного ефекту. Отримана електроенергія або безпосередньо споживається навантаженням, або накопичується в акумуляторній батареї. Накопичена енергія використовується у періоди недостатньої генерації. Це вимагає узгодження режимів роботи всіх складових системи. Також необхідно забезпечити їх надійну взаємодію [2].

Важливою складовою об’єкта дослідження є акумуляторна система. Вона виконує функцію буферного накопичення енергії. Акумуляторна система забезпечує автономність роботи електростанції. Її ефективність та довговічність значною мірою залежать від правильності організації процесів заряджання та розряджання. Також важливими є температурні режими та контроль електричних параметрів [3].

Інвертор як елемент системи забезпечує перетворення постійної напруги в змінну. Така напруга є придатною для живлення побутових споживачів. Процес перетворення супроводжується енергетичними втратами. Це обумовлює необхідність оптимізації режимів роботи інвертора для підвищення загального коефіцієнта корисної дії системи [4].

Аналіз об’єкта дослідження показує, що ефективність функціонування сонячної електростанції значною мірою залежить від орієнтації фотоелектричних панелей відносно Сонця. Навіть незначні відхилення кута нахилу можуть призводити до суттєвих втрат генерації. Це обґрунтовує доцільність використання систем автоматичного відстеження положення Сонця. Такі системи можуть реалізовуватися на основі датчиків освітленості та інерціальних модулів [5].

Важливим аспектом є необхідність постійного моніторингу параметрів роботи системи. До них належать струм, напруга, температура та обсяг виробленої електроенергії. Це дозволяє своєчасно виявляти відхилення від нормального режиму роботи. Також це забезпечує запобігання аварійним ситуаціям [2].

Сучасні підходи до побудови подібних систем передбачають використання мікропроцесорних засобів керування. Вони забезпечують інтеграцію функцій збору даних, обробки інформації, прийняття рішень та керування виконавчими пристроями. Це дозволяє реалізувати єдину автоматизовану систему керування. Такий підхід значно підвищує ефективність та надійність роботи сонячної електростанції [1].

Проведений аналіз об’єкта дослідження підтверджує необхідність розробки мікроконтролерної системи моніторингу та керування. Така система повинна забезпечувати оптимальні режими роботи сонячної електростанції малої потужності. Вона має підвищувати її енергоефективність та надійність функціонування в умовах змінних зовнішніх впливів.

1.2 Класифікація сонячних електростанцій

Класифікація сонячних електростанцій є важливим етапом системного аналізу та проєктування енергетичних установок. Вона дозволяє визначити оптимальні технічні рішення залежно від умов експлуатації, потужності, призначення та рівня автоматизації системи. Одним із основних критеріїв класифікації є спосіб взаємодії з електричною мережею. Відповідно до цього критерію розрізняють мережеві, автономні та гібридні сонячні електростанції. Мережеві системи працюють паралельно з централізованою електромережею. Вони забезпечують передачу надлишкової електроенергії споживачам або у загальну мережу. Це дозволяє реалізувати механізми енергетичного балансування та економічної компенсації. Автономні системи призначені для незалежного електропостачання об’єктів, які не підключені до централізованих мереж. Вони використовують акумуляторні батареї для накопичення енергії. Це забезпечує безперервне живлення у періоди відсутності сонячного випромінювання. Гібридні системи поєднують переваги мережевих та автономних систем. Вони можуть працювати як у мережевому, так і в автономному режимах. Це значно підвищує надійність електропостачання [1].

За способом розміщення сонячних модулів виділяють наземні, дахові та інтегровані у будівельні конструкції системи. Наземні сонячні електростанції зазвичай використовуються для великих об’єктів. Вони дозволяють оптимально орієнтувати панелі відносно Сонця. Дахові системи широко застосовуються у побутових та комерційних об’єктах. Вони забезпечують ефективне використання існуючих поверхонь будівель. Інтегровані системи, відомі як BIPV, передбачають включення фотоелектричних модулів у конструкцію будівель. Це дозволяє поєднати функції генерації електроенергії та архітектурних елементів [2].

За типом використовуваної технології сонячні електростанції поділяються на фотоелектричні та сонячні теплові. Фотоелектричні системи безпосередньо перетворюють сонячну енергію в електричну. Це відбувається за допомогою

напівпровідникових елементів. Сонячні теплові електростанції використовують концентровану сонячну енергію для нагрівання робочого тіла. У подальшому ця енергія перетворюється у механічну, а потім у електричну. Такі системи характерні для великих промислових об’єктів [3].

За конструкцією фотоелектричних модулів розрізняють монокристалічні, полікристалічні та тонкоплівкові панелі. Вони відрізняються технологією виготовлення, коефіцієнтом корисної дії та експлуатаційними характеристиками. Монокристалічні панелі мають найвищий коефіцієнт корисної дії. Вони характеризуються тривалим терміном служби. Полікристалічні панелі забезпечують компроміс між ефективністю та вартістю. Тонкоплівкові панелі мають нижчий коефіцієнт корисної дії. Водночас вони демонструють кращу роботу в умовах розсіяного освітлення та підвищеної температури [2].

Додатково сонячні електростанції класифікуються за потужністю. Виділяють малі системи потужністю до 10кВт. Також розрізняють середні системи потужністю від 10 до 100кВт. Великі системи мають потужність понад 100кВт. Це визначає сферу їх застосування. Окремо класифікація здійснюється за рівнем автоматизації. Виділяють системи з ручним керуванням. Також існують автоматизовані та інтелектуальні системи. Інтелектуальні системи використовують алгоритми оптимізації та адаптивного керування [4].

Важливим критерієм класифікації є спосіб відстеження положення Сонця. Розрізняють стаціонарні системи. Також застосовуються системи з одновісними та двовісними трекерами. Використання трекерів дозволяє підвищити ефективність генерації електроенергії. Це досягається за рахунок оптимальної орієнтації панелей відносно Сонця [5].

Класифікація сонячних електростанцій є багатокритеріальною, вона дозволяє здійснити комплексний аналіз технічних рішень. Це забезпечує можливість вибору оптимальної конфігурації системи залежно від умов експлуатації.

1.3 Існуючі системи моніторингу та керування СЕС

Системи моніторингу та керування сонячних електростанцій у сучасних умовах розвитку енергетики набувають ознак складних багаторівневих інформаційно-керуючих комплексів. Вони інтегрують функції збору, обробки, передачі та візуалізації даних. Також забезпечується формування керуючих впливів у режимі реального часу. Базовий рівень таких систем представлений датчиками та виконавчими пристроями. Вони здійснюють вимірювання електричних і неелектричних параметрів. До таких параметрів належать напруга, струм, потужність, температура, освітленість та стан акумуляторних батарей. Середній рівень реалізується на базі мікроконтролерів або програмованих логічних контролерів. Він забезпечує первинну обробку даних та реалізацію алгоритмів керування. Верхній рівень представлений системами диспетчерського моніторингу та керування. Вони забезпечують централізований контроль і управління сонячною електростанцією [6].

Існуючі системи моніторингу та керування СЕС мають багаторівневу структуру, що включає польовий, локальний та верхній рівні керування (табл. 1.2). Найбільш ефективними є інтегровані рішення, які поєднують функції SCADA та IoT. Водночас їх висока вартість та складність обмежують застосування у системах малої потужності, що обґрунтовує доцільність розробки власної мікроконтролерної системи керування.

Таблиця 1.2 – Існуючі системи моніторингу та керування сонячних електростанцій

Рівень системи	Тип системи	Основні функції	Переваги	Недоліки
Нижній рівень (польовий)	Датчики та виконавчі пристрої	Вимірювання параметрів (напруга, струм, температура, освітленість), керування обладнанням	Висока точність, швидкодія	Обмежена функціональність

Кінець таблиці 1.2

Середній рівень	Мікроконтролери (STM32, Arduino)	Первинна обробка даних, локальне керування, передача даних	Гнучкість, низька вартість, автономність	Обмежені ресурси
Середній рівень	ПЛК (PLC)	Надійне промислове керування, реалізація алгоритмів	Висока надійність, промисловий стандарт	Висока вартість
Верхній рівень	SCADA-системи	Візуалізація, архівування, диспетчерське керування	Централізований контроль, аналітика	Складність налаштування
Верхній рівень	IoT-платформи	Віддалений моніторинг, хмарна обробка даних	Масштабованість, доступ через Інтернет	Залежність від мережі
Комунікаційний рівень	RS-485 / Modbus	Передача даних між пристроями	Надійність, завадостійкість	Обмежена швидкість
Комунікаційний рівень	Ethernet / Wi-Fi	Високошвидкісна передача даних	Гнучкість, інтеграція з мережею	Вразливість до перешкод
Інтегровані рішення	Комерційні системи (Huawei, SMA, Fronius)	Повний контроль СЕС, моніторинг, аналітика	Готові рішення, простота використання	Висока вартість, закритість

Важливим етапом розвитку систем керування стало впровадження SCADA-систем. Вони забезпечують інтеграцію всіх рівнів керування в єдину інформаційну систему. Це дозволяє здійснювати централізований збір даних. Також забезпечується їх архівація та візуалізація у вигляді графіків і мнемосхем. Додатково реалізується формування сигналів тривоги та автоматизоване реагування на аварійні ситуації [9]. SCADA-системи забезпечують можливість дистанційного керування роботою сонячних електростанцій. Це є особливо важливим для розподілених енергетичних систем. Вони також підтримують інтеграцію з іншими інформаційними системами. До таких систем належать системи енергоменеджменту та прогнозування навантаження [9].

Розвиток інформаційних технологій сприяв появі концепції Інтернету речей. Вона передбачає використання великої кількості взаємопов’язаних пристроїв. Такі пристрої здатні обмінюватися даними через мережу Інтернет. У

контексті сонячних електростанцій IoT-технології дозволяють створювати розподілені системи моніторингу. У таких системах кожен елемент, зокрема фотоелектричний модуль, інвертор або акумулятор, може виступати як окремий інтелектуальний вузол. Такий вузол має можливість передавати дані та отримувати керуючі команди [10].

Застосування IoT у сонячних електростанціях забезпечує підвищення точності моніторингу. Воно дозволяє здійснювати збір великого обсягу даних. Подальший аналіз цих даних здійснюється із використанням сучасних методів обробки інформації. Це дає змогу оптимізувати режими роботи системи. Також це сприяє підвищенню її ефективності [10]. Важливою перевагою IoT-рішень є можливість реалізації віддаленого доступу до системи. Такий доступ здійснюється через веб-інтерфейси або мобільні додатки. Це забезпечує зручність експлуатації та оперативність реагування на зміни параметрів роботи системи [6].

У сучасних системах керування широко використовуються різноманітні комунікаційні інтерфейси та протоколи. До них належать RS-485, Modbus, CAN та Ethernet. Також застосовуються бездротові технології, такі як Wi-Fi, ZigBee та LoRaWAN. Вони забезпечують передачу даних між елементами системи на різних рівнях [8]. Важливим аспектом є забезпечення надійності та завадостійкості передачі даних. Це досягається шляхом використання промислових протоколів. Також застосовується резервування каналів зв’язку [8].

Додатково необхідно враховувати питання кібербезпеки. Інтеграція сонячних електростанцій у мережеві інфраструктури створює потенційні загрози несанкціонованого доступу. Також існує ризик втручання у роботу системи. Це потребує застосування сучасних методів захисту інформації [10].

Перспективним напрямом розвитку систем керування сонячними електростанціями є використання хмарних технологій. Вони дозволяють здійснювати централізоване зберігання та обробку даних. Також забезпечується можливість прогнозування генерації електроенергії. Прогнозування здійснюється на основі аналізу історичних даних та погодних умов [9].

Інтеграція SCADA та IoT-технологій дозволяє створювати інтелектуальні енергетичні системи. Такі системи здатні адаптуватися до змінних умов експлуатації. Вони забезпечують оптимізацію режимів роботи та підвищують ефективність використання відновлюваних джерел енергії [6–10].

Сучасні системи моніторингу та керування сонячних електростанцій є складними багаторівневими структурами. Вони поєднують елементи автоматизації, інформаційних технологій та телекомунікацій. Це забезпечує високий рівень ефективності, надійності та функціональності енергетичних систем [4–10].

1.4 Переваги і недоліки сонячної енергетики

Сонячна енергетика є одним із ключових напрямів розвитку відновлюваних джерел енергії. Це зумовлено її значним потенціалом та відповідністю сучасним вимогам енергетичної безпеки та екологічної сталості. Однією з основних переваг є невичерпність джерела енергії. Сонячне випромінювання є практично необмеженим ресурсом у масштабах людської цивілізації. Важливою перевагою є екологічна чистота процесу генерації електроенергії. Він не супроводжується викидами парникових газів або інших шкідливих речовин. Це є особливо актуальним в умовах глобальних змін клімату [1].

Суттєвою перевагою сонячної енергетики є можливість децентралізованого виробництва електроенергії. Це дозволяє зменшити втрати при передачі електроенергії. Також це сприяє підвищенню енергетичної незалежності окремих споживачів або регіонів. Додатковою перевагою є модульність фотоелектричних систем. Вона забезпечує можливість гнучкого масштабування потужності залежно від потреб користувача [2].

До переваг також належать низькі експлуатаційні витрати. Вони пов’язані з відсутністю рухомих частин у фотоелектричних модулях. Це зменшує потребу у технічному обслуговуванні. Також це підвищує надійність системи в цілому [3].

Водночас сонячна енергетика має і суттєві недоліки. Основним з них є залежність від природно-кліматичних умов. До таких умов належать рівень сонячної інсоляції, тривалість світлового дня та погодні фактори. Це призводить до нерівномірності генерації електроенергії. У зв'язку з цим виникає необхідність використання систем накопичення енергії або резервних джерел живлення [4].

Іншим важливим обмеженням є відносно низький коефіцієнт корисної дії фотоелектричних перетворювачів. Це обумовлює необхідність використання значних площ для розміщення сонячних панелей. Особливо це актуально для великих енергетичних установок [2].

Економічні аспекти також мають значний вплив. Початкові інвестиції у встановлення сонячних електростанцій залишаються відносно високими. Це відбувається незважаючи на поступове зниження вартості обладнання. Такий фактор може стримувати широке впровадження сонячної енергетики [3].

Додатково слід враховувати деградацію фотоелектричних модулів у процесі експлуатації. Це призводить до поступового зниження їх ефективності. Також існує проблема утилізації відпрацьованих компонентів. Вона потребує розробки екологічно безпечних технологій переробки [5].

Окремо слід відзначити залежність ефективності роботи сонячних електростанцій від температурного режиму. Підвищення температури фотоелементів призводить до зниження їх коефіцієнта корисної дії. Це є важливим фактором при проєктуванні систем охолодження. Також це необхідно враховувати при виборі місця встановлення обладнання [2].

Незважаючи на наявні недоліки, сонячна енергетика має значний потенціал розвитку. Її ефективність може бути підвищена за рахунок використання сучасних систем керування. Також важливими є оптимізація режимів роботи та вдосконалення технологій фотоелектричних перетворювачів [1–5].

1.5 Об’єкт дослідження

Об’єктом дослідження є сонячна електростанція малої потужності, яка розглядається як складна електротехнічна система. Вона характеризується наявністю сукупності взаємопов’язаних функціональних елементів. До складу системи входять фотоелектричні модулі, акумуляторна підсистема накопичення енергії, контролер заряду, інвертор та електричні споживачі. Робота системи здійснюється в умовах змінного впливу зовнішніх факторів. До них належать рівень сонячної інсоляції, температура навколишнього середовища та характер електроспоживання. Визначальною особливістю об’єкта дослідження є нестабільний характер надходження енергії від сонячного випромінювання. Це зумовлює необхідність застосування ефективних методів керування та оптимізації режимів функціонування системи [1].

У процесі роботи сонячної електростанції відбувається перетворення енергії сонячного випромінювання в електричну за рахунок фотоелектричного ефекту. Згенерована електроенергія може безпосередньо використовуватися навантаженням або накопичуватися в акумуляторних батареях. Накопичена енергія використовується у періоди зниження або відсутності генерації. Це потребує узгодження режимів роботи всіх елементів системи та забезпечення їх стабільної взаємодії [2].

Суттєву роль у функціонуванні системи відіграє акумуляторна підсистема. Вона виконує функцію буферного накопичення електроенергії та забезпечує автономність роботи електростанції. Ефективність і довговічність акумуляторів залежать від режимів заряджання і розряджання. Також важливими є температурні умови експлуатації та контроль електричних параметрів [3].

Інвертор забезпечує перетворення постійної напруги у змінну, придатну для живлення побутових електроспоживачів. Даний процес супроводжується певними енергетичними втратами. Це обумовлює необхідність оптимізації режимів роботи інвертора для підвищення загальної ефективності системи [4].

Аналіз об’єкта дослідження свідчить, що ефективність роботи сонячної електростанції значною мірою залежить від орієнтації фотоелектричних панелей відносно Сонця. Навіть незначні відхилення кута нахилу можуть призводити до суттєвих втрат виробітку електроенергії. Це обґрунтовує доцільність застосування систем автоматичного відстеження положення Сонця. Такі системи можуть бути реалізовані на основі датчиків освітленості та інерціальних вимірювальних модулів [5].

Важливою умовою ефективного функціонування системи є безперервний моніторинг її параметрів. До основних параметрів належать напруга, струм, температура та обсяг виробленої електроенергії. Це дозволяє своєчасно виявляти відхилення від нормального режиму роботи та запобігати виникненню аварійних ситуацій [2].

Сучасні підходи до побудови подібних систем передбачають використання мікропроцесорних засобів керування. Вони забезпечують інтеграцію процесів збору даних, їх обробки, аналізу та формування керуючих впливів. Це дозволяє реалізувати єдину автоматизовану систему керування, що підвищує ефективність і надійність функціонування сонячної електростанції [1].

Отже, проведений аналіз об’єкта дослідження підтверджує доцільність розробки мікроконтролерної системи моніторингу та керування. Така система повинна забезпечувати оптимізацію режимів роботи сонячної електростанції малої потужності. Вона має сприяти підвищенню її енергоефективності та надійності в умовах змінних зовнішніх впливів.

1.6 Постановка задачі дослідження

На основі проведеного аналізу встановлено, що існуючі сонячні електростанції та системи керування мають ряд обмежень. До них належать недостатня ефективність використання енергії. Також спостерігається обмежена функціональність систем моніторингу. Додатковою проблемою є складність інтеграції різних компонентів у єдину систему. Це обумовлює необхідність

розробки мікроконтролерної системи моніторингу та керування сонячної електростанції малої потужності. Така система повинна забезпечувати оптимізацію процесів генерації, накопичення та споживання електроенергії. Вона має реалізовувати алгоритми максимальної потужності, зокрема MPPT. Також система повинна забезпечувати контроль основних параметрів функціонування. До них належать напруга, струм, температура та стан акумуляторної підсистеми. Важливою вимогою є забезпечення можливості дистанційного моніторингу та аналізу даних .

Особливу увагу необхідно приділити використанню сучасних датчиків. Це дозволить підвищити точність вимірювань параметрів системи. Також важливим є застосування сучасних комунікаційних інтерфейсів. Вони забезпечують надійний обмін даними між елементами системи. Додатково це створює можливість інтеграції з іншими інформаційними системами. Такий підхід сприяє підвищенню ефективності та надійності роботи сонячної електростанції [9].

Висновок до розділу

У результаті проведеного аналізу встановлено, що сонячні електростанції є ефективним засобом отримання електроенергії з відновлюваних джерел. Водночас їх ефективність значною мірою залежить від рівня автоматизації. Важливим фактором є якість систем моніторингу та керування. Застосування сучасних алгоритмів оптимізації, зокрема MPPT, дозволяє значно підвищити ефективність генерації електроенергії. Інтеграція мікропроцесорних систем керування забезпечує гнучкість функціонування системи. Також це підвищує її адаптивність до змінних умов експлуатації. Додатково забезпечується підвищення надійності роботи сонячної електростанції.

Подальший розвиток сонячної енергетики пов’язаний із впровадженням інтелектуальних систем керування. Важливим напрямом є підвищення ефективності фотоелектричних перетворювачів. Також необхідним є вдосконалення систем накопичення енергії. Це дозволить забезпечити

стабільність роботи сонячних електростанцій. Крім того, це підвищить економічну доцільність їх використання у різних умовах експлуатації

2 РОЗРОБКА МІКРОКОНТРОЛЕРНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ТА МОНІТОРИНГУ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ МАЛОЇ ПОТУЖНОСТІ

2.1 Загальна структура системи

Розроблювана мікроконтролерна система моніторингу та керування сонячної електростанції малої потужності є складною багаторівневою технічною системою, призначеною для забезпечення ефективного функціонування процесів генерації, перетворення, накопичення та споживання електричної енергії з використанням відновлюваного джерела енергії – сонячного випромінювання. Загальна структура системи формується на основі інтеграції функціонально завершених підсистем, що взаємодіють між собою через інформаційні та енергетичні зв’язки, забезпечуючи цілісність та узгодженість роботи всіх компонентів системи [1–3].

У загальному випадку структурна організація мікроконтролерної системи керування СЕС передбачає виділення декількох рівнів (рис. 2.1), зокрема рівня генерації електричної енергії, рівня накопичення та перетворення енергії, рівня вимірювання та збору інформації, рівня керування та прийняття рішень, а також рівня передачі даних і моніторингу, кожен з яких виконує визначені функції та має відповідну апаратну реалізацію [2–4]. Рівень генерації представлений фотоелектричними модулями, що здійснюють безпосереднє перетворення сонячної енергії у електричну за рахунок фотоефекту, ефективність якого залежить від інтенсивності сонячного випромінювання, температури навколишнього середовища та кута падіння світлових променів на поверхню панелей, що обумовлює необхідність застосування систем орієнтації та відстеження положення Сонця [3–5]. Згенерована електрична енергія у вигляді постійного струму надходить до контролера заряду, який виконує функції стабілізації напруги, обмеження струму та захисту акумуляторної батареї від

перезаряду і глибокого розряду, що є критично важливим для забезпечення довговічності та надійності системи накопичення енергії [4–6].

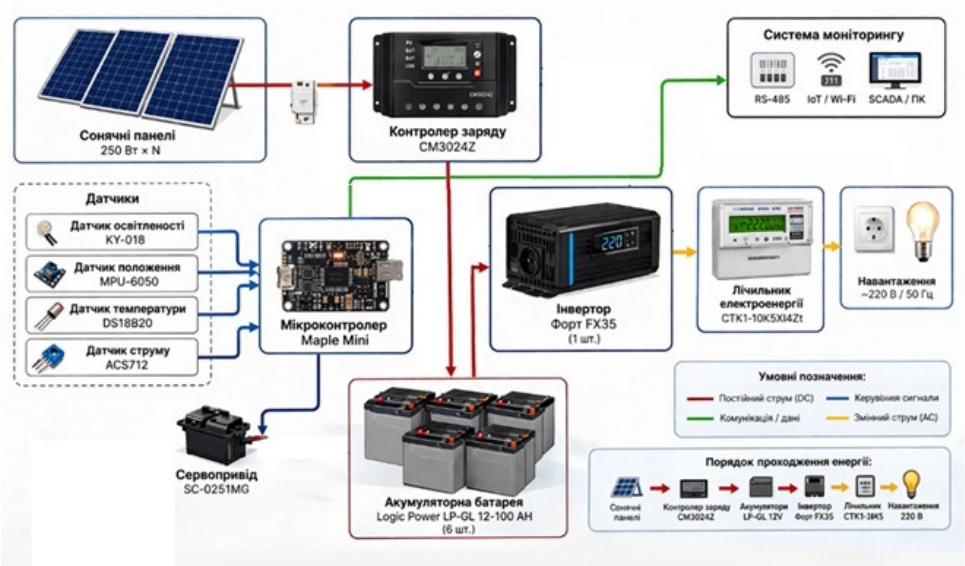

Рисунок 2.1 – Структурна схема системи моніторингу та керування сонячної електростанції малої потужності

Блок накопичення енергії реалізований на базі акумуляторних батарей, які забезпечують можливість використання електроенергії у періоди відсутності сонячного випромінювання, при цьому параметри акумуляторної батареї, зокрема її ємність, внутрішній опір та температурний режим, суттєво впливають на загальну ефективність системи, що потребує постійного контролю та моніторингу відповідних характеристик [5–7]. Блок перетворення енергії представлений інвертором, який здійснює перетворення постійної напруги акумуляторної батареї у змінну напругу промислової частоти, придатну для живлення побутових та промислових споживачів, при цьому важливими характеристиками інвертора є його коефіцієнт корисної дії, форма вихідної напруги та здатність працювати у широкому діапазоні навантажень [6–8].

Ключовим елементом системи є мікроконтролерний блок керування, який виконує функції центрального обчислювального вузла та забезпечує обробку інформації, отриманої від датчиків, реалізацію алгоритмів керування та

взаємодію з виконавчими пристроями, при цьому використання сучасних мікроконтролерів дозволяє реалізувати складні алгоритми обробки даних, включаючи цифрову фільтрацію сигналів, прогнозування та оптимізацію режимів роботи системи [7–9]. Рівень збору інформації включає систему датчиків, що забезпечують вимірювання ключових параметрів роботи СЕС, зокрема рівня освітленості, температури, струму, напруги та положення панелей, що дозволяє отримати повну інформацію про стан системи та забезпечити її ефективне керування [3–6]. Використання датчика освітленості дозволяє оцінити інтенсивність сонячного випромінювання та визначити оптимальне положення панелей, тоді як застосування інерційних датчиків, таких як акселерометри та гіроскопи, забезпечує можливість реалізації системи автоматичного відстеження положення Сонця, що сприяє підвищенню ефективності генерації електричної енергії [4–7]. Датчики температури дозволяють контролювати тепловий режим роботи як фотоелектричних модулів, так і акумуляторної батареї, що є важливим фактором забезпечення їх надійності та довговічності, оскільки перевищення допустимих температур може призвести до деградації елементів системи [5–8]. Вимірювання електричних параметрів, зокрема струму та напруги, здійснюється за допомогою відповідних датчиків, що дозволяє контролювати режим роботи системи та виявляти можливі відхилення від нормального функціонування [6–9].

Важливою складовою структури системи є виконавчі пристрої, до яких відносяться сервоприводи та релейні модулі, що забезпечують реалізацію керуючих впливів, сформованих мікроконтролером, зокрема зміну положення сонячних панелей та керування підключенням навантаження, що дозволяє адаптувати роботу системи до змінних умов експлуатації [7–10]. Рівень передачі даних реалізується за допомогою комунікаційних модулів, що забезпечують обмін інформацією між мікроконтролером та зовнішніми пристроями, при цьому використання інтерфейсу RS-485 дозволяє забезпечити надійну передачу даних на значні відстані та у складних умовах експлуатації, що є характерним для енергетичних систем [8–10]. Додатково можливе використання перетворювачів інтерфейсу для підключення системи до персонального комп’ютера або інших

пристроїв верхнього рівня, що дозволяє реалізувати функції моніторингу, візуалізації та архівації даних [9–11], у сучасних умовах важливим аспектом є інтеграція систем керування СЕС з інформаційними системами більш високого рівня, зокрема SCADA та IoT платформами, що дозволяє забезпечити централізоване керування, віддалений доступ та аналіз даних у режимі реального часу, що сприяє підвищенню ефективності експлуатації енергетичних систем [10–12].

Структурна схема системи передбачає наявність зворотних зв'язків між її елементами, що дозволяє реалізувати замкнуті контури керування та забезпечити стабільність роботи системи у змінних умовах експлуатації, при цьому мікроконтролер виконує функції регулятора, що формує керуючі впливи на основі аналізу поточних значень параметрів системи та заданих критеріїв оптимальності [7–9]. Важливим аспектом побудови структури системи є забезпечення її модульності та масштабованості, що дозволяє у разі необхідності розширювати функціональні можливості системи шляхом додавання нових датчиків, виконавчих пристроїв або комунікаційних модулів без суттєвих змін у базовій архітектурі [8–11]. Додатково слід враховувати вимоги до енергоспоживання системи керування, оскільки вона повинна споживати мінімальну кількість енергії, щоб не знижувати загальну ефективність СЕС, що досягається за рахунок використання енергоефективних мікроконтролерів та оптимізації алгоритмів їх роботи [9–12]. Таким чином, загальна структура мікроконтролерної системи моніторингу та керування сонячної електростанції малої потужності є багаторівневою ієрархічною системою, що включає підсистеми генерації, накопичення, перетворення, вимірювання, керування та передачі даних, взаємодія яких забезпечує ефективне функціонування СЕС, підвищення її енергоефективності, надійності та адаптивності до змінних умов експлуатації [1–12].

Розроблювана мікроконтролерна система моніторингу та керування сонячної електростанції малої потужності є складною багаторівневою технічною системою, призначеною для забезпечення ефективного функціонування процесів

генерації, перетворення, накопичення та споживання електричної енергії з використанням відновлюваного джерела енергії – сонячного випромінювання, при цьому загальна структура системи формується на основі інтеграції функціонально завершених підсистем, що взаємодіють між собою через інформаційні та енергетичні зв'язки, забезпечуючи цілісність та узгодженість роботи всіх компонентів системи [11–13]. У загальному випадку структурна організація мікроконтролерної системи керування СЕС передбачає виділення декількох рівнів, зокрема рівня генерації електричної енергії, рівня накопичення та перетворення енергії, рівня вимірювання та збору інформації, рівня керування та прийняття рішень, а також рівня передачі даних і моніторингу, кожен з яких виконує визначені функції та має відповідну апаратну реалізацію [12–14]. Рівень генерації представлений фотоелектричними модулями, що здійснюють безпосереднє перетворення сонячної енергії у електричну за рахунок фотоефекту, ефективність якого залежить від інтенсивності сонячного випромінювання, температури навколишнього середовища та кута падіння світлових променів на поверхню панелей, що обумовлює необхідність застосування систем орієнтації та відстеження положення Сонця [13–15].

Згенерована електрична енергія у вигляді постійного струму надходить до контролера заряду, який виконує функції стабілізації напруги, обмеження струму та захисту акумуляторної батареї від перезаряду і глибокого розряду, що є критично важливим для забезпечення довговічності та надійності системи накопичення енергії [14–16].

Блок накопичення енергії реалізований на базі акумуляторних батарей, які забезпечують можливість використання електроенергії у періоди відсутності сонячного випромінювання, при цьому параметри акумуляторної батареї, зокрема її ємність, внутрішній опір та температурний режим, суттєво впливають на загальну ефективність системи, що потребує постійного контролю та моніторингу відповідних характеристик [15–17]. Блок перетворення енергії представлений інвертором, який здійснює перетворення постійної напруги акумуляторної батареї у змінну напругу промислової частоти, придатну для

живлення побутових та промислових споживачів, при цьому важливими характеристиками інвертора є його коефіцієнт корисної дії, форма вихідної напруги та здатність працювати у широкому діапазоні навантажень [16–18].

Ключовим елементом системи є мікроконтролерний блок керування на базі STM32F103, який виконує функції центрального обчислювального вузла та забезпечує обробку інформації, отриманої від датчиків освітленості KY-018, температури DS18B20, струму ACS712 та положення MPU-6050, реалізацію алгоритмів керування та взаємодію з виконавчими пристроями, зокрема сервоприводом SC-0251MG, що забезпечує зміну положення сонячних панелей [11–14].

Рівень збору інформації включає систему датчиків, що забезпечують вимірювання ключових параметрів роботи СЕС, що дозволяє отримати повну інформацію про стан системи та забезпечити її ефективне керування [13–16], рівень передачі даних реалізується за допомогою інтерфейсу RS-485 із використанням модуля MAX485, що забезпечує надійну передачу даних на значні відстані та можливість інтеграції системи у SCADA або IoT середовище [17–20], структурна схема передбачає наявність зворотних зв’язків між її елементами, що дозволяє реалізувати замкнуті контури керування та забезпечити стабільність роботи системи у змінних умовах експлуатації, при цьому мікроконтролер формує керуючі впливи на основі аналізу поточних параметрів системи, таким чином, загальна структура системи забезпечує ефективне функціонування сонячної електростанції, підвищення її енергоефективності, надійності та адаптивності [11–20].

2.2 Обґрунтування вибору елементної бази системи

Вибір мікроконтролера як центрального керуючого елемента мікроконтролерної системи моніторингу та керування сонячної електростанції малої потужності обумовлений необхідністю забезпечення високої

продуктивності обробки даних, підтримки периферійних інтерфейсів та реалізації алгоритмів керування у режимі реального часу.

Використання плати Maple Mini на базі мікроконтролера STM32F103 з ядром ARM Cortex-M3, тактовою частотою до 72МГц, наявністю 12-бітного аналого-цифрового перетворювача, достатнім обсягом оперативної та флеш-пам’яті, а також підтримкою інтерфейсів I2C, UART, SPI та PWM забезпечує можливість інтеграції широкого спектра датчиків і виконавчих пристроїв, що відповідає сучасним вимогам до вбудованих систем керування та технічним характеристикам мікроконтролерів сімейства STM32 [11] (рис. 2.2).

Рисунок 2.2 – Мікроконтролер Maple Mini (STM32F103)

Низьке енергоспоживання, висока швидкодія та наявність розвиненої екосистеми програмного забезпечення дозволяють ефективно реалізувати алгоритми збору, обробки та передачі даних у системах енергетичного моніторингу [12].

Для контролю електричних параметрів системи, зокрема струму заряджання та розряджання акумуляторної батареї, обрано датчик ACS712. Принцип дії якого базується на ефекті Холла, що забезпечує безконтактне вимірювання струму та гальванічну розв’язку між силовою та вимірювальною

частинами, що суттєво підвищує рівень електробезпеки та надійності функціонування системи (рис. 2.3).

Рисунок 2.3 – Датчик струму ACS712

Датчик забезпечує можливість вимірювання як постійного, так і змінного струму, а його аналоговий вихід дозволяє безпосередньо підключати його до аналого-цифрового перетворювача мікроконтролера, що спрощує апаратну реалізацію системи моніторингу та забезпечує достатню точність вимірювань у заданому діапазоні струмів [16]. Використання даного датчика є доцільним у системах малої потужності завдяки його компактності, низькій вартості та простоті інтеграції [18].

Контроль температурного режиму роботи основних елементів сонячної електростанції реалізовано за допомогою цифрового датчика DS18B20 (рис. 2.4), який використовує однопровідний інтерфейс передачі даних OneWire, що дозволяє підключати декілька датчиків до одного входу мікроконтролера та забезпечує зменшення кількості з’єднувальних провідників.

Датчик характеризується високою точністю вимірювання температури (до ±0,5°C) широким діапазоном робочих температур та стійкістю до завад, що робить його ефективним засобом контролю теплових режимів фотоелектричних модулів та акумуляторних батарей, оскільки перевищення допустимих

температур може призвести до деградації елементів системи та зниження її ефективності [14].

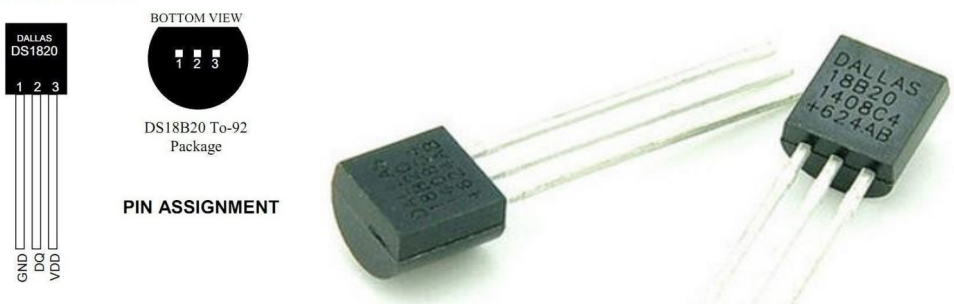

Рисунок 2.4 – Датчик температури DS18B20

Застосування цифрового інтерфейсу забезпечує підвищену завадостійкість передачі даних у порівнянні з аналоговими датчиками [13].

Для визначення просторового положення сонячних панелей використано інерціальний модуль MPU-6050, який поєднує тривісний акселерометр і гіроскоп та забезпечує вимірювання кутових швидкостей і прискорень, що дозволяє визначати орієнтацію панелей відносно горизонтальної площини та реалізувати алгоритми автоматичного відстеження положення Сонця (рис. 2.5).

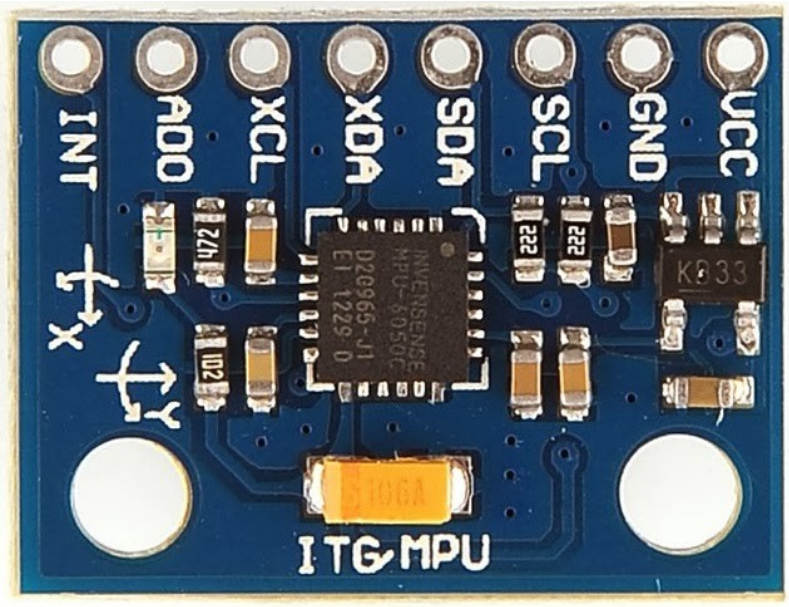

Рисунок 2.5 – Модуль MPU-6050

Обмін даними здійснюється через інтерфейс I2C, що забезпечує високу швидкість передачі інформації та простоту інтеграції з мікроконтролером. Підключення модуля здійснюється за схемою,представлено на рисунку 2.6.

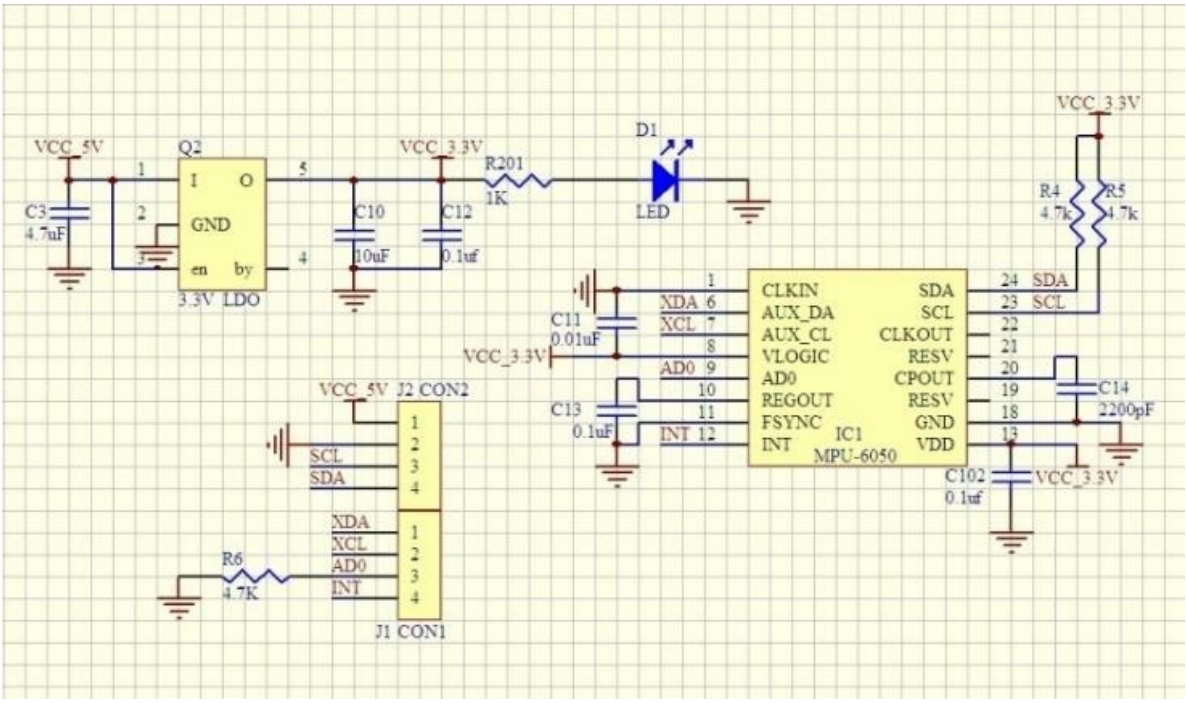

Рисунок 2.6–Схема підключення MPU-6050

Використання даного модуля дозволяє підвищити ефективність генерації електроенергії за рахунок оптимального позиціонування панелей [15], що є важливим для систем малої потужності [12].

Оцінка інтенсивності сонячного випромінювання здійснюється за допомогою датчика освітленості KY-018, який базується на фоторезистивному елементі, опір якого змінюється залежно від рівня освітленості, що дозволяє отримувати інформацію про зміну освітленості та використовувати її для реалізації алгоритмів керування положенням сонячних панелей (рис. 2.7).

Рисунок 2.7 – Датчик освітленості KY-018

Простота конструкції, низька вартість та достатня чутливість датчика обумовлюють його доцільність використання у системах малої потужності [13], використання аналогового сигналу дозволяє забезпечити безпосередню інтеграцію з аналого-цифровим перетворювачем мікроконтролера [11].

Для реалізації системи керування положенням сонячних панелей використано сервопривід SC-0251MG, який забезпечує точне позиціонування вала залежно від керуючого PWM-сигналу, сформованого мікроконтролером (рис. 2.8).

Рисунок 2.8 – Сервопривід SC-0251MG

Використання сервопривода дозволяє реалізувати систему автоматичного орієнтування панелей відносно Сонця, що сприяє підвищенню ефективності генерації електроенергії, важливими характеристиками сервопривода є крутний момент, швидкість реакції та точність позиціонування, що забезпечують

ефективну роботу системи у змінних умовах експлуатації [12]. Застосування сервопривода є доцільним для систем малої потужності завдяки простоті керування та високій надійності.

Передача даних у систему моніторингу реалізована за допомогою модуля MAX485, який забезпечує перетворення сигналів UART у диференціальний інтерфейс RS-485, що характеризується високою завадостійкістю та можливістю передачі даних на значні відстані, що є важливим для енергетичних систем. Використання даного інтерфейсу дозволяє інтегрувати систему керування сонячною електростанцією з SCADA або IoT платформами, забезпечуючи можливість дистанційного моніторингу та керування, що відповідає сучасним тенденціям розвитку енергетичних систем [17] (рис.2.9).

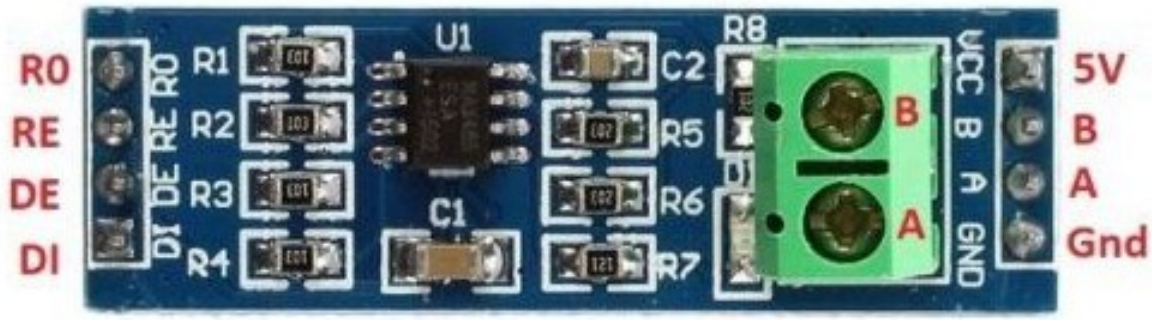

Рисунок 2.9 – Модуль MAX485 (інтерфейс RS-485)

Застосування стандарту RS-485 забезпечує надійну роботу системи в умовах електромагнітних завад [18–20].

Фотоелектричні модулі є основним джерелом електричної енергії у сонячній електростанції та забезпечують перетворення енергії сонячного випромінювання у електричну енергію постійного струму за рахунок внутрішнього фотоефекту. Обрано модулі номінальною потужністю 250Вт із робочою напругою 12В, що обумовлено необхідністю забезпечення сумісності з контролером заряду та акумуляторною батареєю, а також оптимального співвідношення між потужністю, габаритами та вартістю обладнання (рис. 2.10).

Рисунок 2.10 – Фотоелектричний модуль потужністю 250Вт (12В)

Типовими параметрами таких модулів є напруга холостого ходу на рівні 21–22В, робоча напруга 17–18В, струм короткого замикання до 8–9А та коефіцієнт корисної дії близько 15–18%, при цьому ефективність роботи модулів суттєво залежить від інтенсивності сонячного випромінювання, температури та кута нахилу панелей, що обґрунтовує необхідність використання систем орієнтації та моніторингу параметрів роботи, застосування модулів даного типу є доцільним у системах малої потужності завдяки їхній надійності, довговічності та відносно низькій вартості, що відповідає сучасним підходам до побудови автономних фотоелектричних систем [12, 13, 18].

Для обліку спожитої та виробленої електричної енергії у системі сонячної електростанції використовується лічильник електроенергії СТК1-10К5XI4Zt, який є важливим елементом контролю енергетичних потоків. Даний тип лічильника належить до електронних однофазних засобів вимірювання, що забезпечують високу точність обліку, стабільність показників та можливість тривалого використання без суттєвого зниження метрологічних характеристик (рис. 2.11).

Рисунок 2.11 – Лічильник електроенергії СТК1-10К5XI4Zt

Конструктивно лічильник містить вимірювальний модуль, мікропроцесорний блок обробки сигналів та індикатор для відображення результатів вимірювання, а також клемний блок для підключення до електричної мережі, важливою особливістю сучасних лічильників є можливість інтеграції з автоматизованими системами обліку електроенергії за допомогою цифрових інтерфейсів. RS-485 дозволяє передавати дані у систему моніторингу та здійснювати їх подальший аналіз застосування даного лічильника у складі мікроконтролерної системи керування СЕС дозволяє оцінювати ефективність роботи установки, контролювати баланс енергії та виявляти відхилення у режимах функціонування, що відповідає сучасним вимогам до систем енергетичного моніторингу [17, 18, 20].

Контролер заряду CM3024Z використовується для забезпечення ефективного та безпечного процесу заряджання акумуляторної батареї та виконує функції стабілізації напруги, обмеження струму, а також захисту акумуляторів від перезаряду, глибокого розряду та короткого замикання (рис. 2.12).

Рисунок 2.12 – Контролер заряду CM3024Z

Принцип його роботи базується на широтно-імпульсній модуляції, що дозволяє регулювати параметри заряджання залежно від стану акумулятора, контролер підтримує роботу з системами 12/24В та забезпечує оптимізацію процесу накопичення енергії, що є критично важливим для підвищення ефективності та довговічності акумуляторної батареї, застосування даного контролера є доцільним у системах малої потужності завдяки його простоті, надійності та доступності [19, 12].

Акумуляторна батарея є ключовим елементом системи накопичення енергії та забезпечує можливість використання електроенергії у періоди відсутності сонячного випромінювання. У проєкті використано гелеві акумулятори типу Logic Power LP-GL 12–100AH, (рис. 2.13), які характеризуються високою циклічною стійкістю, низьким рівнем саморозряду та підвищеною безпекою експлуатації, оскільки електроліт знаходиться у гелеподібному стані, що запобігає витіканню та дозволяє працювати у різних положеннях.

Об’єднання акумуляторів у батарейний блок дозволяє отримати необхідну напругу та ємність, що забезпечує автономність роботи системи, при цьому важливими параметрами є глибина розряду, температурний режим та ефективність заряджання, що потребує постійного контролю [12, 18].

Рисунок 2.13 – Акумуляторна батарея

Інвертор Форт FX35 призначений для перетворення постійної напруги акумуляторної батареї у змінну напругу промислової частоти 220В, що забезпечує можливість живлення побутових та промислових споживачів. Важливими характеристиками інвертора є його номінальна потужність, коефіцієнт корисної дії, форма вихідної напруги (чиста синусоїда), а також наявність систем захисту від перевантаження, короткого замикання та перегріву (рис. 2.14).

Рисунок 2.14 – Інвертор Форт FX35

Використання інвертора даного типу дозволяє забезпечити стабільну роботу навантаження та підвищити надійність функціонування системи в цілому, що відповідає сучасним вимогам до систем автономного електроживлення [20, 18].

2.3 Розробка модуля контролю стану акумуляторної частини

Акумуляторна частина системи сонячної електростанції малої потужності є ключовим елементом забезпечення її автономності та стабільності функціонування. Вона складається з шести гелевих акумуляторів типу LogicPower LP-GL 12-100 AH ємністю 100А·год та номінальною напругою 12В кожен. Ефективність роботи даної підсистеми безпосередньо впливає на загальні експлуатаційні характеристики системи, що обумовлює необхідність реалізації засобів постійного контролю її технічного стану [11].

Для забезпечення надійної роботи акумуляторної підсистеми необхідно здійснювати безперервний моніторинг її основних параметрів у режимі реального часу. До таких параметрів належать значення напруги на кожному акумуляторі, значення струмів заряджання та розряджання, а також температури корпусів акумуляторних елементів. Вимірювання напруг дозволяє своєчасно виявляти порушення електричних з’єднань та запобігати нештатним режимам роботи. Контроль струмів забезпечує можливість оцінки внутрішнього стану акумуляторів та визначення миттєвих значень потужності. Вимірювання температури дає змогу оцінити теплові режими роботи акумуляторів та сформувати керуючі впливи для системи охолодження [12].

З метою організації взаємодії з системою верхнього рівня реалізовано передачу даних за допомогою інтерфейсу RS-485 із використанням протоколу ModBus RTU. У межах даного протоколу формується адресний простір регістрів, який забезпечує структуровану передачу інформації для подальшої візуалізації та аналітичного опрацювання в людино-машинному інтерфейсі та серверній частині системи керування. Опис відповідності між регістрами та фізичними параметрами системи наведено у таблиці 2.1 [13].

Аналіз даних, наведених у таблиці 2.1, показує, що регістри InputRegister0–InputRegister5 відповідають значенням напруг U1–U6 акумуляторної батареї. Регістри InputRegister6–InputRegister11 містять значення струмів I1–I6.

Таблиця 2.1 – Адресний простір повідомлення пакету ModBus RTU та типи даних

Номер Slave-пристрою	Номер регістру	Тип даних у мікро-контролері	Тип змінної на сервері	Позначення та умовна назва змінної
1	0	Int16	InputRegister0(Int32)	U1 (напруга батареї 1)
	1		InputRegister1(Int32)	U1 (напруга батареї2)
	2		InputRegister2(Int32)	U1 (напруга батареї 3)
	3		InputRegister3(Int32)	U1 (напруга батареї 4)
	4		InputRegister4(Int32)	U1 (напруга батареї 5)
	5		InputRegister5(Int32)	U1 (напруга батареї 6)
	6		InputRegister6(Int32)	I1 (струм батареї 1)
	7		InputRegister7(Int32)	I2 (струм батареї 2)
	8		InputRegister8(Int32)	I3 (струм батареї 3)
	9		InputRegister9(Int32)	I4 (струм батареї 4)
	10		InputRegister10(Int32)	I5 (струм батареї 5)
	11		InputRegister11(Int32)	I6 (струм батареї 6)
	12		InputRegister12(Int32)	T1 (температура батареї 1)
	13		InputRegister13(Int32)	T2 (температура батареї 2)
	14		InputRegister14(Int32)	T3 (температура батареї 3)
	15		InputRegister15(Int32)	T4 (температура батареї 4)
	16		InputRegister16(Int32)	T5 (температура батареї 5)
	17		InputRegister17(Int32)	T6 (температура батареї 6)
	18		InputRegister18(Int32)	C (увімкнено/вимкнено охолодження батарей)

Регістри InputRegister12 – InputRegister17 використовуються для передачі температур T1 –T6. Окремий регістр призначений для передачі стану системи охолодження акумуляторів. Така організація адресного простору забезпечує уніфікований доступ до даних та спрощує інтеграцію підсистеми у загальну структуру керування [14].

Функціональна структура модуля контролю реалізована на базі мікроконтролера STM32F103, який забезпечує обробку сигналів та керування периферійними пристроями. Для розширення кількості аналогових каналів

використовується мультиплексор на базі мікросхеми CD74HC4067. Вимірювання температури здійснюється за допомогою цифрових датчиків DS18B20, що підключаються через інтерфейс OneWire. Передача даних до системи верхнього рівня реалізована через інтерфейс RS-485, що забезпечує високу завадостійкість та надійність обміну інформацією [15].

Для ілюстрації структури модуля, взаємодії його складових елементів та інформаційних потоків розроблено структурно-модульну схему, яка зображена на рисунку 2.16.

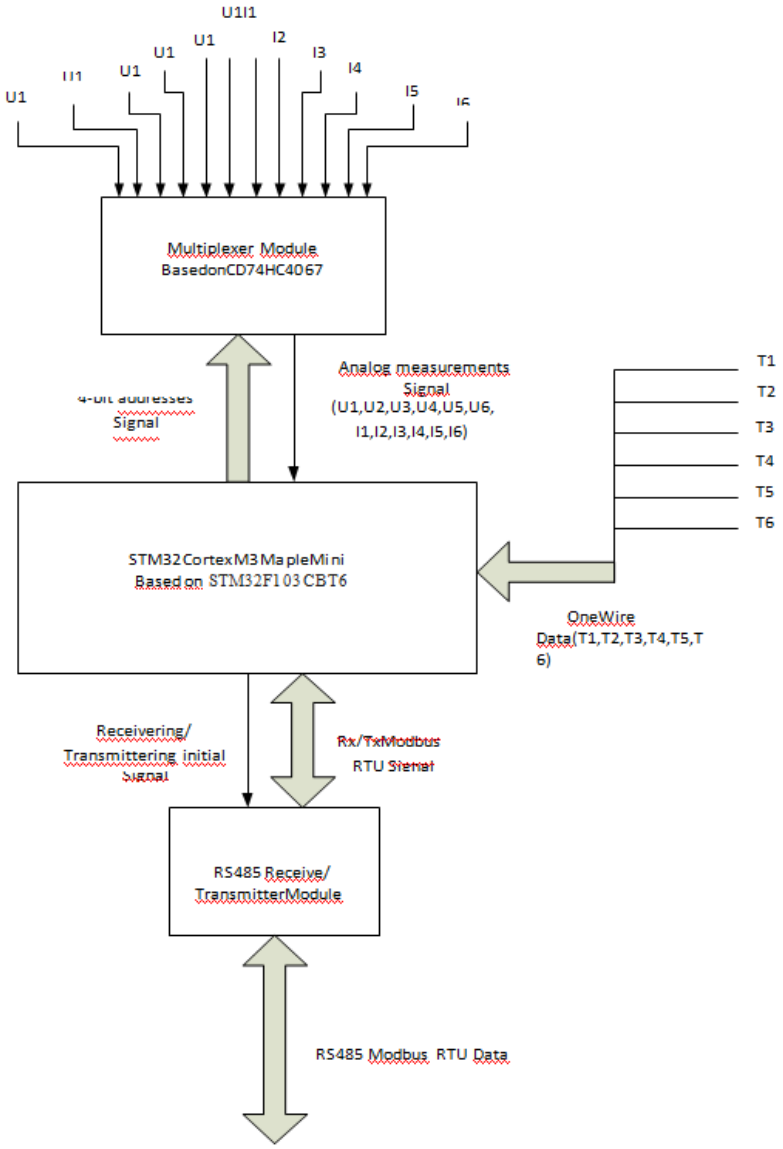

Рисунок 2.16 – Схема пристрою контролю стану акумуляторної частини системи керування

На рисунку 2.16, аналогові сигнали напруг та струмів подаються на мультиплексор, після чого надходять на аналого-цифровий перетворювач мікроконтролера. Дані температури передаються через інтерфейс OneWire. Мікроконтролер виконує обробку отриманої інформації, формує пакети даних та передає їх у систему моніторингу через інтерфейс RS-485 із використанням протоколу ModBus RTU. Така архітектура забезпечує централізовану обробку даних та ефективну інтеграцію у загальну систему керування сонячною електростанцією [15].

Розроблений модуль контролю стану акумуляторної частини забезпечує підвищення надійності функціонування системи, своєчасне виявлення аварійних ситуацій та можливість адаптації до змін умов експлуатації. Застосування мікроконтролера STM32F103 дозволяє реалізувати необхідні функції у режимі реального часу з достатнім рівнем продуктивності та енергоефективності [11–15].

2.4 Розробка електричної принципової схеми

Електрична принципова схема системи моніторингу та керування сонячної електростанції малої потужності розроблена з урахуванням вимог до надійності, електробезпеки, електромагнітної сумісності та відповідності структурній схемі системи. Схема побудована за модульним принципом із чітким розділенням силової, вимірювальної, керуючої та комунікаційної частин, що забезпечує спрощення аналізу, модернізації та обслуговування системи (див. Додаток А).

У складі силової частини передбачено підключення фотоелектричних модулів до контролера заряду через захисні елементи. Вхідна напруга від PV-модулів подається через автоматичний вимикач постійного струму та запобіжник на сонячний контролер заряду типу CM3024Z, який забезпечує стабілізацію процесу заряджання акумуляторної батареї. Акумуляторна батарея номінальною напругою 48 В підключається до виходу контролера через захисний запобіжник, що виконує функцію обмеження струму при аварійних режимах. Далі енергія подається на інвертор типу Fort FX35, який здійснює перетворення постійної

напруги в змінну напругу 230В, 50Гц для живлення навантаження. На виході інвертора встановлюється автоматичний вимикач змінного струму для захисту навантаження та комутації мережі.

Живлення системи керування реалізується за допомогою понижуючого DC-DC перетворювача, який забезпечує формування стабілізованої напруги 5 В від акумуляторної батареї. Додатково використовується лінійний або імпульсний стабілізатор для отримання напруги 3,3В, необхідної для живлення мікроконтролера та периферійних модулів. Таке розділення дозволяє зменшити рівень перешкод і підвищити стабільність роботи цифрових компонентів.

Керуюча частина реалізована на базі мікроконтролера STM32F103C8T6, який виконує функції збору, обробки та передачі даних, а також формує сигнали керування виконавчими елементами. До аналогових входів мікроконтролера підключено датчики напруги та струму, реалізовані на основі вимірювальних модулів із відповідними масштабуючими ланцюгами. Вимірювання температури здійснюється цифровим датчиком DS18B20, який підключається за однопровідним інтерфейсом. Для контролю положення панелей або виявлення вібрацій використовується інерційний модуль MPU-6050, що взаємодіє з мікроконтролером через інтерфейс I2C.

Комунікаційна підсистема включає інтерфейс RS-485, реалізований на базі перетворювача MAX3485, що забезпечує обмін даними за протоколом Modbus RTU з зовнішніми пристроями, зокрема лічильником електроенергії та датчиками струму. Для бездротового обміну даними використовується модуль ESP8266, який підключається до мікроконтролера через UART та забезпечує передачу інформації до віддаленого сервера або SCADA-системи.

Особливу увагу приділено організації заземлення та розділенню аналогових і цифрових кіл. Захисне заземлення (PE) виконується окремою шиною відповідно до вимог електробезпеки та не поєднується безпосередньо з сигнальною «землею» системи. Аналогові та цифрові кола мають спільну точку з’єднання типу «зірка», що дозволяє мінімізувати вплив завад.

2.5 Програмна реалізація системи керування

Програмна реалізація мікроконтролерної системи моніторингу та керування сонячної електростанції малої потужності відображає логічну структуру функціонування програмного забезпечення та базується на циклічному принципі обробки даних. Такий підхід забезпечує безперервний моніторинг параметрів системи та оперативне реагування на зміну умов її функціонування [11–20].

Для наочного представлення логіки роботи програмного забезпечення розроблено алгоритм функціонування системи, який наведено на рисунку Б.1 (див. Додаток Б).

На початковому етапі роботи системи виконується ініціалізація апаратних ресурсів мікроконтролера. Здійснюється налаштування портів введення-виведення, конфігурація аналого-цифрового перетворювача, а також ініціалізація інтерфейсів зв’язку та підключених датчиків. Після завершення ініціалізації виконується перевірка працездатності сенсорів. У разі виявлення несправності система переходить у аварійний режим, формується сигнал про помилку, а подальша робота блокується.

У випадку успішної ініціалізації запускається основний цикл роботи системи. У цьому циклі реалізується послідовне зчитування значень освітленості, температури, струму та положення сонячних панелей. Отримані дані піддаються попередній обробці, яка включає фільтрацію, усереднення та нормалізацію сигналів, що дозволяє зменшити вплив шумів та випадкових відхилень.

Після цього здійснюється аналіз отриманих параметрів та перевірка умов безпеки. Контролюється перевищення допустимих значень температури та струму. У разі виявлення аварійної ситуації система переходить у режим захисту, виконується відключення навантаження, передається повідомлення у систему моніторингу та здійснюється фіксація події.

У разі відсутності аварій визначається необхідність зміни положення сонячних панелей. Рішення приймається на основі аналізу рівня освітленості та даних про орієнтацію. Після цього формується керуючий сигнал широтно-імпульсної модуляції, який подається на сервопривід та забезпечує оптимізацію кута нахилу панелей.

Далі виконується формування інформаційного пакета, який містить ключові параметри роботи системи. Сформований пакет передається через інтерфейс RS-485 у систему верхнього рівня. Завершальним етапом є введення затримки, яка визначає частоту опитування датчиків та забезпечує стабільність роботи системи. Після цього алгоритм повертається до початку циклу, що забезпечує безперервність функціонування системи у режимі реального часу [11–20].

Для наочного представлення логіки роботи програмного забезпечення розроблено алгоритм функціонування системи, який наведено у ДОДАТКУ Б.

У ДОДАТКУ В наведено приклад програмного коду для мікроконтролера відладочної плати STM32 Cortex M3 Maple Mini, написаний у фреймворку Wiring/Arduino-подібному середовищі, який може бути використаний як основа для реалізації модуля контролю стану акумуляторної частини сонячної електростанції малої потужності. У прикладі реалізовано зчитування напруг, струмів і температур, керування вентилятором охолодження та передавання даних через інтерфейс RS-485.

Висновок до розділу

У другому розділі виконано розробку апаратної та програмної частин мікроконтролерної системи моніторингу та керування сонячної електростанції малої потужності. Проведено обґрунтування вибору елементної бази з урахуванням вимог до надійності, продуктивності та енергоефективності системи. В якості основного обчислювального засобу обрано мікроконтролер

STM32, який забезпечує необхідний рівень функціональних можливостей для реалізації задач моніторингу та керування.

Розроблено структурну схему системи, яка відображає взаємозв’язки між її основними підсистемами та забезпечує ефективну організацію інформаційних і енергетичних потоків. Реалізовано алгоритм роботи системи, що базується на циклічному принципі обробки даних та передбачає безперервний контроль параметрів функціонування сонячної електростанції. Забезпечено перевірку аварійних умов та формування відповідних керуючих впливів для підвищення надійності роботи системи.

Розроблено програмне забезпечення мікроконтролера, яке забезпечує збір, обробку та передачу даних у режимі реального часу. Реалізовано взаємодію з датчиками температури, струму та напруги, а також формування керуючих сигналів для виконавчих пристроїв. Передача даних у систему верхнього рівня здійснюється через інтерфейс RS-485 із використанням протоколу ModBus RTU, що забезпечує надійність і завадостійкість обміну інформацією.

Окрему увагу приділено розробці модуля контролю стану акумуляторної частини системи. Забезпечено вимірювання індивідуальних параметрів кожного акумулятора, що дозволяє виявляти розбаланс елементів, контролювати їх технічний стан та підвищувати ефективність експлуатації акумуляторної підсистеми. Реалізовано функції контролю температури та керування системою охолодження, що сприяє підвищенню безпеки роботи системи.

Отримані результати підтверджують можливість ефективної реалізації мікроконтролерної системи моніторингу та керування сонячної електростанції малої потужності. Запропоновані технічні рішення забезпечують підвищення надійності, енергоефективності та функціональності системи в умовах змінних режимів роботи.

СЕРВЕРНА ЧАСТИНА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ТА МОНІТОРИНГУ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ МАЛОЇ ПОТУЖНОСТІ

3.1 Архітектура та середовище реалізації

Серверна частина системи моніторингу та керування сонячної електростанції малої потужності реалізована на основі взаємодії мікроконтролерного рівня, комунікаційного інтерфейсу та програмного середовища Node-RED. Основною функцією серверного рівня є забезпечення збору, обробки, збереження та візуалізації даних, що надходять від підсистеми контролю акумуляторного блоку. На нижньому рівні системи використовується мікроконтролер STM32 [21–23]. Він виконує опитування сенсорів температури, струму та напруги. Також мікроконтролер здійснює первинну обробку сигналів. Сформовані дані передаються до серверної частини через інтерфейс RS-485.

Для передачі використовується протокол ModBus RTU. Це забезпечує надійний та завадостійкий обмін інформацією на промисловому рівні. У серверній частині дані надходять до середовища Node-RED [24]. Це середовище функціонує на базі платформи Node.js. Воно реалізує обробку інформаційних потоків у режимі реального часу [25]. Обробка виконується за допомогою функціональних вузлів. Вузли здійснюють приймання, фільтрацію, аналіз та передачу даних. У межах серверної логіки реалізовано алгоритми оцінки стану акумуляторної системи. Вони дозволяють виявляти відхилення від нормальних режимів роботи. У разі виникнення аварійних ситуацій формується сигнал тривоги. Після обробки дані передаються до зовнішніх інформаційних систем. До них належать SCADA та IoT-платформи [26]. Передача здійснюється із використанням протоколів MQTT або HTTP. Це забезпечує централізований моніторинг та архівацію даних. Також реалізовано доступ клієнтських пристроїв до системи. Доступ здійснюється через веб-інтерфейс. Це дозволяє оператору

контролювати стан системи у реальному часі. Оператор може аналізувати історичні дані. Також забезпечується отримання повідомлень про аварійні режими. Таким чином запропонована архітектура серверної частини забезпечує інтеграцію мікроконтролерного рівня з інформаційно-аналітичними системами. Це підвищує ефективність керування та надійність функціонування сонячної електростанції малої потужності.

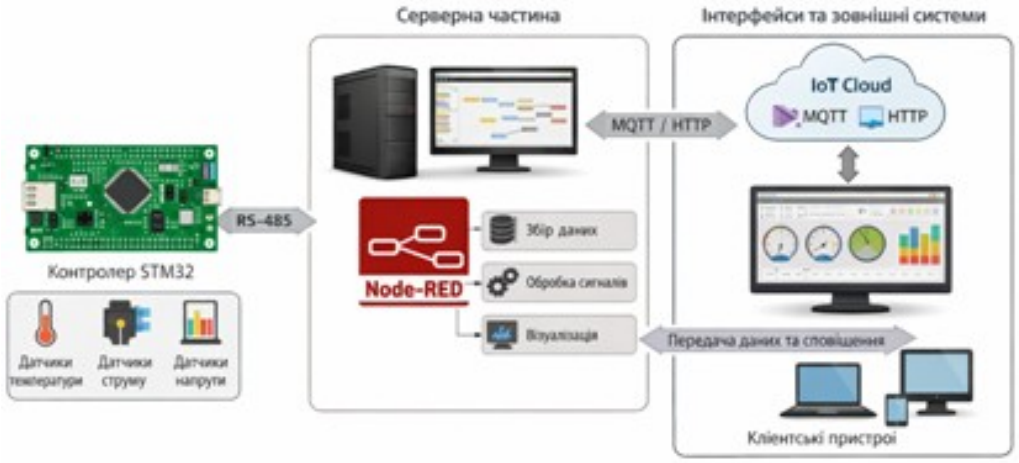

Рисунок 3.1 – Структурна схема серверної частини системи моніторингу та керування сонячної електростанції

На рисунку 3.1 представлено структурну схему серверної частини системи моніторингу та керування сонячної електростанції малої потужності, яка побудована на основі взаємодії мікроконтролерної підсистеми збору даних, комунікаційного інтерфейсу та серверного програмного середовища Node-RED [27]. На нижньому рівні функціонування системи розташований мікроконтролер STM32, який здійснює опитування підключених сенсорів температури, струму та напруги акумуляторного блоку [28]. Мікроконтролер виконує первинну обробку виміряних даних та формує структуровані пакети для подальшої передачі. Передача даних від мікроконтролера до серверної частини реалізується за допомогою інтерфейсу RS-485, який забезпечує підвищену завадостійкість, надійність та можливість роботи на значних відстанях [29]. У серверній частині

системи дані надходять до середовища Node-RED, яке функціонує на базі платформи Node.js [30]. Це середовище реалізує обробку інформаційних потоків у режимі реального часу шляхом використання функціональних вузлів. Вузли виконують операції збору, фільтрації, аналізу та збереження даних. У межах даного середовища реалізовано логіку обробки параметрів стану акумуляторної системи. Вона включає визначення відхилень від нормальних режимів роботи та формування сигналів тривоги у випадку виникнення аварійних ситуацій [31].

Після обробки інформація передається до зовнішніх систем верхнього рівня. До них належать SCADA або IoT-платформи. Передача здійснюється із використанням протоколів MQTT або HTTP. Це забезпечує централізований моніторинг, архівацію та візуалізацію параметрів функціонування сонячної електростанції [32].

Крім того, передбачено можливість доступу клієнтських пристроїв, таких як персональні комп’ютери, планшети або смартфони, до інтерфейсу системи. Це дозволяє оператору здійснювати контроль стану системи в режимі реального часу. Також забезпечується аналіз історичних даних та отримання повідомлень про аварійні або критичні режими роботи. У результаті запропонована структура серверної частини забезпечує надійну інтеграцію мікроконтролерного рівня з інформаційно-аналітичними системами. Це підвищує ефективність керування та рівень автоматизації сонячної електростанції малої потужності.

3.2 Логіка роботи системи керування підключенням станції до електричної мережі будинку

Для забезпечення можливості підключення сонячної електростанції до електричної мережі будинку як джерела альтернативного живлення необхідно активувати серверну частину системи керування. Активація системи здійснюється шляхом введення спеціального строкового коду у відповідному полі людино-машинного інтерфейсу, реалізованого у середовищі Node-RED [27].

Деактивація системи виконується шляхом введення довільного строкового значення, яке не відповідає заданому коду активації. Після успішної активації стає доступною функція автоматичного перемикання джерела живлення будинку. Дана функція забезпечує перехід на живлення від сонячної електростанції у разі відсутності напруги в централізованій мережі електропостачання. Також передбачено автоматичне повернення до живлення від централізованої мережі після відновлення напруги. Для реалізації цієї функції система керування здійснює безперервний моніторинг значень напруги як у централізованій мережі, так і на виході інвертора сонячної станції [28].

Моніторинг виконується у режимі реального часу, що забезпечує своєчасне реагування на зміну умов функціонування системи. Алгоритм прийняття рішення щодо перемикання базується на порівнянні виміряних значень із заданими пороговими рівнями. У разі зникнення напруги в мережі система формує керуючий сигнал для переходу на автономне живлення від інвертора. При відновленні напруги виконується зворотне перемикання.

Окрім автоматичного режиму роботи передбачено можливість ручного керування процесом перемикання джерел живлення. Ручний режим активується оператором через інтерфейс користувача. Перемикання у ручному режимі можливе лише за умови готовності сонячної електростанції до генерації змінної напруги 230В. До таких умов належать достатній рівень заряду акумуляторів, справний стан підсистем та відсутність аварійних сигналів [29].

Реалізація ручного режиму дозволяє оператору здійснювати контроль над системою у нестандартних або аварійних ситуаціях. Обробка логіки керування та формування керуючих сигналів реалізується на серверному рівні із використанням платформи Node.js [30]. Передача команд між підсистемами здійснюється із використанням промислових протоколів обміну даними, зокрема ModBus RTU та MQTT [31].

Реалізована логіка роботи системи забезпечує надійне, гнучке та ефективне керування підключенням сонячної електростанції до електричної мережі будинку, що підвищує рівень автономності та енергоефективності об’єкта.

3.3 Організація людино-машинного інтерфейсу системи керування сонячною електростанцією малої потужності

Важливою характеристикою ефективно організованого людино-машинного інтерфейсу системи керування є лаконічність представлення інформації. Інтерфейс не повинен бути перевантажений надлишковими даними. Це забезпечує можливість швидкої оцінки стану системи оператором. У разі виникнення позаштатних ситуацій оператор має можливість своєчасно приймати відповідні рішення [32].

З урахуванням зазначених вимог людино-машинний інтерфейс системи моніторингу та керування сонячної електростанції малої потужності спроєктовано із винесенням основної інформації у головне вікно оператора та у вікно трендів. У головному вікні відображається поточний системний час.

Також відображається наявність живлення від централізованої мережі та відповідні значення напруги. Додатково відображається інформація про живлення від сонячної електростанції. Вона включає значення напруги на вході та виході контролера заряду акумуляторних батарей.

Також відображаються значення напруги на виході інвертора. У інтерфейсі представлено параметри акумуляторної підсистеми. До них належать значення температури, напруги та струму. Додатково відображається стан системи охолодження акумуляторів. Також формується узагальнена інформація про стан акумуляторної підсистеми. В інтерфейсі відображається інформація про стан трекінгової системи. Окремо реалізовано відображення трендів сигналів. Це дозволяє аналізувати зміну параметрів у часі. Також передбачено ведення архіву подій. Це забезпечує можливість аналізу історичних даних та діагностики системи [33].

Реалізація інтерфейсу виконана у середовищі Node-RED із використанням групи інструментів Dashboard. Загальний вигляд вікна оператора наведено на рисунку 3.2.

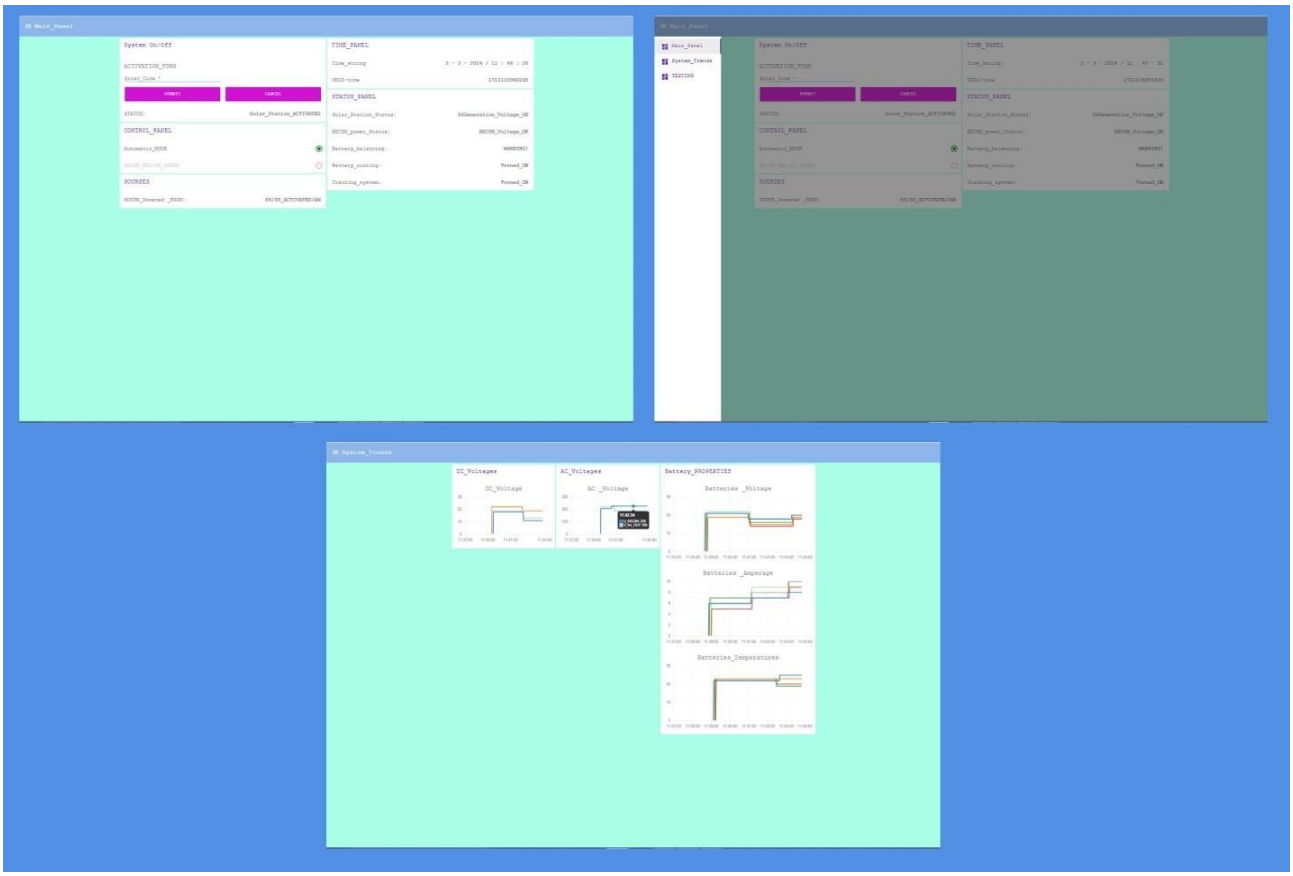

Рисунок 3.2 – Вікна людино-машинного інтерфейсу системи керування сонячною електростанцією малої потужності

Отримання даних для відображення у HMI здійснюється двома способами. Перший спосіб передбачає безпосередню комунікацію з підсистемами. Другий спосіб базується на програмній обробці даних на серверному рівні. Первинні дані, такі як напруга, струм та температура акумуляторів, надходять у систему через інтерфейс RS-485 із використанням протоколу ModBus RTU [34].

Це забезпечує надійний обмін даними між мікроконтролером та серверною частиною. Частина параметрів формується програмно. Для цього використовуються скрипти, реалізовані на платформі Node.js. Зокрема інформація щодо необхідності проведення технічного огляду акумуляторної підсистеми, позначена тегом «Балансування», формується на основі порівняння значень температур, напруг та струмів. При цьому враховуються встановлені порогові значення. Результати порівняння додатково обробляються алгоритмами

аналізу даних. Це дозволяє реалізувати функції інтелектуальної діагностики системи [35].

Розроблений людино-машинний інтерфейс забезпечує ефективну візуалізацію, контроль та аналіз параметрів функціонування сонячної електростанції малої потужності. Це підвищує надійність та ефективність експлуатації системи.

3.4 Структурна організація обробки інформаційних потоків у серверній підсистемі керування сонячною електростанцією

Розробка серверної частини системи керування сонячною електростанцією малої потужності здійснювалася у середовищі Node-RED, яке є графічною надбудовою над програмним середовищем Node.js [36]. Дане середовище забезпечує візуальне програмування шляхом побудови потоків обробки даних у вигляді взаємопов'язаних функціональних вузлів. Node.js являє собою кросплатформене середовище виконання з відкритим вихідним кодом, яке дозволяє виконувати JavaScript-програми поза межами браузера [37].

Основою Node.js є рушій виконання JavaScript V8, розроблений компанією Google. Використання цього середовища дозволяє реалізовувати серверну логіку веб-додатків та систем керування. Для реалізації повного функціоналу серверної частини системи керування у проєкті організовано п'ять основних інформаційних потоків. До них належать потоки «MAIN_PANEL», «Time_Panel», «TRENDS», «TESTING» та «SOURSES». Потік «MAIN_PANEL» забезпечує активацію та деактивацію системи керування. Він також виконує функції координації роботи підсистем. У цьому потоці формується набір подій та аварійних повідомлень. Це дозволяє оцінювати поточний стан системи у реальному часі. Також у межах цього потоку реалізовано відображення основного вікна HMI системи керування. Потік «Time_Panel» відповідає за формування часового інформаційного потоку. Він базується на використанні системного часу у форматі UNIX. Це забезпечує синхронізацію всіх процесів у

системі керування. У даному потоці також реалізовано ініціалізацію процесів архівування даних. Архівуються події, аварійні сигнали, параметри та стани системи. Потік «TRENDS» забезпечує формування та відображення трендів сигналів. Він відповідає за візуалізацію динаміки зміни параметрів системи у часі. Це дозволяє аналізувати поведінку системи та виявляти аномалії [38].

Потік «TESTING» використовується для перевірки працездатності серверної частини системи керування. Він дозволяє здійснювати тестування окремих функціональних вузлів. Також цей потік забезпечує отримання діагностичної інформації для налагодження системи. Потік «SOURSES» формує сукупний інформаційний потік вхідних та вихідних сигналів. У цьому потоці реалізується обробка протоколів обміну даними. Це забезпечує взаємодію між усіма підсистемами системи керування. Також забезпечується інтеграція із зовнішніми інформаційними середовищами [39]. Загальна структура інформаційних потоків та їх взаємодія представлена на рисунку 3.3.

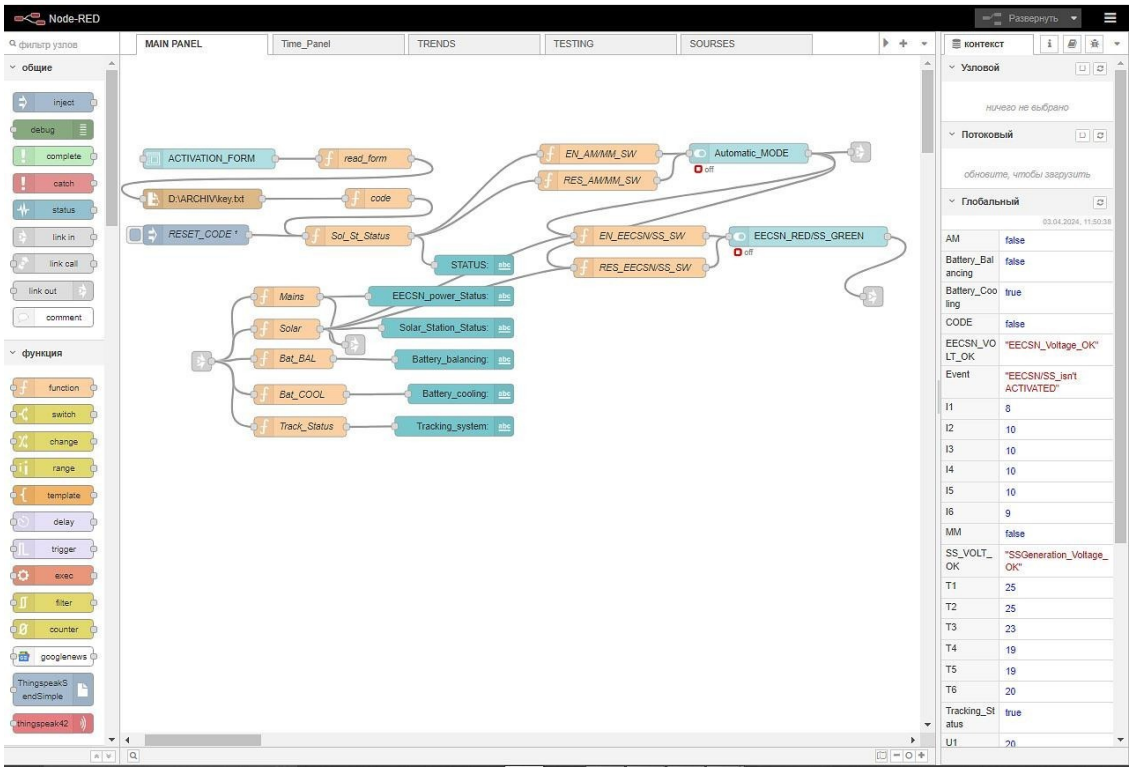

Рисунок 3.3 – Структура інформаційних потоків у серверній частині системи керування сонячною електростанцією малої потужності (Node-RED)

Використання потокової моделі обробки даних дозволяє забезпечити гнучкість та масштабованість системи. Це підвищує ефективність обробки інформації у режимі реального часу. Також це забезпечує надійність функціонування системи керування сонячною електростанцією малої потужності [40-41].

Висновок до розділу

У третьому розділі було розглянуто особливості побудови серверної частини системи моніторингу та керування сонячної електростанції малої потужності. Визначено доцільність використання середовища Node-RED як основи для реалізації серверної логіки системи. Показано, що використання платформи Node.js забезпечує ефективну обробку інформаційних потоків у режимі реального часу. Розроблено архітектуру серверної частини системи, яка включає підсистеми збору, обробки, передачі та візуалізації даних. Встановлено, що взаємодія між мікроконтролерним рівнем та серверною частиною реалізується із використанням інтерфейсу RS-485 та протоколу ModBus RTU, що забезпечує надійний обмін інформацією. Проаналізовано організацію інформаційних потоків у системі керування. Виділено основні функціональні потоки, які забезпечують координацію роботи підсистем, часову синхронізацію, візуалізацію даних, тестування та обробку сигналів. Розроблено людино-машинний інтерфейс системи керування, який забезпечує відображення ключових параметрів роботи сонячної електростанції. Показано, що використання інструментів Dashboard дозволяє реалізувати наочну та зручну систему візуалізації даних. Реалізовано механізм архівування подій та параметрів системи із використанням файлових структур, що забезпечує можливість подальшого аналізу та діагностики. Обґрунтовано доцільність використання формату CSV для збереження даних та UNIX-часу для їх синхронізації. Розроблено веб-клієнт системи керування, який забезпечує дистанційний доступ до функціоналу системи через мережу Інтернет. Встановлено, що веб-інтерфейс

є повним функціональним аналогом локального HMI. Це забезпечує уніфікованість доступу до системи незалежно від типу пристрою користувача. Таким чином, у межах розділу сформовано цілісну серверну архітектуру системи керування сонячною електростанцією малої потужності. Запропоновані рішення забезпечують надійність, масштабованість та ефективність функціонування системи.

Отримані результати створюють основу для подальшого розвитку інтелектуальних енергетичних систем та їх інтеграції у сучасні IoT та SCADA-середовища.

ВИСНОВКИ

У ході виконання дипломної роботи було розроблено мікроконтролерну систему моніторингу та керування сонячної електростанції малої потужності, яка забезпечує ефективне функціонування процесів генерації, накопичення, перетворення та споживання електричної енергії.

Проведено аналіз існуючих підходів до побудови автономних енергетичних систем та визначено основні вимоги до їх ефективного функціонування. Обґрунтовано доцільність використання мікроконтролера STM32 як центрального обчислювально-керуючого елемента системи.

Розроблено структурну та функціональну схеми системи, які відображають взаємодію основних компонентів, включаючи сонячні панелі, контролер заряду, акумуляторний блок, інвертор та підсистеми вимірювання і керування. Запропоновано алгоритми роботи системи керування, які забезпечують автоматичне та ручне перемикання джерел живлення залежно від умов функціонування.

Реалізовано підсистему контролю стану акумуляторів із використанням датчиків температури, струму та напруги. Розроблено серверну частину системи на базі середовища Node-RED, що забезпечує обробку інформаційних потоків, візуалізацію даних та інтеграцію із зовнішніми системами.

Впроваджено людино-машинний інтерфейс, який дозволяє здійснювати моніторинг параметрів у реальному часі та оперативно реагувати на аварійні ситуації. Реалізовано механізм архівування даних та подій, що забезпечує можливість подальшого аналізу та діагностики роботи системи.

Розроблено веб-клієнт, який забезпечує дистанційний доступ до функціоналу системи через мережу Інтернет. Показано, що запропонована система характеризується надійністю, масштабованістю та зручністю експлуатації. Отримані результати можуть бути використані для побудови

ефективних систем автономного енергопостачання та впровадження інтелектуальних енергетичних рішень.

Таким чином, поставлені у дипломній роботі мета та завдання повністю досягнуті, а розроблена система керування сонячною електростанцією малої потужності відповідає сучасним вимогам до автоматизованих енергетичних систем.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА

1 Кудря С. О. Відновлювані джерела енергії : підручник. Київ: ІВЕ НАН України, 2020. 392 с.

2 Messenger R., Ventre J. *Photovoltaic Systems Engineering*. Boca Raton: CRC Press, 2017. 512 p.

3 Lund H. *Renewable Energy Systems*. Cambridge: Academic Press, 2014. 376p.

4 Duffie J. A., Beckman W. A. *Solar Engineering of Thermal Processes*. Hoboken: Wiley, 2013. 910 p.

5 Rihani A. T., Ghandchi M. Increasing the Efficiency of Photovoltaic Systems by Using MPPT. *arXiv*. 2021.

6 Pingel S. et al. Potential-induced degradation in PV modules. *Fraunhofer CSP*. 2010.

7 Değermenci M., Yalman Y., Olcay K. MPPT algorithms for grid-connected solar systems. *Scientific Reports*. 2026.

8 Classification and summarization of MPPT techniques. *Energy Reports*. 2020.

9 Monitoring system for photovoltaic plants: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017.

10 Photovoltaic inverter systems overview. *UcanPower*. URL: https://www.ucanpower.com/ (дата звернення: 07.05.2026).

11 STMicroelectronics. *STM32F103 Datasheet*. URL: https://www.st.com/ (дата звернення: 07.05.2026).

12 Messenger R., Ventre J. *Photovoltaic Systems Engineering*. Boca Raton: CRC Press, 2017. 512 p.

13 Patel M. R. *Wind and Solar Power Systems*. Boca Raton: CRC Press, 2005. 448 p.

14 Maxim Integrated. *DS18B20 Datasheet*. URL: https://www.analog.com/ (дата звернення: 07.05.2026).

15 InvenSense. *MPU-6050 Datasheet*. URL: https://invensense.tdk.com/ (дата звернення: 07.05.2026).

16 Analog Devices. *ACS712 Datasheet*. URL: https://www.analog.com/ (дата звернення: 07.05.2026).

17 Texas Instruments. *RS-485 Standard*. URL: https://www.ti.com/ (дата звернення: 07.05.2026).

18 Rashid M. *Power Electronics Handbook*. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2017. 1512 p.

19 CM3024Z Solar Charge Controller Documentation. URL: https://www.epever.com/ (дата звернення: 07.05.2026).

20 Fort FX35 Inverter Manual. URL: https://fort.ua/ (дата звернення: 07.05.2026).

21 Node-RED. Flow-based programming for the Internet of Things. URL: https://nodered.org/ (дата звернення: 07.05.2026).

22 OpenJS Foundation. Node-RED documentation. URL: https://nodered.org/docs/ (дата звернення: 07.05.2026).

23 Node.js. Official documentation. URL: https://nodejs.org/en/docs/ (дата звернення: 07.05.2026).

24 IBM. Node-RED: A visual tool for wiring the Internet of Things. URL: https://www.ibm.com/ (дата звернення: 07.05.2026).

25 SCADA systems overview and architecture. URL: https://www.scadahacker.com/ (дата звернення: 07.05.2026).

26 Boyer S. C. *SCADA: Supervisory Control and Data Acquisition*. 4th ed. ISA, 2010. 336 p.

27 Node-RED. Node-RED Documentation. URL: https://nodered.org/docs/ (дата звернення: 07.05.2026).

28 IEEE Standard for Interconnection and Interoperability of Distributed Energy Resources with Associated Electric Power Systems Interfaces. *IEEE 1547-2018*.

29 Lasseter R. Microgrids. *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*. 2002.

30 Node.js. Node.js Documentation. URL: https://nodejs.org/en/docs/ (дата звернення: 07.05.2026).

31 Banks A., Gupta R. *MQTT Version 3.1.1*. OASIS Standard. 2014.

32 Few S. *Information Dashboard Design: Displaying Data for At-a-Glance Monitoring*. Burlingame: Analytics Press, 2013. 272 p.

33 Hollifield B., Habibi E. *The Alarm Management Handbook*. 2nd ed. ISA, 2010. 216 p.

34 Modbus Organization. *Modbus Application Protocol Specification V1.1b3*. 2012.

35 Node-RED. Node-RED Dashboard Documentation. URL: https://flows.nodered.org/ node/node-red-dashboard (дата звернення: 07.05.2026).

36 Tanenbaum A. S., Wetherall D. J. *Computer Networks*. 5th ed. Pearson, 2011. 960 p.

37 IEC 61724-1:2017. *Photovoltaic system performance – Monitoring*. Geneva : IEC, 2017.

38 IEC 62109-1:2010. *Safety of power converters for use in photovoltaic power systems*. Geneva : IEC, 2010.

39 ISO 50001:2018. *Energy management systems – Requirements with guidance for use*. Geneva : ISO, 2018.

40 IEEE Std 519-2014. *Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems*. New York : IEEE, 2014.

41 IEC 61000-4-30:2015. *Electromagnetic compatibility (EMC) – Power quality measurement methods*. Geneva: IEC, 2015.