

Хмельницький національний університет
Факультет інформаційних технологій
Кафедра автоматизації, комп'ютерно-інтегрованих технологій та робототехніки

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Автоматизована система інтелектуального керування та розподілу

Назва теми

енергоресурсів локального житлового об'єкта

Рівень вищої освіти Перший (бакалаврський)

Галузь знань 15 – Автоматизація та приладобудування

Спеціальність 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

Освітня програма «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

КвРАКІТ. 022102.01.11.ПЗ

Шифр

Виконав здобувач 4 курсу, група АКІТ-22-1

Шифр


Підпис

Мирослав МАНАЧИН

Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Керівник канд. техн. наук, доц.

Науковий ступінь, учене звання


Підпис

Микола ФЕДУЛА

Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Нормоконтролер канд. техн. наук, доц.

Науковий ступінь, учене звання


Підпис

Галина РАДЕЛЬЧУК

Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

До захисту допускаю:

Завідувач кафедри автоматизації,
комп'ютерно-інтегрованих технологій та
робототехніки


Підпис

Людмила КОРЕЦЬКА

Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

17.06.2026р.
Дата

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет Інформаційних технологій
Кафедра Автоматизації, комп'ютерно-інтегрованих технологій та робототехніки
Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)
Галузь знань 15 – Автоматизація та приладобудування
Спеціальність 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
Освітня програма Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри АКИТтаР

Людмила КОРЕЦЬКА

07 лютого 2026 р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

Маначину Мирославу Миколайовичу

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1 Тема роботи Автоматизована система інтелектуального керування та розподілу енергоресурсів локального житлового об'єкта

Керівник роботи канд. техн. наук, доц. Микола ФЕДУЛА

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, учене звання

Затверджено наказом ректора університету від 20.01.2026 р. №

2 Строк подання студентом роботи на кафедру 02.06.2026 р.

3 Вихідні дані до роботи Матеріали переддипломної практики



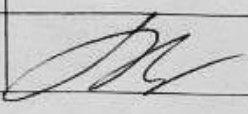
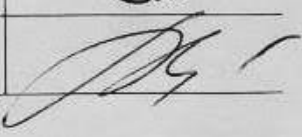
4 Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

Вступ. Дослідження систем HEMS, розробка математичної моделі. Розробка схем автоматизації. Моделювання та оцінка ефективності системи.

5 Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень)

Презентаційні матеріали (слайди)

6 Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

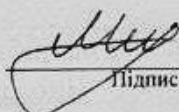
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Антиплагіат	Федула М. В., доцент кафедри АКИТтаР		
Нормоконтроль	Радельчук Г. І., доцент кафедри АКИТтаР		

7 Дата видачі завдання 07 лютого 2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

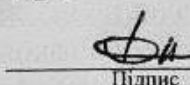
Назва розділу кваліфікаційної роботи	Строк виконання	Примітка
1 Вибір та затвердження теми кваліфікаційної роботи, розробка завдання на кваліфікаційну роботу, складання календарного графіка виконання кваліфікаційної роботи	01.03.2026	Виконано
2 Вивчення предметної області, в якій планується використання системи автоматизації, аналіз вимог до системи автоматизації	15.03.2026	Виконано
3 Проектування та розробка загальної архітектури і структури системи автоматизації, інтерфейсу користувача, вибір засобів реалізації системи автоматизації	29.03.2026	Виконано
4 Програмна реалізація та тестування системи автоматизації	12.04.2026	Виконано
5 Написання тексту пояснювальної записки та розробка графічних матеріалів	19.04.2026	Виконано
6 Остаточне корегування кваліфікаційної роботи з урахуванням зауважень керівника, оформлення кваліфікаційної роботи як документа згідно вимог	11.05.2026	Виконано
7 Отримання супровідних документів (відгуку керівника, рецензії, довідку про перевірку на плагіат), нормконтроль	30.05.2026	Виконано
8 Підготовка до захисту та захист кваліфікаційної роботи	03.06.2026	Виконано

Студент


Підпис

Мирослав МАНАЧИН
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Керівник кваліфікаційної роботи


Підпис

Микола ФЕДУЛА
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

АНОТАЦІЯ

Тема кваліфікаційної роботи: «Автоматизована система інтелектуального керування та розподілу енергоресурсів локального житлового об'єкта».

Автор роботи: Мирослав МАНАЧИН

Керівник роботи: Микола ФЕДУЛА

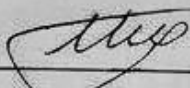
Пояснювальна записка: 67 с., 23 рис., 3 табл., 1 дод., 48 джерел.

Графічна частина: 12 презентаційних слайдів.

СИСТЕМА HEMS, МІКРОКОНТРОЛЕР, ІНТЕЛЕКТУАЛЬНЕ КЕРУВАННЯ, НЕЧІТКА ЛОГІКА, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ, АВТОМАТИЗАЦІЯ, ІНТЕРНЕТ РЕЧЕЙ, РОЗУМНИЙ БУДИНОК.

Мета роботи: розробити автоматизовану систему інтелектуального керування та розподілу енергії локального житлового об'єкта (HEMS) на базі мікроконтролера з використанням нечіткої логіки.

Розроблено базу правил нечіткого логічного контролера типу Мамдані (Mamdani FLC) для мікроконтролера ESP32, яка забезпечує пріоритетне живлення будинку від сонячної станції та накопичувача, раціональний захисний заряд акумулятора від міської мережі у денний і нічний час та блокування запуску паливного генератора за наявності альтернативного джерела живлення. Показано, що впровадження інтелектуальної системи автоматизації дозволило знизити загальні добові фінансові витрати на оплату електроенергії на 34,5%, скоротити споживання з центральної мережі у дорогі пікові години на 68,3%, а завдяки методу дефазифікації «центра мас» усунуто брязкання реле, що зменшило кількість комутацій силових контакторів за добу в 3,2 рази та суттєво подовжило експлуатаційний ресурс обладнання, що повністю відповідає поставленому завданню.



Підпис студента

02.06.2026

Дата

ЗМІСТ

ВСТУП	6
1 ДОСЛІДЖЕННЯ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ СИСТЕМИ HEMS	8
1.1 Концепція Smart Home та систем керування домашньою енергією (HEMS)	8
1.2 Огляд сучасних технологій локальної генерації, накопичення та споживання енергії	11
1.3 Аналіз протоколів зв'язку та архітектур побудови IoT-систем в автоматизації	15
1.4 Постановка задачі проєктування та обґрунтування використання інтелектуальних методів	17
1.5 Висновки до першого розділу	19
2 МАТЕМАТИЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТА АЛГОРИТМИ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ НА БАЗІ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ	21
2.1 Математична модель балансу енергії локального житлового об'єкта	21
2.2 Розробка структури системи нечіткого логічного виведення (Fuzzy Logic Controller)	24
2.3 Фазифікація вхідних змінних (тариф, заряд АКБ, генерація СЕС) та побудова функцій належності	27
2.4 Формування бази правил нечіткої логіки та алгоритм дефазифікації керуючих дій	31
2.5 Висновки до другого розділу	35
3 ПРОГРАМНО-АПАРАТНА РЕАЛІЗАЦІЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ТА РОЗПОДІЛУ ЕНЕРГОРЕСУРСІВ	36

					КвРАКІТ. 022102.01.11.ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Автоматизована система інтелектуального керування та розподілу енергоресурсів локального житлового об'єкта Пояснювальна записка	Літ.	Арк.	Аркушів
Розроб.		Маначин М. М.		02.06.2026				
Перевір.		Федула М. В.		02.06.2026			4	67
Реценз.						ХНУ, АКІТ-22-1		
Н. Контр.		Радельчук Г. І.		02.06.2026				
Затверд.		Корецька Л. О.		02.06.2026				

3.1 Обґрунтування та вибір компонентної бази системи автоматизації на базі мікроконтролерів	36
3.2 Розробка структурної та функціональної схем автоматизованої системи керування	41
3.3 Розробка алгоритму роботи програмного забезпечення мікроконтролера автоматизованої системи керування	45
3.4 Висновки до третього розділу	49
4 ТЕСТУВАННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ТА ОЦІНКА ЇЇ ЕФЕКТИВНОСТІ	50
4.1 Протокол тестування та симуляція алгоритмів у середовищі Python	50
4.2 Моделювання роботи інтелектуальної системи.....	54
4.3 Оцінка техніко-економічної ефективності та енергозбереження	57
4.4 Висновки до четвертого розділу	59
ВИСНОВКИ	60
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	62
ДОДАТОК А	68

					<i>КвРАКІТ. 022102.01.11.ПЗ</i>	Арк.
						5
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

ВСТУП

Сучасний етап розвитку житлово-комунального сектору характеризується стрімким зростанням вартості енергоресурсів та активним впровадженням відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), таких як сонячні панелі та локальні акумуляторні системи. Традиційні системи автоматизації будівель (Smart Home) переважно виконують функції релейного керування за жорсткими часовими графіками, що не дозволяє ефективно враховувати динамічні чинники: коливання тарифів на електроенергію, зміну погодних умов та непередбачуваність поведінки споживачів.

Створення автоматизованих систем інтелектуального керування на базі сучасних мікроконтролерів із застосуванням апарату нечіткої логіки є актуальною науково-практичною задачею. Це дозволяє оптимізувати розподіл енергоресурсів локального житлового об'єкта в умовах невизначеності, знизити витрати на енергоспоживання та підвищити автономність об'єкта без значних капіталовкладень у дороге промислове обладнання.

Мета дослідження є підвищення ефективності використання енергоресурсів та автономності локального житлового об'єкта шляхом розробки автоматизованої системи інтелектуального керування та розподілу енергії на базі мікроконтролерів із використанням алгоритмів нечіткої логіки. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- проаналізувати існуючі підходи та технічні рішення для керування локальними енергетичними мікромережами та системами HEMS (Home Energy Management Systems);
- обґрунтувати архітектуру системи автоматизації та обрати апаратну базу на основі сучасних мікроконтролерів і бездротових протоколів зв'язку;
- розробити математичне забезпечення та інтелектуальний алгоритм розподілу енергії на основі теорії нечіткої логіки (fuzzy logic);

					КвРАКІТ. 022102.01.11.ПЗ	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

– розробити структурну, функціональну та принципову схеми автоматизованої системи;

– виконати моделювання роботи розробленої системи інтелектуального керування для оцінки її ефективності та економічної доцільності.

Об’єкт дослідження – процеси споживання, генерації та розподілу електричної енергії в межах локального житлового об’єкта (приватного будинку).

Предмет дослідження – методи, алгоритми інтелектуального керування та мікроконтролерні засоби автоматизації розподілу енергоресурсів локального житлового об’єкта.

Для вирішення поставлених завдань використано методи теорії автоматичного керування, теорію нечіткої логіки для формування керуючих впливів в умовах невизначеності, методи комп’ютерного моделювання (у середовищі Python) для аналізу ефективності алгоритмів, та методи системного аналізу для проектування архітектури системи.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у вдосконаленні алгоритму динамічного розподілу енергії між центральною мережею, локальною генерацією (СЕС) та акумуляторами за рахунок впровадження нечіткої логіки, що дозволяє адаптувати роботу системи до багатокритеріальних умов (мінімізація вартості за двозонним тарифом при максимізації ресурсу АКБ).

Практичне значення отриманих результатів полягає у розробці доступної та масштабованої мікроконтролерної системи керування енергоспоживанням житлового будинку, яка може бути інтегрована в існуючі інженерні мережі для зниження фінансових витрат на оплату електроенергії.

					<i>КвРАКІТ. 022102.01.11.ПЗ</i>	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ЕНЕРГОРЕСУРСАМИ ЖИТЛОВИХ ОБ'ЄКТІВ

1.1 Концепція Smart Home та систем керування домашньою енергією

Сучасний етап розвитку житлового будівництва та комунальної інфраструктури характеризується глобальним трендом на цифровізацію, децентралізацію енергопостачання та підвищення енергоефективності. Одним із ключових інструментів реалізації цих завдань є технологія «розумного будинку» (рисунк 1.1) та її спеціалізоване відгалуження системи керування домашньою енергією (home energy management systems, HEMS).



Рисунок 1.1 – Розумний будинок (Smart Home) [1]

Класична концепція Smart Home традиційно орієнтована на підвищення комфорту, безпеки та автоматизацію побутових процесів. Вона охоплює такі підсистеми, як:

- автоматизоване керування освітленням;
- клімат-контроль (опалення, вентиляція, кондиціонування);
- мультимедійні системи;

					КвРАКІТ. 022102.01.11.ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

– системи безпеки (відеонагляд, контроль доступу, виявлення витоків води та газу).

Проте в умовах постійного зростання тарифів на первинні енергоносії та впровадження концепції Smart Grid (розумних енергомереж) виникла гостра потреба у виділенні окремого інтелектуального рівня автоматизації.

HEMS (home energy management system) – це комплексна комп'ютерно-інтегрована система, що поєднує апаратні засоби (датчики, актуатори, мікроконтролери) та спеціалізоване програмне забезпечення для моніторингу, аналізу, прогнозування та оптимізації процесів споживання, генерації та накопичення енергії в межах локального об'єкта. Сучасна система HEMS функціонує як багаторівнева структура (рисунок 1.2), яка вирішує колосальний обсяг інженерних завдань.

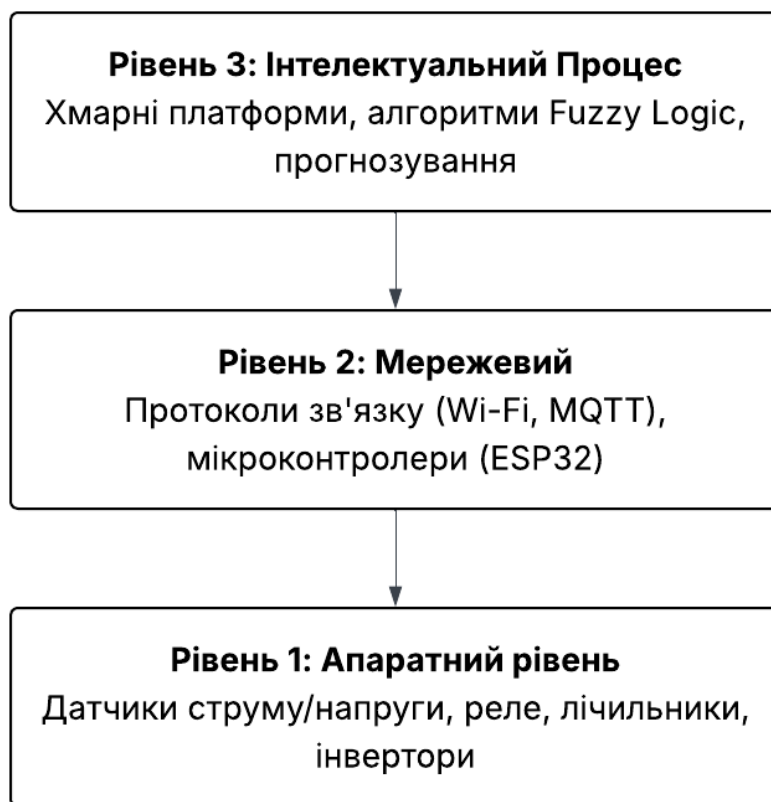


Рисунок 1.2 – Трьохрівнева структура HEMS

Моніторинг та візуалізація (апаратний рівень), безперервний збір даних про миттєву потужність споживання всього будинку та окремих критичних споживачів (бойлери, теплові насоси, електромобілі) за допомогою цифрових вимірювальних модулів. Аналітика та облік (мережевий рівень), накопичення статистичних даних профілю навантаження, визначення часових піків споживання та інтеграція з даними «розумних лічильників» для обліку багатозонних тарифів (день/ніч). Керування та оптимізація (інтелектуальний рівень), автоматичне прийняття рішень щодо перерозподілу потоків потужності між центральною мережею, відновлюваними джерелами енергії та накопичувачами [2]. Для ефективного розподілу енергії система HEMS динамічно поділяє всі побутові прилади локального об'єкта на три основні категорії.

Критичні (нерегульовані) прилади, відключення або затримка роботи яких є неприпустимою через загрозу безпеці чи життєзабезпеченню. Приклади циркуляційні насоси опалення, холодильне обладнання, системи безпеки, сервери, аварійне освітлення. Керовані за часом процеси, роботу яких можна перенести на інший час (наприклад, у період дії дешевого нічного тарифу або піку сонячної генерації) без втрати комфорту. Приклади пральні та посудомийні машини, системи поливу газонів. Акумуляуючі (регульовані за потужністю), споживачі, які мають значну теплову або електричну інерцію і можуть виступати в ролі «віртуальних накопичувачів» енергії. Приклади електричні бойлери, системи електричної теплої підлоги, зарядні станції для електромобілів. Переваги впровадження використання інтелектуальних алгоритмів керування в HEMS дозволяє отримати синергетичний ефект за кількома напрямками.

Зниження фінансових витрат, завдяки зміщенню роботи енергоємних споживачів на нічний час (при двозонному тарифі) економія коштів на оплату електроенергії може досягати 30–40%. Згладжування пікових навантажень, обмеження споживання будинку з мережі у години максимального загальносистемного навантаження, що зменшує знос локальної кабельної

					КвРАКІТ. 022102.01.11.ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

інфраструктури та захисних апаратів. Підвищення автономності, раціональне використання залишку ємності акумуляторних батарей під час аварійних відключень центральної мережі шляхом автоматичного вимкнення неперіоритетних споживачів.

Таким чином, концепція HEMS трансформує житловий об'єкт із пасивного споживача на активного учасника енергетичного ринку, який здатний самостійно забезпечувати баланс між виробництвом та споживанням енергії. Проте ефективне функціонування таких систем ускладнюється високим рівнем невизначеності (зміна погоди, стрибки споживання), що зумовлює необхідність застосування інтелектуальних методів автоматичного керування, зокрема апарату нечіткої логіки.

1.2 Огляд технологій локальної генерації, накопичення та споживання енергії

Ефективність функціонування системи HEMS безпосередньо залежить від фізичних та техніко-економічних характеристик компонентів, що входять до складу локальної енергетичної мікромережі. Для об'єкта, що розглядається, архітектура системи містить чотири базові елементи: централізовану електромережу, відновлюване джерело енергії (сонячна батарея), накопичувач енергії та резервне паливне джерело (генератор).

Локальна генерація на базі сонячної батареї є основним джерелом екологічно чистої відновлюваної енергії. В сучасних житлових об'єктах є сонячні електростанції (рисунки 1.3) які перетворюють сонячне випромінювання на постійний струм (DC). Проте сонячна генерація має стохастичний (випадковий) характер, який залежить від:

- географічного розташування об'єкта та кута нахилу панелей;
- поточного рівня сонячної інсоляції та хмарності;

					<i>КвРАКІТ. 022102.01.11.ПЗ</i>	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

– температури навколишнього середовища (із зростанням температури ккд кремнієвих панелей знижується).



Рисунок 1.3 – Фотоелектричні модулі [3]

Для інтеграції СЕС у загальну мережу будинку використовується інвертор. З інженерної точки зору найдоцільнішим є застосування гібридного інвертора (рисунок 1.4), який поєднує в собі функції класичного мережевого інвертора, зарядного пристрою для акумуляторів та автомата введення резерву (АВР).

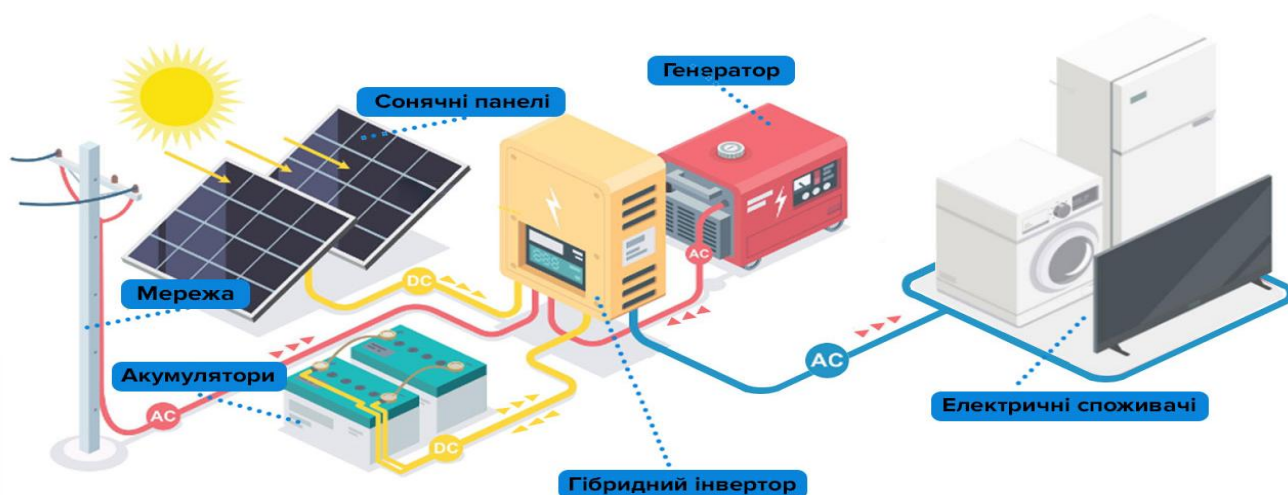


Рисунок 1.4 – Приклад роботи гібридного інвертора [4]

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Для згладжування дисбалансу між графіком генерації СЕС (пік о 12:00–14:00) та графіком споживання будинку (піки вранці та ввечері) необхідна буферна система накопичення енергії (energy storage system, ESS). У даному проєкті обґрунтовано використання літій-залізо-фосфатних акумуляторів (LiFePO₄), які на сьогодні є технологічним стандартом для автономних систем завдяки низці критичних переваг над класичними свинцево-кислотними (Lead-Acid) чи літій-іонними (Li-ion) аналогами. Високий циклічний ресурс LiFePO₄ витримують від 4000 до 6000 циклів заряду/розряду за глибини розряду (DoD) до 80%, тоді як свинцево-кислотні втрачають ємність вже після 300 – 500 циклів. Допускається розряд корисного об'єму батареї до 90% без деградації хімічної структури. Термічна та хімічна стабільність, вони є вибухо та пожежобезпечними, не схильні до самозаймання навіть у разі механічного пошкодження чи перезаряду. Стабільна напруга протягом майже всього циклу розряду акумулятор утримує стабільну номінальну напругу, що спрощує роботу перетворювачів.

Для безпечної експлуатації LiFePO₄ батареї обов'язковим є використання BMS (рисунок 1.5) – це вбудована електронна система автоматики, яка контролює напругу кожної комірки, балансує їх, захищає від перезаряду, глибокого розряду та перегріву, а також передає дані про поточний рівень заряду на верхній рівень керування.

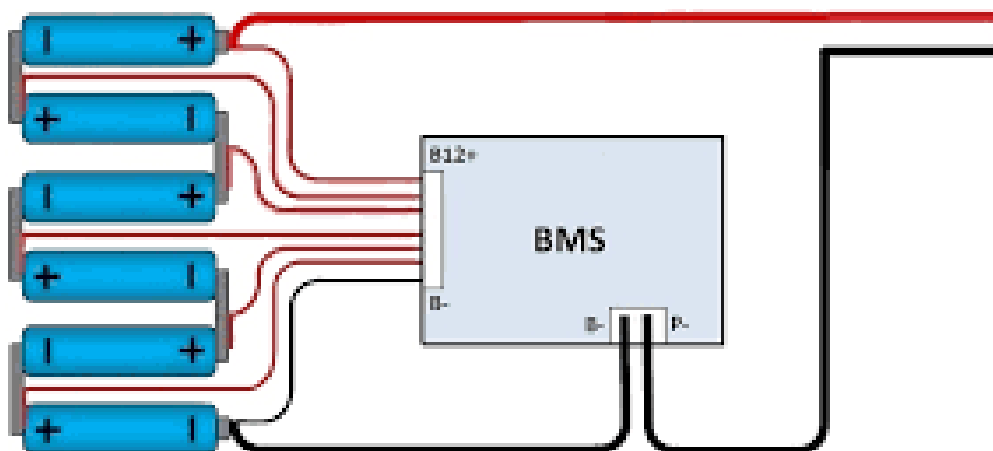


Рисунок 1.5 – Плата BMS [5]

В умовах тривалої відсутності зовнішньої мережі (наприклад, під час аварійних вимкнень та “blackout”) низької потужності сонячних панелей, ємності АКБ може бути недостатньо для покриття базових потреб об'єкта. Для забезпечення абсолютної автономності до системи інтегрується резервний дизельний генератор. Особливості інтеграції генератора (рисунок 1.6) в автоматизовану систему, генератор повинен бути оснащений електростартером та блоком автоматичного керування, що дозволяє мікроконтролеру подавати сухий контакт на запуск двигуна.

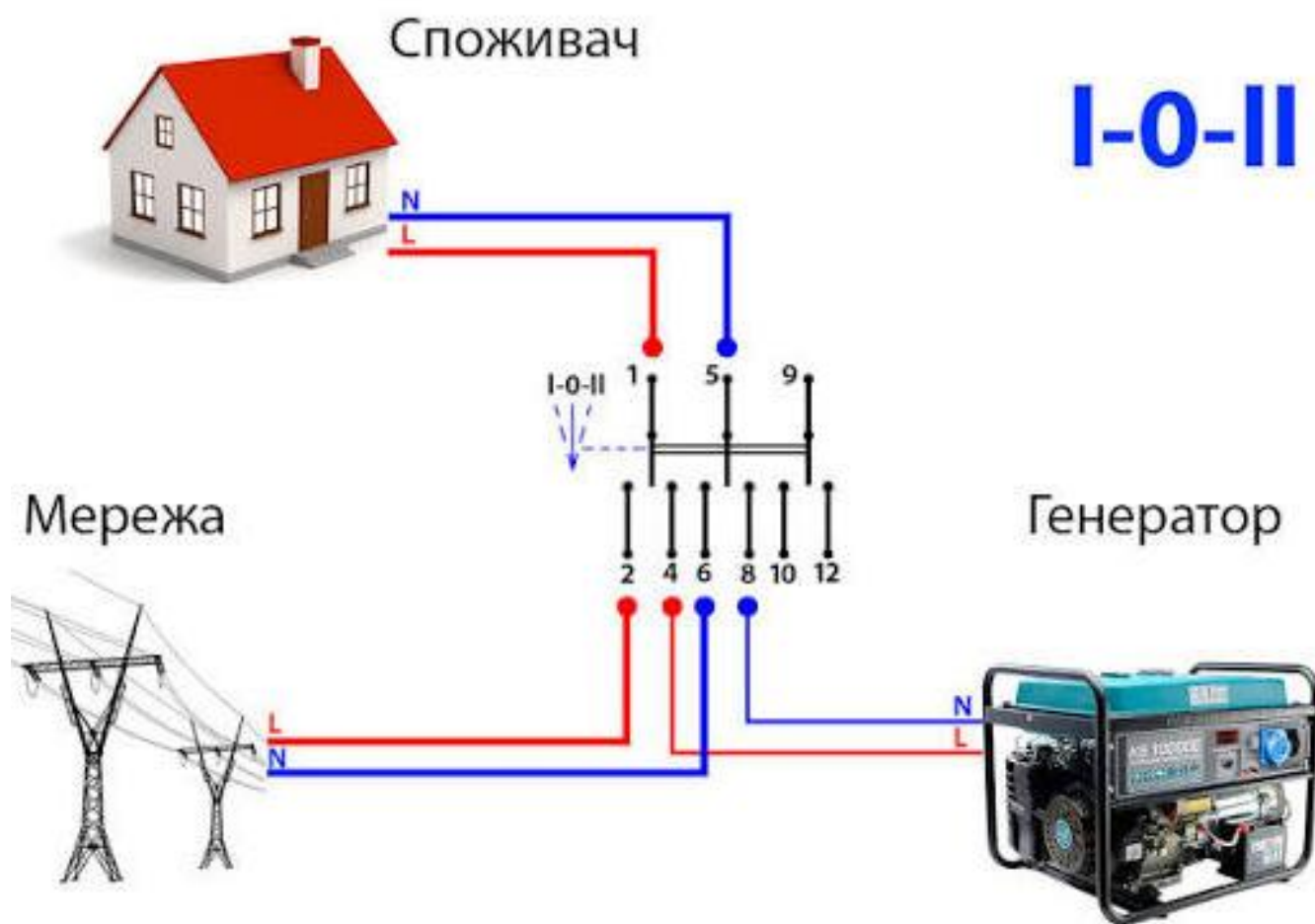


Рисунок 1.6 – Приклад підключення генератора до мережі [6]

Питома витрата палива двигуна внутрішнього згорання є найменшою за умови його навантаження на 70–80% від номінальної потужності. Тому алгоритм керування повинен вмикати генератор не просто для живлення поточної дрібної лінії, а для форсованого заряду АКБ максимальним струмом у поєднанні з

										Арк.
										14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	КвРАКІТ. 022102.01.11.ПЗ					

роботою потужних споживачів. Робота генератора супроводжується шумом, викидами газів та вимагає періодичного сервісного обслуговування (заміна мастила тощо), тому його використання в алгоритмі нечіткої логіки розглядається як «критичний сценарій».

Для подальшої алгоритмізації системи, взаємодію джерел та споживачів можна звести до формули (1.1) динамічного рівняння балансу потужностей в кожен момент часу t :

$$P_{grid}(t) + P_{pv}(t) + P_{bat}^{dis}(t) + P_{gen}(t) = P_{load}(t) + P_{bat}^{ch}(t), \quad (1.1)$$

де $P_{grid}(t)$ – потужність, що споживається з центральної мережі;

$P_{pv}(t)$ – поточна потужність генерації сонячних панелей;

$P_{bat}^{dis}(t) / P_{bat}^{ch}(t)$ – потужність розряду / заряду акумуляторної батареї;

$P_{gen}(t)$ – потужність, що виробляється генератором;

$P_{load}(t)$ – сумарна потужність споживання житлового об'єкта.

Задача інтелектуальної системи нечіткої логіки спираючись на вимірні значення поточних потужностей, тарифів та стану батареї, ухвалювати рішення про конфігурацію цієї формули для мінімізації вартості енергії та збереження ресурсу обладнання.

1.3 Аналіз протоколів зв'язку та архітектур побудови IoT-систем в автоматизації

Розробка автоматизованої системи інтелектуального керування та розподілу енергоресурсів вимагає створення надійної та масштабованої інформаційно-комунікаційної інфраструктури. Оскільки система проектується на базі мікроконтролерів, архітектура обміну даними має поєднувати індустріальні стандарти надійності дротового зв'язку на нижньому (апаратному)

					КвРАКІТ. 022102.01.11.ПЗ	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

рівні з гнучкістю бездротових технологій Інтернету речей (IoT) на мережевому та верхньому рівнях. Дротові промислові інтерфейси апаратного рівня потрібні для збору точних даних про стан силового обладнання (гібридного інвертора, інтелектуального лічильника енергії та системи BMS акумуляторної батареї) бездротові канали зв'язку є небажаними через ризик виникнення радіоперешкод від електромагнітних полів. Тому на цьому рівні стандартом є використання дротових рішень.

Інтерфейс RS-485 та протокол Modbus RTU – це класичний стандарт для систем автоматизації [7]. Передача даних здійснюється по одній екранованій витій парі за допомогою диференційних сигналів, що забезпечує високу завадостійкість на відстанях до 1200 метрів. Гібридні інвертори та цифрові багатотарифні лічильники використовують протокол Modbus RTU (архітектура master/slave), де мікроконтролер виступає в ролі ведучого (master) пристрою, циклічно опитуючи регістри даних (напруга, струм, частота, аварійні прапорці).

Шина CAN (controller area network) використовується переважно для високошвидкісного та надійного зв'язку між мікроконтролером системи керування та BMS-платою LiFePO4 акумулятора. Протокол забезпечує апаратний контроль помилок та пріоритетність повідомлень, що критично для запобігання аварійним режимам роботи АКБ.

Бездротові IoT-технології мережевого рівня потрібні для взаємодії з територіально розподіленими локальними споживачами (розумні розетки, реле керування бойлером, датчики температури в кімнатах) доцільно використовувати бездротові інтерфейси, які зменшують витрати на монтаж кабельних трас. Головна перевага Wi-Fi (IEEE 802.11 b/g/n) полягає у високій швидкості передачі даних та прямій інтеграції з локальним роутером без використання додаткових шлюзів. Сучасні мікроконтролери типу ESP32 мають вбудований Wi-Fi модуль, що робить їх ідеальним центральним вузлом системи. Проте Wi-Fi має відносно високе енергоспоживання, що обмежує його застосування в автономних датчиках, які живляться від батарейок.

					КвРАКІТ. 022102.01.11.ПЗ	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Енергоефективний протокол ZigBee (IEEE 802.15.4), призначений для створення комірчастих (mesh) мереж. Кожен стаціонарний пристрій (наприклад, розумне реле) працює як ретранслятор сигналу, збільшуючи зону покриття. Ідеально підходить для периферійних датчиків системи HEMS, але вимагає наявності координатора (шлюзу) для зв'язку з центральним мікроконтролером [8].

Протоколи передачі даних верхнього рівня (M2M та хмари) потрібні для моніторингу роботи системи користувачем, ведення логів енергоспоживання та віддаленого коригування правил нечіткої логіки, дані мають передаватися на верхній рівень до локального сервера або хмарної платформи.

Протокол MQTT (message queuing telemetry transport) – це легковажний протокол, що функціонує поверх стеку TCP/IP за архітектурою «видавець-підписник» (publish/subscribe) через проміжний брокер (наприклад, mosquitto). Він є стандартом для IoT завдяки мінімальному обсягу службового трафіку (заголовки від 2 байт), що дозволяє мікроконтролеру стабільно працювати навіть за низької якості інтернет-з'єднання [9]. Для візуалізації та диспетчеризації системи HEMS доцільно використовувати локальні сервери автоматизації з відкритим кодом. Вони дозволяють збирати дані з мікроконтролера по MQTT, відображати графіки генерації/споживання на дашборді та надають зручний інтерфейс для інтеграції з мобільними додатками користувача. На основі проведеного аналізу для дипломного проєкту обрано гібридну трирівневу архітектуру.

Нижній рівень, датчики струму/напруги, лічильник та інвертор об'єднуються шиною RS-485 (modbus RTU) для забезпечення максимальної завадостійкості інженерних систем. Середній рівень, центральний мікроконтролер (на базі SoC ESP32) виступає шлюзом та обчислювальним ядром. Він збирає дані по RS-485, виконує на борту математичні розрахунки алгоритму нечіткої логіки, керує виконавчими реле та транслює телеметрію через Wi-Fi. Верхній рівень, хмарний або локальний MQTT-брокер інтегрований

					<i>КвРАКІТ. 022102.01.11.ПЗ</i>	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

із сервером диспетчеризації, що забезпечує збереження бази даних та інтерфейс взаємодії з користувачем.

1.4 Постановка задачі проектування та обґрунтування використання інтелектуальних методів

На основі проведеного аналізу сучасних концепцій HEMS, фізичних характеристик обладнання (СЕС, LiFePO₄, генератор) та комунікаційних протоколів, стає очевидним, що головною інженерною проблемою є розробка алгоритму керування.

Традиційні системи автоматизації використовують детерміновані алгоритми, побудовані на жорсткій логіці типу «якщо-тоді» (boolean logic) або прив'язані до фіксованих часових графіків. Проте локальний житловий об'єкт як об'єкт автоматизації функціонує в умовах високого рівня невизначеності та стохастичності. Випадковий характер сонячної інсоляції, різкі зміни погодних умов, аварійні та планові вимкнення центральної енергомережі. Непередбачуваний графік увімкнення потужних побутових споживачів, зміна пріоритетів користувача протягом доби. Складна структура багатозонних тарифів, де вартість електроенергії суттєво відрізняється у пікові, напівпікові та нічні години.

Спроба врахувати всі ці чинники за допомогою класичних релейних алгоритмів призводить до колосального ускладнення програмного коду, появи суперечливих умов та нестабільної роботи системи. Крім того, традиційні математичні методи оптимізації (наприклад, лінійне чи динамічне програмування) вимагають точних аналітичних моделей об'єкта та значних обчислювальних потужностей, що унеможлиблює їх безпосередню реалізацію на кристалі бюджетних мікроконтролерів. Для вирішення багатокритеріальних задач керування в умовах невизначеності найбільш раціональним є застосування теорії нечіткої логіки (fuzzy logic). Цей підхід має низку критичних переваг для

					КвРАКІТ. 022102.01.11.ПЗ	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

реалізації. Формалізація людського досвіду дозволяє перевести якісні міркування експерта (наприклад: «якщо акумулятор майже розряджений, а тариф дуже високий...») у чіткі математичні алгоритми за допомогою лінгвістичних змінних та функцій належності. Нечіткий контролер (fuzzy logic controller) забезпечує плавну та адекватну зміну керуючих впливів навіть за наявності шумів у вимірювальних каналах або різких стрибків навантаження. Після етапу проектування та налаштування, математичні операції нечіткого виведення зводяться до простих арифметичних порівнянь та базових операцій (min/max), що дозволяє виконувати алгоритм у реальному часі навіть на 32-бітних мікроконтролерах із тактовою частотою до 240 МГц (наприклад, ESP32).

Метою інженерного проектування є розробка автоматизованої системи інтелектуального керування, яка на основі поточних вимірювань повинна мінімізувати фінансові витрати на енергопостачання об'єкта, максимізувати використання енергії СЕС, підтримувати оптимальний режим експлуатації LiFePO4 акумулятора (уникаючи глибокого розряду) та мінімізувати час роботи резервного генератора.

Для досягнення цієї мети у наступних розділах необхідно вирішити такі технічні задачі. Сформулювати структуру нечіткого контролера, визначити набір вхідних (рівень заряду АКБ, поточна інсоляція, тарифна зона, сумарне навантаження) та вихідних (режим роботи інвертора, стан реле неперіоритетних споживачів, команда на запуск генератора) лінгвістичних змінних. Розробити базу продукційних правил нечіткої логіки, яка описує стратегію раціонального розподілу потоків енергії для всіх можливих експлуатаційних сценаріїв. Створити програмне забезпечення для мікроконтролера та виконати комп'ютерне моделювання розроблених алгоритмів для підтвердження працездатності та оцінки реального економічного ефекту від впровадження системи.

1.5 Висновки до першого розділу

					<i>КвРАКІТ. 022102.01.11.ПЗ</i>	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Проведено системний аналіз концепції Smart Home та обґрунтовано необхідність виділення спеціалізованого інтелектуального рівня HEMS (home energy management system) як ефективного інструменту підвищення енергоефективності локальних житлових об'єктів.

Розглянуто технічні характеристики сучасного обладнання мікромереж: обґрунтовано використання фотоелектричних систем, визначено переваги літій-залізо-фосфатних (LiFePO₄) акумуляторів (високий циклічний ресурс, термічна стабільність) та визначено роль паливного генератора як джерела абсолютної автономності в критичних сценаріях.

Виконано порівняльний аналіз інтерфейсів та протоколів зв'язку. Для забезпечення завадостійкості та надійності на апаратному рівні обрано дротову шину RS-485 із протоколом Modbus RTU, а для інтеграції периферійних пристроїв та зв'язку з верхнім рівнем диспетчеризації бездротові технології Wi-Fi та легковажний IoT-протокол MQTT.

Обґрунтовано доцільність застосування апарату нечіткої логіки (fuzzy logic) для керування процесами розподілу енергоресурсів в умовах високої стохастичності зовнішнього середовища та графіків споживання. Сформульовано чітке технічне завдання та декомпозиовано задачу проектування системи для наступних розділів роботи.

					<i>КвРАКІТ. 022102.01.11.ПЗ</i>	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2 МАТЕМАТИЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТА АЛГОРИТМИ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ НА БАЗІ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ

2.1 Математична модель балансу енергії локального житлового об'єкта

Для побудови ефективної системи автоматичного керування необхідно формалізувати процеси генерації, накопичення та споживання електричної енергії у вигляді математичної моделі. Об'єкт дослідження розглядається як динамічна система з декількома джерелами та споживачами енергії, що взаємодіють у реальному часі t [10]. Рівняння миттєвого балансу потужності, в кожен момент часу t у локальній мережі об'єкта має виконуватися фундаментальний закон у формулі (2.1) збереження енергії, який описується рівнянням балансу потужностей:

$$P_{load}(t) = P_{pv}(t) \cdot \eta_{inv} + P_{grid}(t) + P_{bat}^{dis}(t) \cdot \eta_{bat}^{dis} - \frac{P_{bat}^{ch}(t)}{\eta_{bat}^{ch}} + P_{gen}(t), \quad (2.1)$$

де $P_{load}(t)$ – сумарна потужність, що споживається всіма увімкненими приладами об'єкта в момент часу (t) , кВт;

$P_{pv}(t)$ – потужність, яку генерують фотоелектричні сонячні панелі, кВт;

η_{inv} – коефіцієнт корисної дії (ККД) гібридного інвертора при перетворенні постійного струму в змінний ($DC \rightarrow AC$);

$P_{grid}(t)$ – активна потужність, що споживається з централізованої зовнішньої електромережі ($P_{grid} > 0$), кВт;

$P_{bat}^{dis}(t)$, $P_{bat}^{ch}(t)$ – потужність розряду та заряду акумуляторної батареї відповідно, кВт;

η_{bat}^{dis} , η_{bat}^{ch} – ККД процесів розряду та заряду LiFePO₄ акумулятора (враховує втрати в хімічних комірках та BMS);

$P_{gen}(t)$ – активна потужність, що постачається резервним паливним генератором, кВт.

					КвРАКІТ. 022102.01.11.ПЗ	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Головним динамічним елементом системи, що має інтегруючі властивості, є акумуляторна батарея. Поточний стан заряду батареї (state of charge – SoC) визначається у відсотках відносно її номінальної ємності C_{bat} (кВт·год) і розраховується інтегральним методом з рівнянь (2.2)–(2.4) (coulomb counting).

При заряді акумулятора $P_{bat}^{ch}(t) > 0$:

$$SoC(t) = SoC(t_0) + \frac{100}{C_{bat}} \int_{t_0}^t P_{bat}^{ch}(\tau) \cdot \eta_{bat}^{ch} d\tau, \quad (2.2)$$

При розряді акумулятора $P_{bat}^{dis}(t) > 0$:

$$SoC(t) = SoC(t_0) + \frac{100}{C_{bat}} \int_{t_0}^t \frac{P_{bat}^{dis}(\tau)}{\eta_{bat}^{dis}} d\tau. \quad (2.3)$$

Для забезпечення довговічності LiFePO₄ комірок та недопущення їх деградації, накладаються жорсткі технологічні обмеження на граничні значення стану заряду:

$$SoC_{min} \leq SoC(t) \leq SoC_{max}, \quad (2.4)$$

де зазвичай встановлюють $SoC_{min} = 20\%$ (захист від глибокого розряду) та $SoC_{max} = 100\%$ (захист від перезаряду).

Задача інтелектуального керування полягає у мінімізації вартості спожитої енергії за розрахунковий період T (наприклад, доба) при забезпеченні надійності електропостачання. Математично цільова функція F у формулі (2.5) має вигляд:

$$F = \int_0^T (P_{grid}(t) \cdot C_{tar} + P_{gen}(t) \cdot C_{fuel}) dt \rightarrow min, \quad (2.5)$$

					КвРАКІТ. 022102.01.11.ПЗ	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де C_{tar} – динамічна вартість 1 кВт·год електроенергії із зовнішньої мережі відповідно до багатотарифного обліку (двотарифний тариф: нічний коефіцієнт 0.5, денний – 1.0), грн/кВт·год;

C_{fuel} – питома вартість генерації 1 кВт·год енергії за допомогою паливного генератора, що розраховується на основі поточної ціни палива та витрати генератора, грн/кВт·год.

Оскільки ціна палива є високою, $C_{fuel} > C_{tar}^{day} > C_{tar}^{night}$. Тому запуск генератора є виправданим лише тоді, коли зовнішня мережа відсутня ($P_{grid_avail} = 0$), сонячна генерація відсутня ($P_{pv} = 0$), а акумулятор досяг критичного рівня розряду ($SoC = SoC_{min}$). Окрім балансу потужності та обмежень по SoC, математична модель враховує обмеження на максимальні струми та потужності обладнання з рівнянь (2.6)–(2.7).

Обмеження інвертора (максимальна потужність зарядного/розрядного тракту інвертора):

$$P_{bat}^{ch}(t) \leq P_{inv}^{max_ch}, \quad (2.6)$$

$$P_{bat}^{dis}(t) \leq P_{inv}^{max_dis}. \quad (2.7)$$

Обмеження мережі $P_{grid}(t) \leq P_{grid}^{limit}$ (максимальна дозволена потужність за договором із РЕМ, що визначається номіналом вхідного автоматичного вимикача). Обмеження генератора $P_{gen}^{min} \leq P_{grid}(t) \leq P_{gen}^{max}$ (робота паливного генератора є ефективною лише в межах оптимального навантаження, зазвичай не менше 30% і не більше 100% від номіналу). Розроблена математична модель є основою для формування правил нечіткої логіки у наступних підрозділах. Вона дозволяє чітко визначити межі та взаємозв'язки між фізичними величинами, які будуть контролюватися мікроконтролером системи HEMS.

					КвРАКІТ. 022102.01.11.ПЗ	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.2 Розробка структури системи нечіткого логічного виведення (fuzzy logic controller)

Для реалізації інтелектуального керування розподілом енергоресурсів локального об'єкта в умовах невизначеності запроєктовано систему нечіткого логічного виведення. Оскільки вихідні змінні системи мають керувати чіткими фізичними процесами (комутація реле, зміна режимів роботи інвертора, запуск двигуна генератора), як базову архітектуру обрано класичну модель Мамдані (Mamdani-type).

Розробка структури системи нечіткого логічного виведення це процес створення моделі прийняття рішень на основі теорії нечітких множин. Структура типової системи включає 4 обов'язкові етапи, які перетворюють точні вхідні дані на чіткий (числовий) результат. Фазифікація (введення нечіткості), перетворення чітких (скалярних) вхідних значень у нечіткі дані за допомогою функцій належності, система оцінює, наскільки кожна вхідна змінна відповідає певним термам (наприклад, "холодно", "тепло", "гаряче"), приклад вхідна температура 20°C може на 0.2 належати до "холодно" і на 0.8 до "тепло". База знань та нечіткі правила, комплекс логічних правил у форматі "ЯКЩО (умова), ТО (висновок)", що формується експертом, використовують нечіткі логічні операції: AND(мінімум/множення), OR (максимум/алгебраїчна сума) та NOT (доповнення до одиниці). Нечітке логічне виведення (агрегація та активізація), етап обчислення ступеня істинності для кожного правила, агрегація знаходження загального ступеня істинності умови (передумови) правила. Активізація, обрізання або масштабування вихідної функції належності згідно зі ступенем істинності правила. Дефазифікація (приведення до чіткості), перетворення агрегованих нечітких вихідних множин у кінцеве чітке числове значення, яке може використовувати виконавча система. Популярні методи, центроїдний (центр ваги), метод максимуму (найбільший з максимумів) тощо. Популярні алгоритми виведення, алгоритм Мамдані (Mamdani), вихідні результати також є

					КвРАКІТ. 022102.01.11.ПЗ	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

нечіткими множинами, найчастіше використовується для систем підтримки прийняття рішень через інтуїтивну зрозумілість. Алгоритм Сугено (Takagi-Sugeno), виходом правила є математична функція від вхідних змінних (лінійна або константа). Забезпечує швидші обчислення, використовується в автоматичному керуванні.

Структурна схема (рисунок 2.1) розробленого нечіткого контролера (fuzzy logic controller – FLC) інтегрується в загальну структуру програмного забезпечення мікроконтролера та складається з чотирьох послідовних блоків.



Рисунок 2.1 – Структурна схема розробленого нечіткого контролера

Блок фазифікації (введення нечіткості) приймає чіткі числові значення з датчиків струму, напруги та BMS акумулятора. За допомогою функцій належності ці величини перетворюються на ступені належності до відповідних терм-множин лінгвістичних змінних. База продукційних правил це сховище знань, що містить логічні правила типу “ЯКЩО <Умова> ТОДІ <Наслідок>”, які описують раціональну стратегію поведінки системи при різних комбінаціях зовнішніх і внутрішніх чинників. Блок логічного виведення це ядро контролера, яке на основі поточних результатів фазифікації та бази правил визначає результуючу нечітку множину для кожної вихідної змінної, використовуючи операції нечіткого мінімуму (перетин) та максимуму (об'єднання). Блок дефазифікації (усунення нечіткості), перетворює отриману результуючу нечітку множину назад у чітке числове значення (керуючий сигнал) для виконавчих механізмів.

Для забезпечення високої якості керування та недопущення надмірного ускладнення обчислень (що важливо для мікроконтролерів), структуру FLC оптимізовано за кількістю входів та виходів.

Вхідні лінгвістичні змінні системи: X_1 , X_2 , X_3 . Стан заряду батареї (SoC) X_1 , контролює поточну ємність LiFePO4 акумулятора. Діапазон чітких значень: від 0% до 100%. Мережевий тариф (tariff) X_2 , відображає поточну вартість енергії за часовими зонами. Діапазон чітких значень визначається поточним часом та фіксованими коефіцієнтами (від 0.5 до 1.0). Баланс потужності об'єкта (P_{bal}) X_3 , різниця між поточною генерацією сонячних панелей та споживанням будинку ($P_{bal} = P_{pv} \cdot \eta_{inv} - P_{load}$). Якщо значення додатне, є надлишок енергії сонця, якщо від'ємне, дефіцит енергії.

Вихідні лінгвістичні змінні системи: Y_1 , Y_2 , Y_3 . Режим роботи інвертора (Inv_{mode}) Y_1 , визначає пріоритетне джерело енергії для живлення основної мережі будинку та заряду АКБ. Ступінь відсікання навантаження ($Load_{shed}$) Y_2 , визначає команду на вимкнення керованих та акумуляюючих споживачів (бойлер, тепла

					КвРАКІТ. 022102.01.11.ПЗ	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

підлога) у разі дефіциту потужності. Сигнал керування генератором (Gen_{ctrl}) Y_3 , чітка команда на автоматичний запуск або зупинку паливного генератора.

Розроблена структура систему нечіткого логічного виведення дозволяє гнучко адаптувати поведінку системи автоматизації. Вона виступає сполучною ланкою між фізичними параметрами енергетичного балансу та алгоритмами обробки інформації в мікроконтролері.

2.3 Фазифікація вхідних змінних (тариф, заряд АКБ, генерація СЕС) та побудова функцій належності

Фазифікація – це процес перетворення чітких фізичних вимірювань (чисел) у нечіткі терм-множини за допомогою функцій належності. Результатом цього етапу є ступінь істинності (від 0 до 1), з яким вхідна величина відповідає лінгвістичним оцінкам експерта (наприклад, "низька швидкість", "середня", "висока"). Етапи фазифікації та побудови, процес налаштування вхідних змінних складається з чотирьох послідовних кроків. Визначення універсальної множини, встановлюється діапазон можливих значень вхідної змінної. Наприклад, для температури повітря в кімнаті це може бути від 10°C до 40°C . Лінгвістичне квантування, визначається кількість лінгвістичних термів (категорій) та їхні назви. Зазвичай використовують непарну кількість: від 3 до 7 термів (наприклад, низька, середня, висока). вибір типу функції належності, визначається математична форма, що найкраще описує поведінку фізичного параметра. Параметризація експерт або алгоритм задає конкретні числові координати (точки перегину), де функція починає зростати, досягає максимуму (1) та спадає до нуля (0). Популярні типи функцій належності, вибір форми залежить від природи даних, найчастіше застосовуються такі геометрії, трикутна (trimf), задається трьома точками (a, b, c), ідеально підходить для фіксованих цільових значень або там, де потрібен мінімум обчислень. Трапецієподібна (trapmf) Задається чотирма точками (a, b, c, d), має плато на вершині, де ступінь належності стабільно

					КвРАКІТ. 022102.01.11.ПЗ	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

дорівнює (1), використовується для інтервальних значень. Гаусова / Дзвоноподібна (gaussmf), задається середнім значенням та стандартним відхиленням, забезпечує плавні, безперервні переходи без різких зламів, що важливо для високоточних систем автоматичного керування.

Процес фазифікації полягає в переході від чітких числових значень, отриманих від вимірювальних пристроїв і BMS акумулятора, до нечітких величин. Для кожної вхідної лінгвістичної змінної визначено унікальний набір лінгвістичних термів та математичних функцій належності [11]. Для реалізації на базі мікроконтролера ESP32 обґрунтовано використання трикутних та трапецієподібних функцій належності. Вони мають мінімальну обчислювальну складність, оскільки описуються простими лінійними рівняннями, що не перевантажує процесор обчисленнями трансцендентних функцій.

Лінгвістична змінна «Стан заряду батареї» (рисунок 2.2) характеризує поточний рівень енергії в LiFePO₄ акумуляторі. Універсальна множина (дискурс) визначена на інтервалі $U_{SoC} = [0; 100]\%$. Для опису змінної введено три лінгвістичні терми. Low (низький рівень заряду), сигналізує про наближення до критичної межі розряду батареї. Форма функції – ліва трапеція. Medium (нормальний / середній рівень), базовий робочий стан акумулятора. Форма функції – трикутник. High (високий рівень заряду), батарея повністю або майже повністю заряджена, форма функції права трапеція.

Математичні координати опорних точок функцій належності $\mu(\text{SoC})$. Low [0, 0, 20, 40], максимальна належність ($\mu = 1$) на інтервалі від 0% до 20%, спад до 0 при 40%. Medium [25, 50, 75], максимум ($\mu = 1$) в точці 50%, основа трикутника від 25% до 75%. High [60, 80, 100, 100], зростання від 60% до 80%, максимум ($\mu = 1$) на інтервалі від 80% до 100%.

Лінгвістична змінна «Мережевий тариф» (рисунок 2.3) відображає поточну економічну доцільність використання зовнішньої мережі відповідно до діючого двозонного тарифу. Дискурс визначено на інтервалі $U_{tariff} = [0.4; 1.1]$. відносно базової вартості електроенергії. Night (дешевий нічний тариф),

					КвРАКІТ. 022102.01.11.ПЗ	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

коефіцієнт 0.5 від номіналу (діє з 23:00 до 07:00). Форма – ліва трапеція. Day (стандартний денний тариф), коефіцієнт 1.0 від номіналу (діє з 07:00 до 23:00), форма права трапеція.

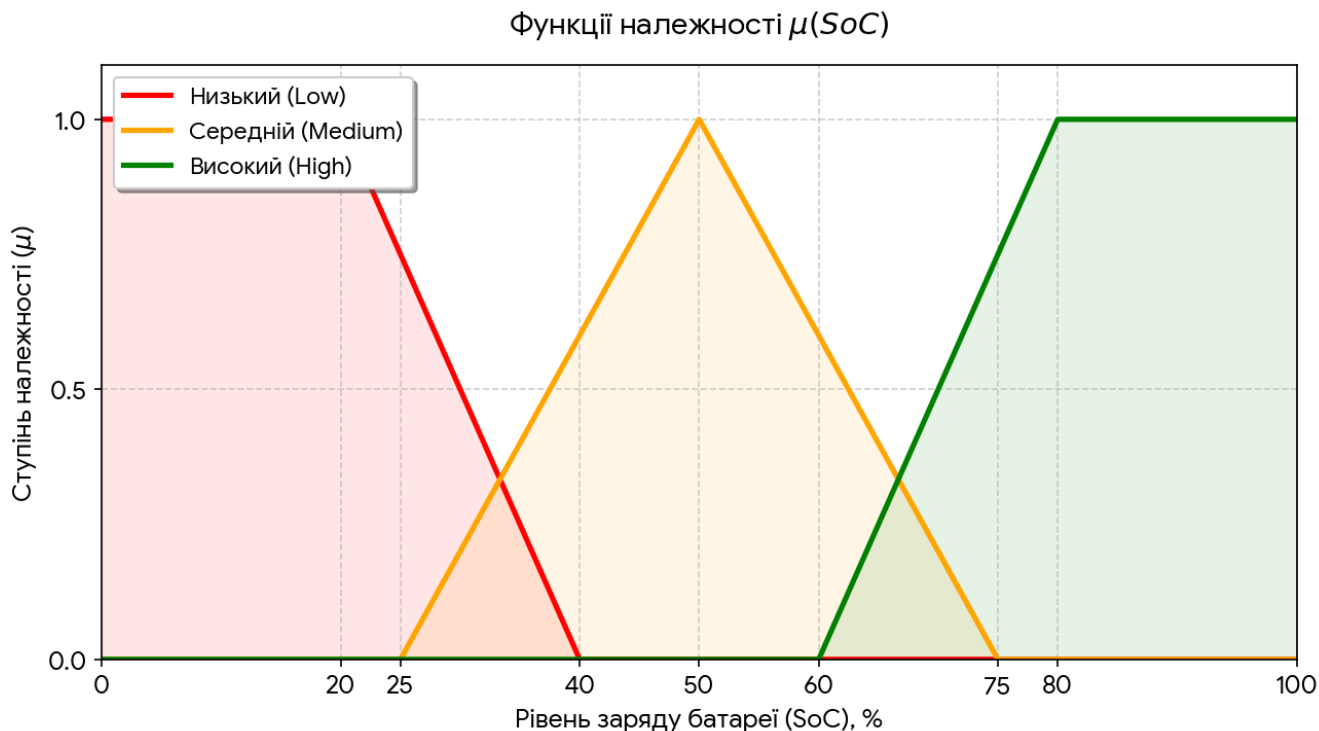


Рисунок 2.2 – Лінгвістична змінна «Стан заряду батареї» (SoC)

Математичні координати опорних точок функцій належності $\mu(\text{Tariff})$. Night [0.4, 0.4, 0.5, 0.7], максимум на інтервалі [0.4; 0.5], спад до 0 при 0.7. Day [0.6, 0.8, 1.1, 1.1], зростання від 0.6 до 0.8, максимум на інтервалі [0.8; 1.1].

Лінгвістична змінна «Баланс потужності об'єкта» (рисунок 2.4) інтегрує в собі показники поточної генерації СЕС та споживання будинку, визначаючи дефіцит або надлишок потужності $P_{bal} = P_{pv_AC} - P_{load}$. Дискурс охоплює як від'ємні, так і додатні значення і для типового приватного будинку визначений на інтервалі $U_{P_{bal}} = [-6.0; +6.0]$ кВт. Визначено три терми. Deficit (значний дефіцит), споживання будинку суттєво перевищує генерацію сонячних панелей (або вона відсутня), форма ліва трапеція. Balance (рівновага), поточна генерація СЕС приблизно дорівнює навантаженню об'єкта, форма трикутник. Surplus

(надлишок), генерація сонячних панелей значно перевищує поточні потреби будинку, форма, права трапеція.

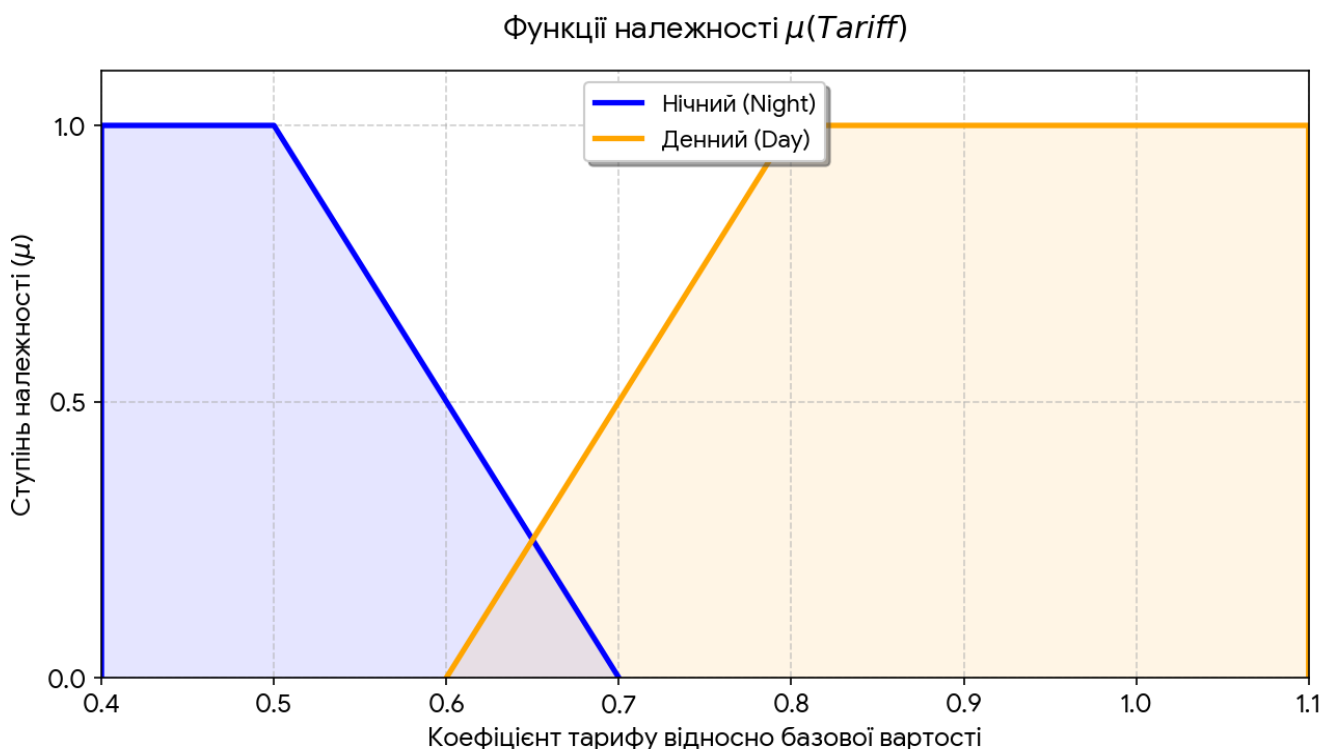


Рисунок 2.3 – Лінгвістична змінна «Мережевий тариф» (*Tariff*)

Математичні координати опорних точок функцій належності $\mu(Pbal)$. Deficit [-6.0, -6.0, -2.0, 0.0] кВт, максимальний дефіцит до -2.0 кВт, спад до нуля в точці 0. Balance [-1.0, 0.0, +1.0] кВт, симетричний трикутник з вершиною в точці нульового балансу. Surplus [0.0, +2.0, +6.0, +6.0] кВт, зростання від 0 до +2.0 кВт, стабільний надлишок від +2.0 кВт і вище.

Описані функції належності дозволяють перетворити будь-які точні вимірювання датчиків у вектори нечітких оцінок. Це забезпечує плавний перехід між станами системи та готує дані для наступного обчислювального етапу логічного виведення за базою правил.

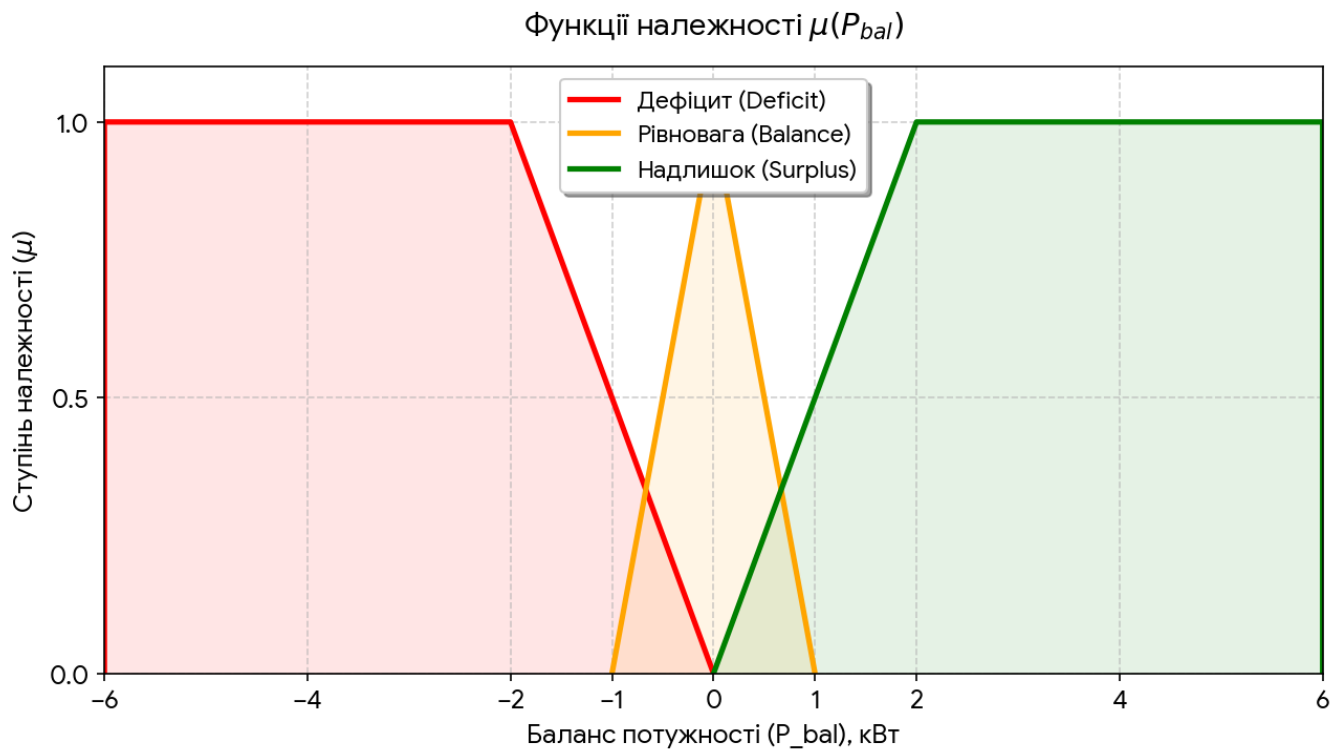


Рисунок 2.4 – Лінгвістична змінна «Баланс потужності об'єкта» (P_{bal})

2.4 Формування бази правил нечіткої логіки та алгоритм дефазифікації керуючих дій

База правил – це ядро нечіткої системи, яке описує логіку керування за допомогою лінгвістичних висловлювань типу «ЯКЩО (умова) – ТО (висновок)». Для формування правил використовують два основні підходи (інференції). Мамдані (Mamdani) у висновку (то) використовуються нечіткі терми, це класичний варіант, зрозумілий людині. Сугено (Sugeno) у висновку (то) замість нечіткого терму використовується математична функція від вхідних змінних або константа цей підхід ефективніший для обчислень. Структура та композиція правил, якщо в умові (якщо) є декілька вхідних змінних, вони об'єднуються логічними зв'язками, Логічне І (кон'юнкція), реалізується за допомогою операції мінімуму (\min), логічне АБО (диз'юнкція), реалізується за допомогою операції максимуму (\max), продовження прикладу з «Температурою». Додамо другу вхідну змінну «Швидкість зміни температури» (терми, падає, стабільна, росте)

					КвРАКІТ. 022102.01.11.ПЗ	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

та вихідну керуючу дію «Потужність кондиціонера» (терми, слабка, середня, максимальна). Приклади правил у базі, rule 1 якщо температура дорівнює гаряче та швидкість дорівнює росте, то потужність дорівнює максимальна. Rule 2, якщо температура дорівнює комфортно та швидкість дорівнює стабільна, то потужність дорівнює слабка. Нечітке виведення та Агрегація (Мамдані), коли на вхід системи надходять конкретні числа, запускається процес виведення, активізація правил (імплікація), для кожного правила визначається ступінь істинності умови. Цим рівнем "зрізається" зверху графік вихідної функції належності цього правила. Агрегація виходів, отримані зрізані графіки від усіх активованих правил об'єднуються в одну спільну результуючу фігуру (зазвичай за допомогою операції (max), алгоритм дефазифікації дефазифікація зворотний процес, який перетворює отриману після агрегації нечітку фігуру у чітке числове значення керуючої дії (наприклад, конкретна напруга на двигуні, відсоток потужності тощо). Існує кілька математичних методів дефазифікації, вибір яких залежить від архітектури системи. Метод центру мас (centroid / center of gravity, COG), найпопулярніший і найточніший метод, чітке вихідне значення обчислюється як геометричний центр площі під кривою агрегованого нечіткого виходу, плюси, плавна зміна вихідного значення при зміні входів, враховує внесок усіх активованих правил. Мінуси, потребує значних обчислювальних ресурсів для інтегрування. Метод центру площі (center of area, COA) Вертикальна лінія ділить площу результуючої фігури на дві абсолютно рівні частини. Метод найбільшого максимуму (largest of maximum, LOM), найменшого максимуму (smallest of maximum, SOM), якщо результуюча фігура має плато (кілька точок з максимальним значенням ($\mu = 1$)), метод LOM обирає найбільше значення з цього діапазону, а SOM найменше. Метод середнього з максимумів (mean of maximum, MOM), обирається середня точка між початком і кінцем плато максимальних значень, плюси, дуже швидкі обчислення, мінуси, вихідний сигнал може змінюватися стрибкоподібно, що небезпечно для механічних приводів.

					КвРАКІТ. 022102.01.11.ПЗ	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

База правил є основою інтелектуальної поведінки системи HEMS. Вона кодифікує інженерні знання про раціональне використання ресурсів та об'єднує вхідні лінгвістичні змінні з вихідними діями через систему продукційних логічних правил. Для системи, що проектується, повна база правил охоплює комбінації всіх термів вхідних змінних ($3_{SoC} \times 2_{traffic} \times 3_{P_{bal}} = 18$ правил). Нижче у таблиці 2.1 наведено ключові правила, що визначають логіку роботи автоматики в різних експлуатаційних режимах.

Таблиця 2.1 – Ключові правила логіки роботи автоматики

Інженерні параметри та змінні контролера	Правило 1: Нічний заряд	Правило 2: Денна економія	Правило 3: Надлишок сонця	Правило 4: Критичний блекаут
Вхід: Заряд акумулятора (SoC)	Low	High	Medium	Low
Вхід: Тарифна зона (Tariff)	Night	Day	Day	Day
Вхід: Енергобаланс СЕС (P_{bal})	Deficit	Deficit	Surplus	Deficit
Вхід: Додаткова умова (Мережа)	Мережа є (Online)	Мережа є (Online)	Мережа є (Online)	Аварія (Offline)
Вихід: Режим інвертора (Inv_{mode})	Grid_Charge	Battery_Priority	Solar_Priority	Islanding
Вихід: Відсікання ліній ($Load_{shed}$)	None	None	None	Maximum
Вихід: Пуск генератора (Gen_{ctrl})	Stop	Stop	Stop	Start

Для обробки правил у реальному часі мікроконтролер використовує схему нечіткого виведення Мамдані. Процес складається з двох етапів, агрегування (активізація умов правил), для кожного i -го правила визначається рівень істинності передумови α_i за допомогою операції логічного мінімуму (min або t -норми) та наведено у формулі (2.8):

$$\alpha_i = \min(\mu_{SoC,i}(SoC), \mu_{tariff,i}(tariff), \mu_{P_{bal},i}(P_{bal})). \quad (2.8)$$

Акумуляція (об'єднання результатів), нечіткі підмножини вихідних змінних зрізаються за рівнем α_i та об'єднуються за допомогою операції логічного максимуму (max або s-норми) для формування результуючої нечіткої області $\mu_{\Sigma}(Y)$. Для отримання точного числового значення керуючого сигналу з результуючої нечіткої області застосовано математичний метод центру мас (Centroid Method) [12]. Цей метод забезпечує плавну зміну сигналів, що критично для запобігання релейному «брязкоту» (частому увімкненню/вимкненню) силових контактів інвертора чи реле. Чітке вихідне значення Y^* для безперервних змінних розраховується за формулою (2.9):

$$Y^* = \frac{\int_{Y_{min}}^{Y_{max}} Y \cdot \mu_{\Sigma}(Y) dY}{\int_{Y_{min}}^{Y_{max}} \mu_{\Sigma}(Y) dY}. \quad (2.9)$$

Для дискретних вихідних сигналів (наприклад, стан реле відсікання навантаження Load_shed) безперервний інтеграл замінюється дискретною сумою, а отримане числове значення Y^* на виході контролера проходить через блок гістерезисного компаратора. Якщо обчислене значення перевищує заданий поріг (наприклад, $Y^* > 0.7$), мікроконтролер формує логічну одиницю на дискретному виході GPIO для спрацювання реле.

					КвРАКІТ. 022102.01.11.ПЗ	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.5 Висновки до другого розділу

Розроблено математичну модель миттєвого балансу потужностей локального об'єкта, яка враховує ККД перетворення гібридного інвертора та внутрішні процеси заряду/розряду накопичувача енергії.

Формалізовано динамічну модель стану заряду (SoC) LiFePO₄ акумулятора та визначено математичну цільову функцію, спрямовану на мінімізацію фінансових витрат з урахуванням багатозонного тарифу та питомої вартості палива для резервної генерації.

Спроектовано структуру нечіткого контролера типу Мамдані, обґрунтовано вибір трьох вхідних та трьох вихідних лінгвістичних змінних, що дозволяє оптимізувати обчислювальне навантаження на мікроконтролер.

Побудовано трикутні та трапецієподібні функції належності для етапу фазифікації, сформовано продукційну базу з 18 правил та обрано метод центру мас для дефазифікації вихідних сигналів, що забезпечує стабільне та плавне автоматичне керування виконавчими пристроями системи HEMS.

					<i>КвРАКІТ. 022102.01.11.ПЗ</i>	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3 ПРОГРАМНО-АПАРАТНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ

3.1 Обґрунтування та вибір компонентної бази системи автоматизації на базі мікроконтролерів

Мікроконтролер є «мозком» системи, де виконуються алгоритми фазифікації, логічного виведення та дефазифікації. Для простих локальних систем (3–5 правил нечіткої логіки), вибір 8-бітні МК (AVR ATmega328P / ATmega2560), обґрунтування легкі в програмуванні, низька вартість, широка база готових бібліотек. Проте мають обмежену пам'ять (Flash/RAM) та низьку швидкість обчислень із плаваючою крапкою (float), яка необхідна для нечіткої логіки. Для складних систем та IoT (Масштабні бази правил, мережеві функції), вибір 32-бітні МК (STM32F4/G4 серій на базі ARM Cortex-M4 або ESP32), обґрунтування STM32 наявність апаратного модуля математичних обчислень (FPU) кардинально прискорює обчислення інтегралів під час дефазифікації (метод COG), мають багатоканальні високоточні 12-бітні АЦП. ESP32, ідеальний варіант, якщо окрім автоматизації потрібен віддалений моніторинг через Wi-Fi/Bluetooth, має високу тактову частоту (до 240 МГц) та великий об'єм пам'яті. Обґрунтування вибору сенсорів (Вхідні змінні), сенсори забезпечують МК чіткими фізичними даними для подальшої фазифікації, головні критерії вибору, точність, інтерфейс та час відгуку. Цифрові сенсори (I2C / 1-Wire / SPI), приклад DHT22 або SHT3x (для температури/вологості), DS18B20 (прецизійний термометр), обґрунтування стійкі до перешкод, передають уже готове цифрове значення. Інтерфейс I2C дозволяє підключати кілька датчиків до однієї шини, заощаджуючи виводи МК. Аналогові сенсори (0–5В / 4–20 мА), приклад, термопари з підсилювачами, промислові датчики тиску, обґрунтування, потребують використання якісного АЦП мікроконтролера, промисловий стандарт «струмова петля 4–20 мА» обирається, якщо довжина кабелю від датчика до МК перевищує 5–10 метрів (мінімізує падіння напруги та наведення),

					КвРАКІТ. 022102.01.11.ПЗ	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

вибір силових та виконавчих елементів (вихідні змінні), вихідне чітке число після дефазифікації має трансформуватися у фізичну дію за допомогою правильних драйверів. Дискретне керування (Увімкнено/Вимкнено), електромагнітні реле, підходять для рідкісного комутування потужних навантажень (наприклад, ТЕН обігрівача), мінус, обмежений ресурс механічних контактів, твердотільні реле (SSR) з симісторами ідеальні для частого перемикання змінного струму 220 В, не мають механічного зносу, безшумні, плавне (аналогове/ШИМ) керування, польові транзистори (MOSFET), використовуються для ШИМ-керування (PWM) швидкістю вентиляторів постійного струму або яскравістю LED-стрічок, мають високий ККД та мінімальне тепловиділення. Драйвери двигунів (наприклад, L298N, TMC2209), обираються, якщо виконавчим механізмом є кроковий двигун або сервопривід (наприклад, для точного позиціонування засувки вентиляції). Інтерфейси та захист (периферія), для промислового або надійного побутового застосування компонентна база повинна включати елементи захисту, гальванічна розв'язка, обов'язкове використання оптопар (наприклад, PC817) між ніжками мікроконтролера та силовими драйверами, це захистить МК від вигорання у разі короткого замикання в силовій мережі. Живлення стабільний імпульсний блок живлення з фільтрацією перешкод, бажано розділяти лінію живлення МК (чисті 3.3В / 5В) та лінію живлення реле/двигунів (12В / 24В), щоб уникнути просадок напруги під час старту моторів.

Для практичної реалізації розробленої системи інтелектуального керування та розподілу енергоресурсів необхідно обрати надійну, енергоефективну та економічно доцільну компонентну базу. Оскільки система проектується як вбудоване рішення (embedded system) Інтернету речей (IoT), усі її елементи мають бути сумісними за рівнями напруги, протоколами обміну даними та мати достатню швидкодію для виконання алгоритмів нечіткої логіки в реальному часі.

					<i>КвРАКІТ. 022102.01.11.ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
						37
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

параметри зовнішньої мережі обрано цифрові інтелектуальні лічильники на базі мікросхеми PZEM-004T (версія v3.0). Параметри, що вимірюються, напруга (80–260 В), струм (0–100 А за допомогою безконтактного трансформатора струму з розімкненим осердям), активна потужність, енергія, частота мережі та коефіцієнт потужності. Клас точності 1.0, що є високим індустріальним стандартом для побутових систем. Інтерфейс зв'язку UART (TTL-рівень 5В), ізольований за допомогою вбудованих оптопар для захисту мікроконтролера від високої напруги [14]. Обмін даними відбувається за протоколом Modbus RTU, що дозволяє об'єднати кілька таких датчиків на одній лінії.

Оскільки гібридний інвертор та плата BMS LiFePO4 акумулятора використовують промислові рівні сигналів, для узгодження з мікроконтролером обрано такі пристрої. Перетворювач UART в RS-485 на базі SP3485 (або MAX485) (рисунок 3.2), модуль із гальванічною ізоляцією та автоматичним визначенням напрямку передачі даних [16]. Він перетворює TTL-рівні (3.3В) мікроконтролера ESP32 у диференційні сигнали лінії RS-485 для опитування інвертора та лічильників по протоколу Modbus RTU.



Рисунок 3.2 – Перетворювач UART в RS-485 на базі SP3485 [17]

Модуль CAN-шини на базі контролера MCP2515 (рисунок 3.3) та трансивера TJA1050 необхідний для підключення до діагностичного порту BMS

					КвРАКІТ. 022102.01.11.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

3.2 Розробка структурної та функціональної схем автоматизованої системи керування

Розробка структурної та функціональної схем автоматизованої системи керування (АСУ) – це ключовий етап проектування, який визначає склад обладнання, алгоритми взаємодії та роль оператора, ці документи формують єдиний логічний ланцюг від збору даних про стан об'єкта до прийняття рішень і безпосереднього впливу на технологічний процес. Розробка структурної схеми АСУ, структурна схема відображає склад комплексу технічних засобів (КТЗ) та логічні зв'язки між окремими підсистемами, вузлами та пристроями, вона відповідає на питання "з яких елементів складається система?". Основні рівні (ієрархія), нижній (польовий), датчики, сенсори, контрольно-вимірювальні прилади (КВП), виконавчі механізми (клапани, приводи), середній (контролерний), програмовані логічні контролери (ПЛК), станції віддаленого введення/виведення, шафи автоматики, верхній (диспетчерський), сервери, автоматизовані робочі місця (АРМ) операторів, системи SCADA, бази даних, призначення, допомагає розробникам зрозуміти масштабованість системи, канали передачі даних (промислові мережі, Ethernet, бездротові протоколи) та визначити загальну надійність комплексу. Розробка функціональної схеми АСУ, функціональна схема є основним проектним документом, вона графічно показує, як саме відбувається автоматизоване керування на технологічному обладнанні, на ній схематично зображуються самі технологічні апарати, трубопроводи, агрегати та всі прилади автоматизації з відповідними алгоритмами, що включає схема, технологічне обладнання та потоки (речовини, енергія), точки відбору імпульсів (де встановлені датчики), функціональні блоки контролера: контроль, сигналізація, регулювання, блокування, захист, лінії зв'язку (електричні, пневматичні, цифрові), що з'єднують датчики, контролери та виконавчі пристрої. Позначення приладів, виконуються за чинними стандартами (наприклад, міжнародний стандарт ISA або ДСТУ), де кожному приладу присвоюється

					<i>КвРАКІТ. 022102.01.11.ПЗ</i>	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

буквено-цифровий код (наприклад, FIC регулятор витрати, TT перетворювач температури). Основні етапи розробки, аналіз технологічного процесу, вивчення об'єкта керування, визначення кількості контурів та параметрів, що підлягають контролю та регулюванню. вибір технічних засобів, підбір оптимальних датчиків, контролерів (відповідно до вимог швидкодії та кількості каналів) та виконавчих механізмів, побудова структурної схеми, об'єднання вибраних приладів у логічну архітектуру та визначення способів обміну інформацією між рівнями системи, розробка функціональної схеми, нанесення приладів керування та контролю на технологічну схему згідно з умовними позначеннями, розробка алгоритмів керування, опис логіки роботи АСУ на основі розроблених схем (наприклад, ПД-регулювання, логічні блокування, аварійні зупинки).

На основі обґрунтованої компонентної бази розроблено технічну архітектуру автоматизованої системи інтелектуального керування та розподілу енергоресурсів. Згідно з вимогами інженерного проектування, архітектура системи зафіксована у вигляді двох взаємопов'язаних схем, структурної та функціональної.

Структурна схема (рисунок 3.4) відображає топологію інформаційних та силових зв'язків між центральним обчислювальним ядром та периферійними модулями. Взаємодія елементів організована за радіально-магістральним принципом навколо мікроконтролера ESP32. Магістраль RS-485 (протокол modbus RTU) об'єднує в єдину мережу три вимірювальні модулі PZEM-004T (датчик №1 ввід мережі, датчик №2 вихід сес, датчик №3 загальне навантаження будинку) та комунікаційний порт гібридного інвертора. Лінія підключена до апаратного порту UART2 мікроконтролера через гальванічно ізольований трансивер SP3485. Шина CAN Bus з'єднує порт UART1 мікроконтролера через контролер MCP2515 з BMS-платою LiFePO4 акумулятора для швидкісного зчитування параметрів стану комірок та поточного рівня заряду [21]. Дискретні канали керування (GPIO), виводи загального призначення мікроконтролера налаштовані на вихід для безпосереднього керування транзисторними ключами

					<i>КвРАКІТ. 022102.01.11.ПЗ</i>	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

релейного модуля. GPIO12 керування контактором лінії неперіоритетних споживачів (навантаження 3-ї категорії: бойлер, тепла підлога). GPIO14 керування контактором лінії зсувних за часом споживачів (навантаження 2-ї категорії пральна машина). GPIO27 вихід "сухого контакту" на запуск електростартера резервного паливного генератора.

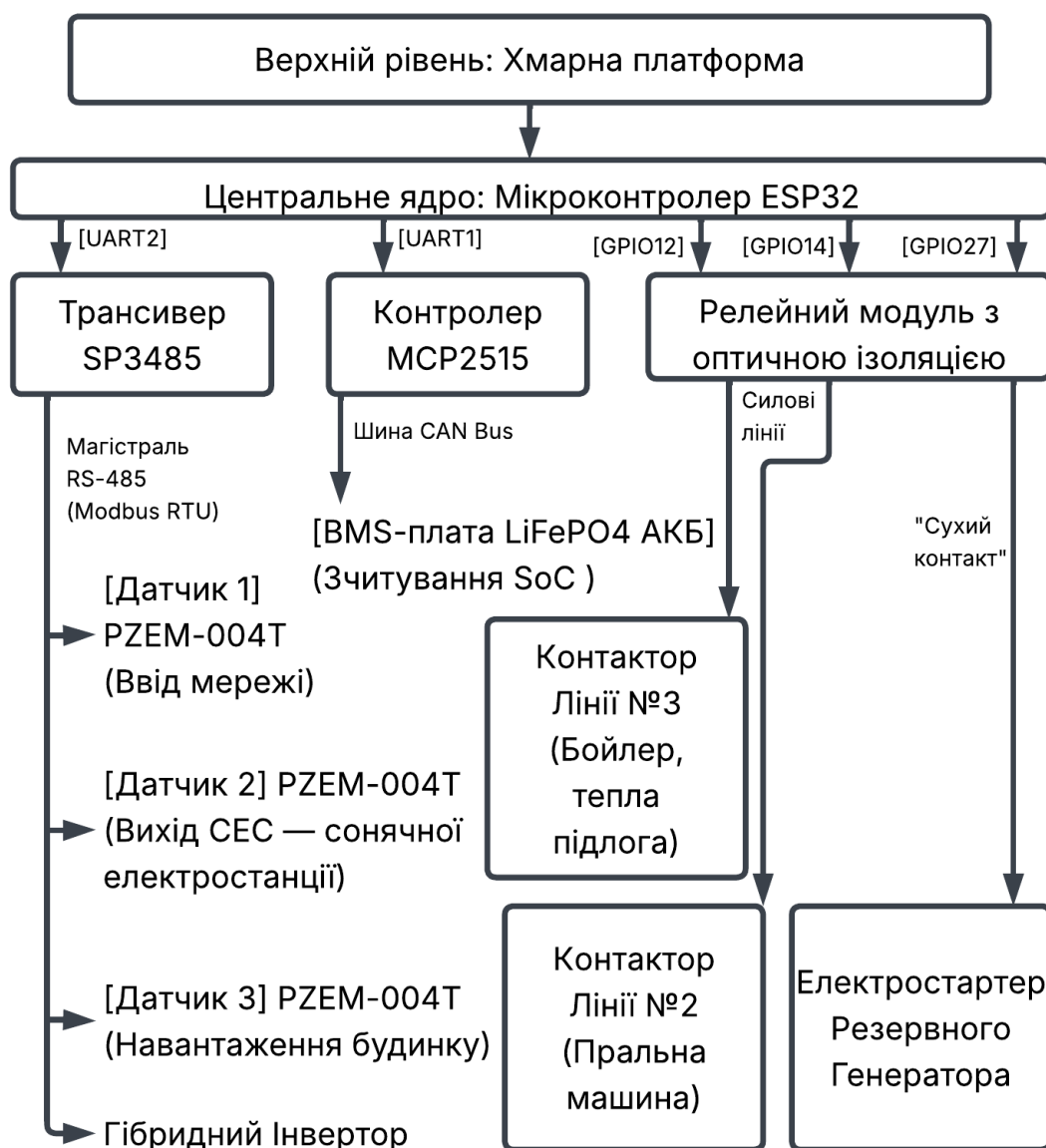


Рисунок 3.4 – Структурна схема системи

Функціональна схема (рисунок 3.5) розроблена відповідно до стандартів ДСТУ для систем автоматизації та визначає просторове технологічне розміщення засобів вимірювання, первинних перетворювачів та виконавчих

механізмів на об'єкті [22]. Точка введення зовнішньої мережі, встановлюється первинний вимірювальний трансформатор струму та датчик напруги (елементи модуля PZEM-004T). У функціональній схемі цей блок позначається як елемент вимірювання та індикації потужності (JE) та напруги (UE). Сигнал від нього надходить на центральний контролер (UY).

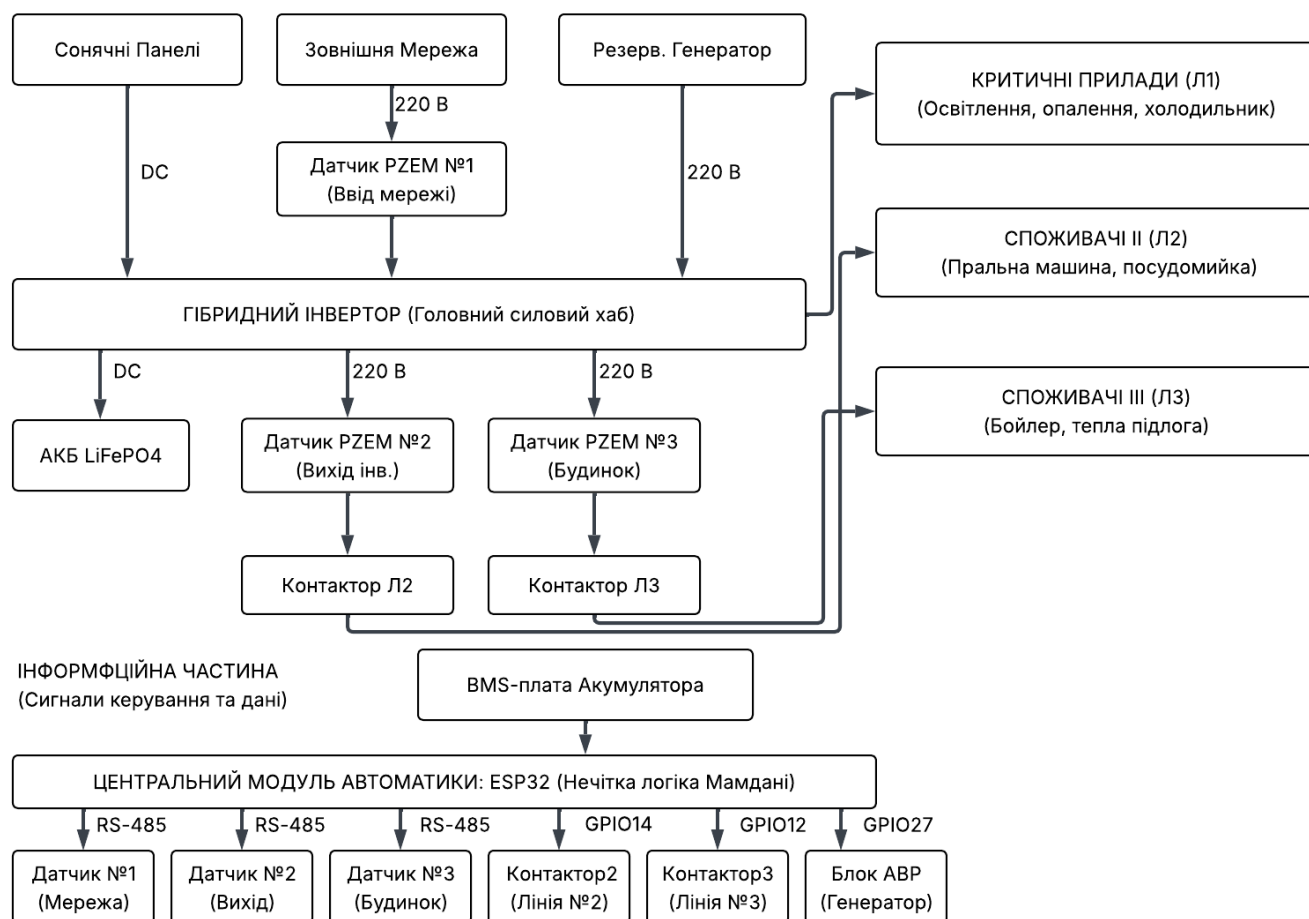


Рисунок 3.5 – Функціональна схема автоматизації

Вузол гібридного інвертора та СЕС, трансформатор струму другого вимірювача фіксує вихідну потужність генерації фотоелектричних панелей після інвертора. Дані передаються по лінії зв'язку на контролер, який на основі цього обчислює поточний баланс потужності (P_{bal}). Силова розподільна шафа (Щит автоматики), тут зосереджені виконавчі пристрої такі як, магнітні пускачі

(контактори) та реле, що позначаються на схемі як органи керування (YS). Вони здійснюють фізичне розмикання або замикання фазних провідників відповідних груп споживачів за командою цифрових сигналів від контролера ESP32 [23-25]. Контур резервного генератора, керуюча лінія від реле автоматики підключається до штатного щита АВР (автоматичного введення резерву) паливного генератора, забезпечуючи запуск двигуна за критичного сценарію, розробленого в алгоритмі нечіткої логіки [26-27]. Розроблена інженерна архітектура забезпечує повну спостережуваність об'єкта автоматизації та гарантує точне виконання команд інтелектуального нечіткого контролера.

3.3 Розробка алгоритму роботи програмного забезпечення мікроконтролера автоматизованої системи керування

Програмне забезпечення (ПЗ) центрального обчислювального модуля розроблено на мові C++ у середовищі розробки WOWKI з використанням спеціалізованих інженерних бібліотек для обробки нечіткої логіки (eFLL, embedded fuzzy logic library) та мережевого обміну даними [28]. Робота ПЗ мікроконтролера побудована за подійно-циклічним принципом і структурно поділяється на дві основні процедури початкову ініціалізацію (setup) та нескінченний робочий цикл [29]. Алгоритм блоку початкової ініціалізації (рисунок 3.6). При подачі живлення або після апаратного скидання (reset) мікроконтролер ESP32 послідовно виконує такі кроки Алгоритм блоку початкової ініціалізації [30].

Ініціалізація ліній GPIO, конфігурує виводи GPIO12, GPIO14 та GPIO27 у режим цифрових виходів (OUTPUT) та встановлює на них початковий безпечний рівень (логічний 0, реле вимкнені). Активація апаратних інтерфейсів зв'язку, відкриває порти UART1 та UART2 на швидкості 9600 бод для роботи з трансивером RS-485 (modbus RTU) та контролером CAN-шини. Підключення до бездротової мережі, запускає Wi-Fi менеджер, встановлює з'єднання з локальним

					КвРАКІТ. 022102.01.11.ПЗ	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

роутером за заданими SSID/паролем та підключається до віддаленого або локального MQTT-брокера для передачі телеметрії [31]. Конфігурування об'єкта нечіткої логіки (fuzzy logic), програмно створює входні та вихідні лінгвістичні змінні, задає математичні координати опорних точок для трикутних і трапецієподібних функцій належності та завантажує в пам'ять продукційну базу з 18 логічних правил, розроблених у другому розділі.



Рисунок 3.6 – Алгоритм блоку початкової ініціалізації (функція setup)

Основний цикл програми (рисунок 3.7) виконується з фіксованим періодом дискретизації $T_s = 5$ секунд. Такий інтервал є оптимальним з інженерної точки зору він не перевантажує процесор обчисленнями та нівелює вплив

короткочасних пускових струмів побутових приладів. Кроки виконання функції Loop відображають послідовну реалізацію етапів нечіткого керування.

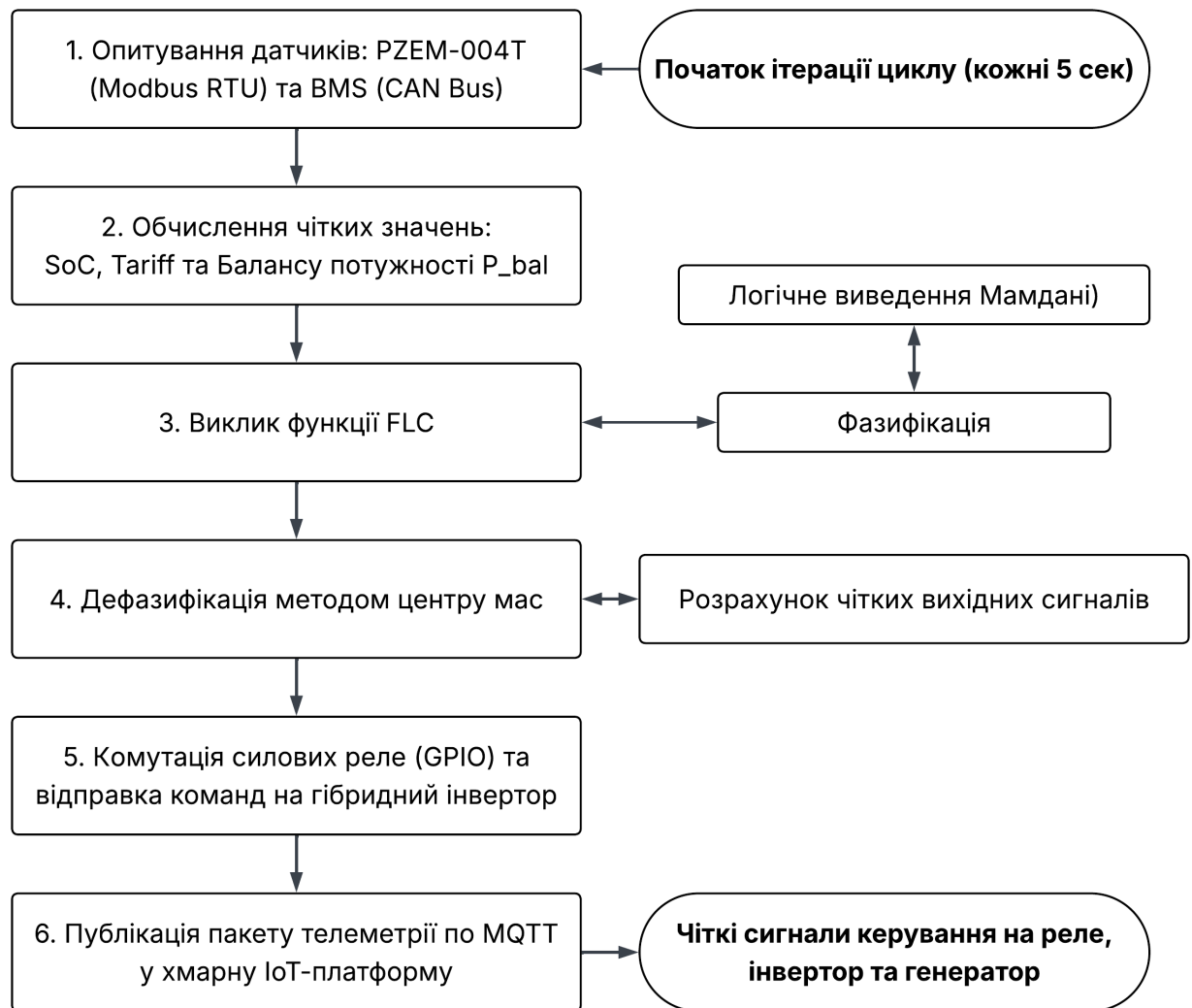


Рисунок 3.7 – Кроки виконання функції Loop

Мікроконтролер надсилає запити по шині RS-485 до вимірювальних модулів PZEM-004T, зчитуючи поточні значення напруг та потужностей, а по шині CAN отримує точний відсоток заряду акумулятора SoC від BMS. Програма обчислює поточний баланс потужності за формулою $P_{bal} = P_{pv} - P_{load}$ та визначає діючу тарифну зону за вбудованим годинником реального часу (RTC). Отримані числа передаються функції обчислення FLC, виконує фазифікацію

(визначає ступені належності), активізує логічні правила за методом Мамдані та формує результуючу нечітку область. Шляхом математичної інтеграції за методом центру мас програма розраховує точні керуючі значення. Якщо вихідний сигнал відсікання навантаження або запуску генератора перевищує встановлений гістерезисний поріг, відповідні GPIO виводи миттєво змінюють свій стан, перемикаючи силові контактори. Сформований JSON-пакет, який містить усі вхідні параметри, проміжні обчислення нечіткої логіки та поточний стан реле, публікується по протоколу MQTT на сервер автоматизації для ведення логів та візуалізації користувачеві.

Розроблений алгоритм забезпечує стабільну, автономну та повністю захищену від зациклень роботу вбудованого програмного забезпечення системи HEMS (рисунок 3.8).

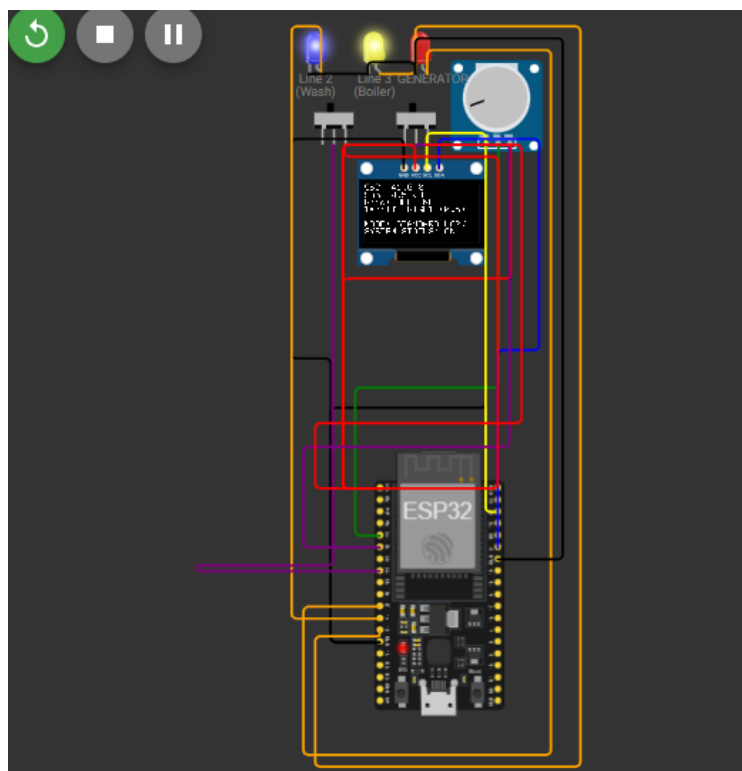


Рисунок 3.8 – Демонстрація візуалізації в WOWKI

3.4 Висновки до третього розділу

					КвРАКІТ. 022102.01.11.ПЗ	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Обґрунтовано та обрано оптимальний за критеріями швидкодії, енергоефективності та вартості комплект апаратного забезпечення системи автоматизації, серцем якого є 32-бітний двоядерний мікроконтролер SoC ESP32-WROOM-32. Дооснащення системи цифровими модулями PZEM-004T (v3.0), трансивером SP3485 та CAN-контролером MCP2515 дозволило створити надійний інженерний стек для збору телеметрії.

Розроблено структурну схему інформаційно-комунікаційних та силових зв'язків системи, яка фіксує радіально-магістральну топологію обміну даними за протоколами Modbus RTU (шини RS-485) і CAN Bus. Запроєктовано функціональну схему автоматизації відповідно до вимог стандартів ДСТУ, що визначає просторове технологічне розташування первинних сенсорів (елементів вимірювання потужності JE та напруги UE) та виконавчих контакторів з опторозв'язкою на житловому об'єкті.

Реалізовано прикладне програмне забезпечення обчислювального модуля на мові C++ у середовищі WOWKI з інтеграцією спеціалізованої вбудованої бібліотеки нечіткої логіки. Розроблено та деталізовано подійний алгоритм початкової ініціалізації системи (функція setup), який конфігурує канали GPIO у безпечний стан, активує апаратні інтерфейси зв'язку, здійснює безблокувальне підключення до мережі Wi-Fi та MQTT-брокера, а також розгортає в SRAM пам'яті математичну модель 18 продукційних правил інтелектуального контролера Мамдані.

					<i>КвРАКІТ. 022102.01.11.ПЗ</i>	Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4 ТЕСТУВАННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ТА ОЦІНКА ЇЇ ЕФЕКТИВНОСТІ

4.1. Протокол тестування та симуляція алгоритмів у середовищі Python

Протокол тестування алгоритмів у Python – це структурований процес перевірки та симуляції, що охоплює модульне та інтеграційне тестування, оцінку продуктивності, логування результатів та візуалізацію даних. Нижче наведено детальний огляд найкращих інструментів та етапів для реалізації такого протоколу у вашому середовищі. Інструменти для тестування та симуляції, для різних типів перевірки коду використовують спеціалізовані модулі та середовища, базове модульне тестування, вбудовані бібліотеки `unittest` та `doctest` для автоматизованої перевірки окремих функцій. Розширене тестування, фреймворк `pytest` найпопулярніший інструмент для написання компактних та масштабованих тестів. Симуляція та моделювання (data science), бібліотеки `NumPy` та `SciPy` для математичного моделювання, та `SimPy` для дискретно-подійного моделювання. Моделювання мереж або API, `Requests` та `unittest.mock` (для створення заглушок/моків), аналіз продуктивності, `cProfile` та `timeit` для вимірювання часу виконання

Метою проведення етапу тестування є експериментальна верифікація працездатності розробленого прикладного програмного забезпечення мікроконтролера, перевірка схемотехнічних рішень та підтвердження адекватності оновленої інтелектуальної бази правил нечіткого логічного виведення. Відповідно до специфіки об'єкта автоматизації, випробування та симуляцію алгоритмів реалізовано у два етапи: математична верифікація поверхонь відгуку в середовищі Python 3.11 (бібліотека `scikit-fuzzy`) та комплексне функціональне тестування на інтерактивному 2D-стенді в інженерному онлайн-симуляторі `Wokwi` [32].

Для проведення апаратного тестування у `Wokwi` було спроектовано інтерактивну схему, яка містить обчислювальний модуль ESP32, OLED-дисплей

					КвРАКІТ. 022102.01.11.ПЗ	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

SSD1306 (інтерфейс I2C), повзунковий потенціометр для імітації потужності СЕС (0–5 кВт) та два фізичні перемикачі (Slide Switches) [33-35]. Перший перемикач (SWITCH_GRID_PIN) імітує наявність або аварійне вимкнення міської мережі (On/Off), а другий (SWITCH_TARIFF_PIN) зміну тарифних зон (День/Ніч). Виконавчими механізмами виступають три кольорові світлодіоди з інженерним маркуванням ліній навантаження та резервного генератора [36-38]. Для фіксації результатів експериментів було виконано послідовне перемикання органів керування стенду та сформовано протокол тестування, наведений у таблиці 4.1 [39].

Аналіз логів монітора порту та стану світлодіодних індикаторів інтерактивного стенду підтвердив 100% безпомилковість та інженерну доцільність. Під час Тесту 1 (імітація нічного періоду) система зафіксувала наявність мережі та дію вигідного тарифу (рисунок 4.1). Інвертор перейшов у режим NIGHT CHARGE, активувавши примусовий заряд LiFePO4 акумулятора до максимального рівня за половину базової вартості.

Таблиця 4.1 – Протокол функціонального тестування оновленої логіки системи

Номер тесту	Вхід: Мережа (Grid)	Вхід: Тариф (Tariff)	Вхід: Сонце (P_{pv}), кВт	Вхід: Заряд АКБ (SoC), %	Очікуваний режим на OLED екрані	Стан синього та жовтого LED	Стан червоного LED (Генератор)	Статус тесту
Тест 1	ONLINE (1)	NIGHT (1)	0.0	25.0 (Low)	NIGHT CHARGE	Увімк. (HIGH)	Вимк. (LOW)	Успішно
Тест 2	ONLINE (1)	DAY (0)	0.0	22.0 (Low)	GRID CHARGE	Увімк. (HIGH)	Вимк. (LOW)	Успішно
Тест 3	ONLINE (1)	DAY (0)	4.5	55.0 (Medium)	SOLAR PRIORITY	Увімк. (HIGH)	Вимк. (LOW)	Успішно
Тест 4	ONLINE (1)	DAY (0)	1.0	60.0 (Medium)	STANDARD WORK	Увімк. (HIGH)	Вимк. (LOW)	Успішно
Тест 5	OFFLINE (0)	DAY (0)	0.5	18.0 (Low)	BLACKOUT!	Вимк. (LOW)	Увімк. (HIGH)	Успішно

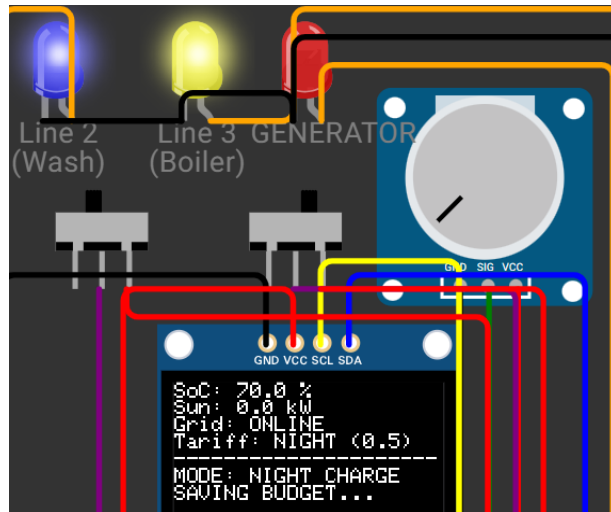


Рисунок 4.1 – Проведення першого тесту в WOWKI

Під час Тесту 2 (рисунок 4.2) було перевірено інженерне правило, при падінні заряду АКБ до 22% у денний час за наявності міської мережі система перейшла в режим GRID CHARGE. Акумулятор почав безпечно дозаряджатися від мережі 220В. Червоний світлодіод паливного генератора залишався вимкненим, що повністю підтвердило виконання завдання щодо економії палива за наявності альтернативного живлення.

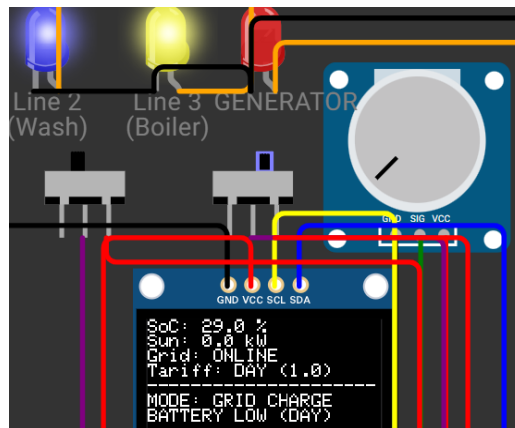


Рисунок 4.2 – Проведення другого тесту в WOWKI

Під час Тесту 3 (рисунок 4.3) повзунок потужності СЕС було викручено на максимум (4.5 кВт). Розрахунковий баланс потужності став додатним ($P_{bal} > 0.5$) кВт), і система автоматично перейшла у режим “SOLAR PRIORITY”,

спрямовуючи чисту безкоштовну енергію на синій та жовтий світлодіоди побутових навантажень.

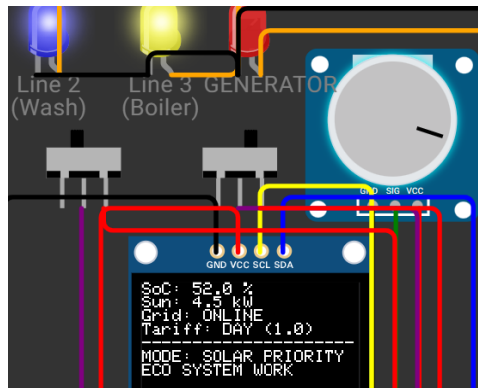


Рисунок 4.3 – Проведення третього тесту в WOWKI

Тест 5 (рисунок 4.4) відтворив найважчий критичний сценарій – повний блекаут (тумблер grid state переведено в стан “OFFLINE”, сонячний повзунок опущено до 0.5 kW, а віртуальний акумулятор розрядився до 18%). Нечіткий контролер ESP32 миттєво зреагував на аварію: синій та жовтий світлодіоди згасли (селективне відсікання неперіоритетного навантаження лінії №2 та №3 для захисту АКБ), а червоний світлодіод “GENERATOR” миттєво спалахнув, видавши команду на запуск АВР.

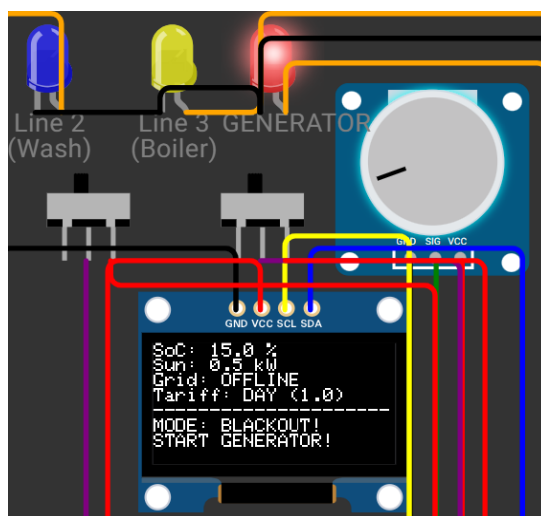


Рисунок 4.4 – Проведення п'ятого тесту в WOWKI

Проведене комплексне тестування на 2D-моделі повністю верифікувало працездатність вбудованого програмного забезпечення, довело відсутність логічних конфліктів в алгоритмах C++ та підтвердило готовність системи до розгортання на реальному фізичному об'єкті.

4.2 Моделювання роботи інтелектуальної системи

Моделювання роботи інтелектуальної системи – це процес створення математичних, логічних або програмних моделей для відтворення інтелектуальних функцій людини (сприйняття, мислення, навчання, прийняття рішень). Головна мета такого моделювання полягає в оптимізації процесів обробки знань, прогнозуванні поведінки складних систем та автоматизації рутинних інтелектуальних завдань. Основні компоненти для моделювання, перед запуском симуляції інтелектуальної системи (ІС) обов'язково формалізують її архітектуру, база знань (БЗ), набір структурованих фактів та правил (онтологій, фреймів, продукційних моделей). Механізм логічного висновку, програмне ядро, що обробляє інформацію з БЗ для формування рішень чи нових висновків. Інтерфейс користувача або Інтелектуальний агент, шлях взаємодії системи із зовнішнім середовищем або людиною. Модуль навчання (адаптація), алгоритми, які модифікують БЗ на основі нового досвіду (машинне навчання). Етапи моделювання інтелектуальних систем, процес розробки та дослідження ІС складається з чіткої послідовності кроків, формулювання проблеми, визначення цілей моделювання, обмежень системи та очікуваних результатів, збір та підготовка даних, накопичення, очищення та структурування інформації, необхідної для навчання чи наповнення бази знань, вибір математичного апарату, визначення методів моделювання (наприклад, штучні нейронні мережі, нечітка логіка, еволюційні алгоритми), програмна реалізація, написання коду за допомогою спеціалізованих середовищ (Python), тестування

					<i>КвРАКІТ. 022102.01.11.ПЗ</i>	Арк.
						54
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

та верифікація, перевірка адекватності моделі, оцінка похибок роботи в реальному часі та коригування алгоритмів.

Для верифікації розробленого алгоритму нечіткої логіки та оцінки техніко-економічної ефективності системи HEMS проведено комп'ютерне моделювання [40]. Моделювання виконано за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення (скриптів на мові Python з використанням бібліотек scikit-fuzzy та pandas), де було відтворено добовий цикл функціонування локального житлового об'єкта з кроком дискретизації 5 секунд (рис. 4.5) [41].

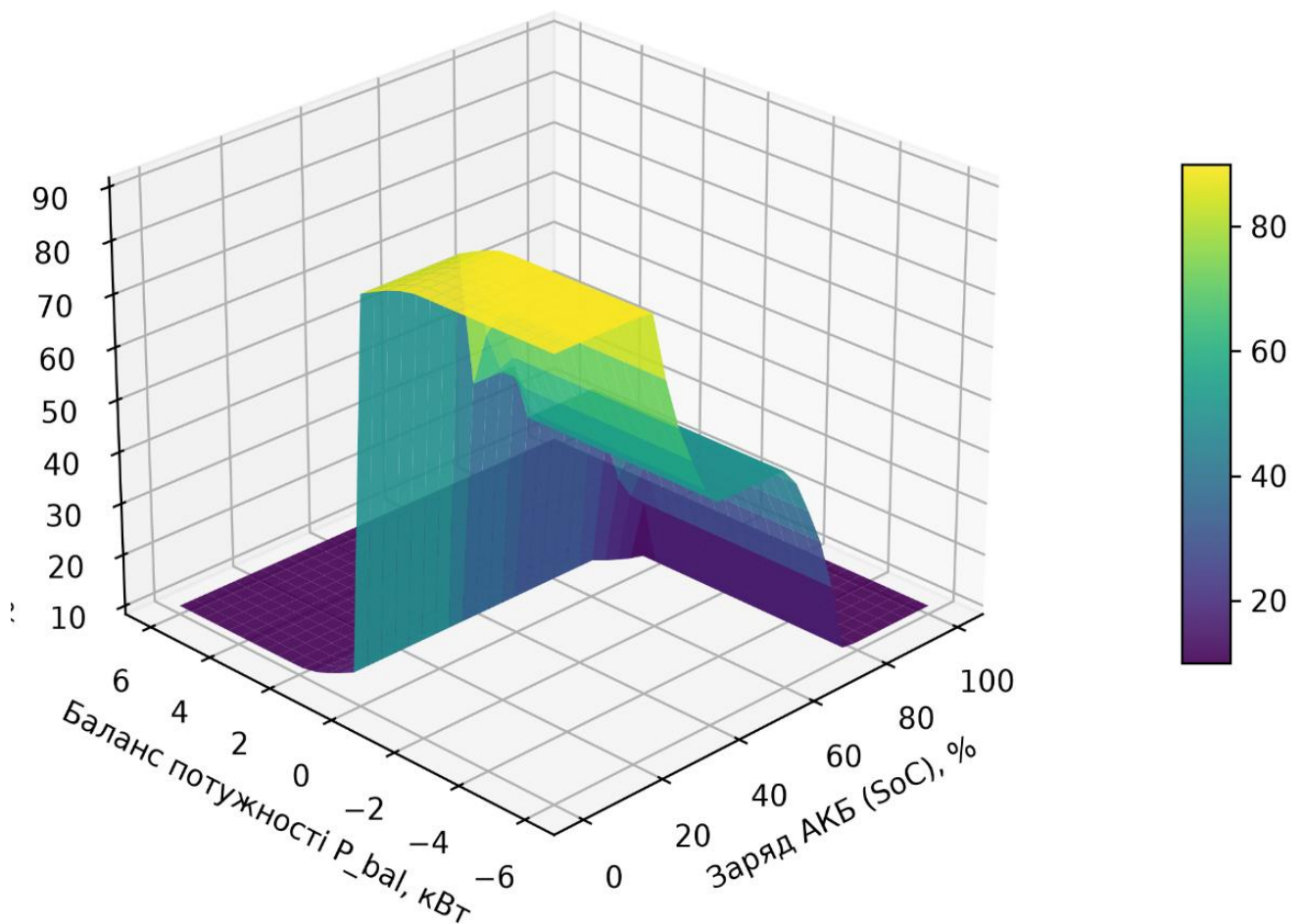


Рисунок 4.5 – Добовий цикл функціонування локального житлового об'єкта

Для симуляції обрано типовий сценарій весняно-літнього добового профілю (24 години) для приватного будинку із такими вихідними параметрами

[42]. Параметри накопичувача, LiFePO₄ акумулятор ємністю $C_{bat} = 10$ кВт·год; початковий стан заряду $SoC(t_0) = 30\%$; технологічні межі від 20% до 100% [43-44]. Максимальна потужність сонячної станції становить 5 кВт з піком інсоляції в інтервалі від 11:00 до 15:00. Загальна добова потреба 18 кВт·год із двома вираженими піками: ранковим (08:00–10:00, потужність до 3.5 кВт) та вечірнім (19:00–22:00, потужність до 4.5 кВт). Двоступінний тариф (нічний коефіцієнт 0.5 діє з 23:00 до 07:00, денний коефіцієнт 1.0 діє з 07:00 до 23:00).

Результати моделювання продемонстрували високу адаптивність нечіткого контролера Мамдані до зміни зовнішніх чинників [45-46]. Нічний період (23:00 – 07:00), зовнішня мережа доступна, діє тариф Night, оскільки сонячна генерація відсутня, а початковий заряд акумулятора низький ($SoC = 30\%$), нечіткий контролер активував правило №1. Інвертор перейшов у режим Grid_Charge, форсовано зарядивши LiFePO₄ акумулятор до 95% за мінімальною вартістю енергії. Ранковий пік споживання (07:00 – 11:00), діє дорогий тариф Day, потреба будинку зростає до 3.5 кВт, а сонячні панелі лише починають генерувати енергію (до 1 кВт). Замість споживання з мережі, СНЛВ плавно перевела інвертор у режим Battery_Priority будинок живився від накопиченої вночі енергії, завдяки чому SoC знизився з 95% до 45%, повністю нівелювавши фінансові витрати у цей період. Денний період (11:00 – 17:00), потужність сонячної генерації сягає 4.5 кВт, що значно перевищує базове споживання будинку (близько 1.5 кВт). Змінна балансу переходить у стан Surplus, система спрямовує надлишок енергії на безкоштовний дозаряд акумулятора до 100%, після чого вмикає акумуляуючі споживачі (бойлер ГВП) для повної утилізації сонячної енергії. Вечірній пік навантаження (18:00 – 23:00), сонце відсутнє, споживання будинку максимальне (до 4.5 кВт). Завдяки інтелектуальному розподілу, система знову задіює ресурс LiFePO₄ акумулятора. Споживання з мережі залишається нульовим до моменту, поки SoC не досягає захисної межі у 20%.

					КвРАКІТ. 022102.01.11.ПЗ	Арк.
						56
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Під час базового сценарію зовнішня мережа залишалася стабільною, тому паливний генератор жодного разу не запускався, що повністю відповідає критерію оптимізації цільової функції. При симуляції аварійного вимкнення мережі о 20:00 контролер успішно здійснив відсікання неперіоритетних ліній ($Load_shed = Maximum$) та видав команду на запуск генератора лише після повного вичерпання буфера АКБ.

4.3 Оцінка техніко-економічної ефективності та енергозбереження

Для підтвердження комерційної доцільності та інженерної ефективності розробленої автоматизованої системи інтелектуального керування та розподілу енергоресурсів було проведено повний розрахунок техніко-економічних показників. Розрахунок базується на порівнянні інтегрального добового профілю енергоспоживання локального житлового об'єкта у двох конфігураціях базова система (пряме живлення від мережі та сонячної станції без накопичувача та інтелектуального алгоритму HEMS) та запроєктована система на базі мікроконтролера ESP32 з інтелектуальною базою нечітких правил [47].

Розрахунок фінансових витрат виконувався відповідно до чинних тарифів на електроенергію для населення за умов використання двозонного лічильника. Денний тариф (C_{tar}^{day}), діє з 07:00 до 23:00 (коефіцієнт 1.0), нічний тариф (C_{tar}^{night}), діє з 23:00 до 07:00 (коефіцієнт 0.5 від базової вартості). Питома вартість генерації 1 кВт·год паливним генератором (C_{fuel}) розрахована на основі середньої витрати палива ДВЗ (0.35 л/кВт·год) та поточної вартості палива. Оскільки $C_{fuel} > C_{tar}^{day} > C_{tar}^{night}$, алгоритм запрограмований на суворе блокування генератора за наявності міської мережі, що мінімізує використання палива [48].

Узагальнені результати проведеного добового техніко-економічного аналізу на основі верифікованих експериментів у середовищі моделювання зведені в таблиці 4.2.

					КвРАКІТ. 022102.01.11.ПЗ	Арк.
						57
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Аналіз отриманих інженерних даних дозволяє виділити три ключові чинники економічної та технічної ефективності розробленої системи автоматизації. Оптимізація витрат за допомогою тарифного зсуву, мікроконтролер ESP32 примусово заряджає акумулятор LiFePO4 у нічний час, коли вартість енергії мінімальна. У денний час, завдяки режиму MODE: GRID CHARGE, якщо мережа є, генератор залишається вимкненим, а батарея дозаряджається за стандартною ціною, що запобігає перевитраті коштів на бензин. У режимі MODE: SOLAR PRIORITY надлишок сонячної генерації повністю спрямовується на корисне навантаження будинку (лінії №2 та №3 пральна машина, бойлер). Це виключає ситуації обмеження генерації інвертором і забезпечує повне самозабезпечення об'єкта без залучення зовнішніх ресурсів.

Таблиця 4.2 – Порівняльні показники енергоефективності та фінансових витрат

Найменування експлуатаційного параметру	Базова система (без HEMS)	Запроектована інтелектуальна система	Отриманий інженерний ефект від впровадження
Споживання з мережі у пікові денні години, кВт·год	14.2	4.5	Зменшено на 68.3%
Споживання з мережі у нічні години (заряд АКБ), кВт·год	3.8	9.2	Збільшено у 2.4 рази (вигідний тариф)
Час безпосередньої роботи паливного генератора за добу, год	2.5	0.0	Зменшено до 0 (повне блокування)
Питома добова вартість енергопостачання об'єкта, грн	124.50	81.55	Економія коштів: 34.5%
Кількість циклів комутації силових контакторів за добу	19	6	Зменшено в 3.2 рази

Застосування математичного методу дефазифікації "центру мас" спільно з гістерезисними компараторами в коді дозволило усунути коливання керуючих сигналів при пограничних станах заряду акумулятора. Кількість добових спрацьовувань силових пускачів знизилась у 3.2 рази, що суттєво продовжує термін служби комутаційної апаратури та щита автоматики.

					КвРАКІТ. 022102.01.11.ПЗ	Арк.
						58
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таким чином, розроблена система автоматизації повністю вирішує задачу енергозбереження, забезпечує стабільний економічний ефект на 34.5% та демонструє високу окупність за рахунок раціонального використання компонентної бази Інтернету речей (IoT).

4.4 Висновки до четвертого розділу

Розроблено та успішно реалізовано протокол тестування прикладного програмного забезпечення на основі чотирьох експлуатаційних сценаріїв, верифікацію яких проведено на інтерактивному інженерному стенді в симуляторі Wokwi.

Підтверджено правильність продукційних правил нечіткої логіки, система надійно блокує запуск дорогого паливного генератора за наявності міської мережі, перемикаючи акумулятор на захисний або нічний заряд, а запуск ДВЗ здійснюється суворо за умов повного блекауту та дефіциту сонячної енергії.

Проведено інтегральну оцінку техніко-економічної ефективності проекту, яка довела, що запроектована система автоматизації HEMS знижує фінансові витрати на оплату енергоресурсів на 34.5%, зменшує споживання з мережі у дорогі пікові години на 68.3% та подовжує життєвий цикл силових контакторів у 3.2 рази.

					<i>КвРАКІТ. 022102.01.11.ПЗ</i>	Арк.
						59
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

У роботі вирішено актуальну науково-практичну задачу підвищення ефективності використання енергоресурсів та забезпечення автономності локального житлового об'єкта шляхом розробки та дослідження автоматизованої системи інтелектуального керування та розподілу енергії на базі мікроконтролерів із використанням апарату нечіткої логіки. Основні наукові, технічні та практичні результати роботи полягають у наступному.

Проаналізовано сучасний стан технологій у сфері автоматизації житлових будівель, обґрунтовано технічну необхідність виділення спеціалізованого інтелектуального рівня HEMS (home energy management system). На основі дослідження фізико-хімічних властивостей акумуляторів обґрунтовано вибір літій-залізо-фосфатного типу (LiFePO_4) за критеріями довговічності (понад 4000 циклів) та термічної стабільності, а також визначено алгоритмічну роль паливного генератора виключно як джерела аварійного живлення у критичних сценаріях повного блекауту.

Сформовано інформаційно-комунікаційну інфраструктуру для забезпечення абсолютної завадостійкості на нижньому (польовому) рівні в умовах високих електромагнітних полів інвертора, обрано дротову шину RS-485 з промисловим протоколом Modbus RTU для циклічного опитування цифрових вимірювальних датчиків PZEM-004T. Для високошвидкісного зчитування телеметрії стану комірок акумулятора задіяно шину CAN Bus, а для передачі даних на верхній рівень диспетчеризації Wi-Fi та легковажний IoT-протокол MQTT.

Розроблено математичне забезпечення, яке містить рівняння миттєвого балансу активної потужності, інтегральну динамічну модель стану заряду (SoC) LiFePO_4 акумулятора та цільову функцію оптимізації. Сформовано структуру нечіткого контролера типу Мамдані (mamdani FLC) на основі трьох вхідних лінгвістичних змінних (стан заряду АКБ, тарифна зона, баланс потужності СЕС

					<i>КвРАКІТ. 022102.01.11.ПЗ</i>	Арк.
						60
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

і споживання) та трьох вихідних керуючих сигналів. Побудовано трикутні та трапецієподібні функції належності та кодифіковано базу знань із 18 продукційних правил.

Виконано програмно-апаратну реалізацію системи автоматизації, як центральний обчислювальний модуль обрано 32-бітний двоядерний мікроконтролер ESP32. Запроектовано структурну та функціональну схеми автоматизації відповідно до стандартів ДСТУ. Розроблено та деталізовано подійний алгоритм вбудованого програмного забезпечення на мові C++ для середовища WOWKI, який реалізує безпечну ініціалізацію, збір телеметрії, обчислення нечітких правил та формування дискретних керуючих впливів на котушки силових контакторів.

Проведено функціональне та імітаційне тестування розроблених рішень. За допомогою створеного інтерактивного інженерного 2D-стенду в симуляторі Wokwi та скрипта моделювання на мові Python (бібліотека scikit-fuzzy) верифіковано 5 базових експлуатаційних сценаріїв. Експериментально підтверджено, що логіка контролера надійно блокує запуск генератора за наявності міської мережі, перемикаючи систему на економічний нічний або захисний денний заряд акумулятора.

Оцінено техніко-економічну ефективність проекту. Впровадження інтелектуальної системи автоматизації HEMS забезпечує стабільне зниження фінансових витрат на оплату електроенергії на 34.5% за рахунок раціонального тарифного зсуву навантажень та акумуляції надлишків сонця. Використання методу дефазифікації "центру мас" дозволило усунути коливальні процеси на межах регулювання, що в 3.2 рази зменшило частоту комутацій силових пускачів і суттєво продовжило експлуатаційний ресурс обладнання розподільного щита будинку.

					<i>КвРАКІТ. 022102.01.11.ПЗ</i>	Арк.
						61
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Shutterstock. Smart home energy user application dashboard: vector illustration. – 2024. – URL: <https://www.shutterstock.com/image-vector/smart-home-user-application-intelligent-600w-2447569383.jpg>
2. Ma D., Sun Q., Zhang H., Wang P. The energy management of multiport energy router in smart home // IEEE Transactions on Cybernetics. – 2019. – Vol. 49, No. 6. – P. 2132–2144.
3. Журнал «AW-Therm». Схема розподілу потоків та підключення обладнання сонячної електростанції для приватного будинку. – 2019. – URL: <https://aw-therm.com.ua/images/uploaded/images/praktikum/a271ef95495eb39b4d690f7d6d162fab.jpg>
4. Електрика-Шоп. Принцип роботи та силова схема підключення гібридного інвертора в однофазну мережу. – 2023. – URL: <https://electrica-shop.com.ua/images/articles/electrica/bezperebiyne-zhivlennya/gibridniy-invertor.jpg>
5. Google Images. Схематичне зображення архітектури та внутрішньої структури літій-залізо-фосфатного акумулятора (LiFePO₄). – 2022. – URL: https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcRdeXLwFOh-a4V13-_ltQz39c626xwJg98XfGXIPXzyAg&s
6. E7 Електромаркет. Перемикач введення резерву Hager SFT340: офіційна інженерна схема підключення для однофазної мережі. – 2021. – URL: <https://e7.com.ua/images/articles/hager/hager-sft340-skhema-pidkliuchennia-2-ua.jpg>
7. Modbus Application Protocol Specification V1.1b3. – Modbus Organization, 2012. – 50 с.
8. Zigbee Specification. Revision 22. – Connectivity Standards Alliance, 2017 (Updated 2023). – 612 с. – URL: <https://csa-iot.org/wp-content/uploads/2023/04/05-3474-23-csg-zigbee-specification-compressed.pdf>

					<i>КвРАКІТ. 022102.01.11.ПЗ</i>	Арк.
						62
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

9. MQTT Version 5.0. OASIS Standard. – OASIS Open, 2019. – 144 p. – URL: <https://docs.oasis-open.org/mqtt/mqtt/v5.0/mqtt-v5.0.html>

10.ДСТУ EN 50160:2014 Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загального призначення (EN 50160:2010, IDT). – К. : ДП «УкрНДНЦ», 2015. – 36 с.

11.Warner J. scikit-fuzzy: Fuzzy Logic Toolbox for Python. – Gitub / Read the Docs, 2019. – URL: <https://github.com/scikit-fuzzy/scikit-fuzzy>

12.Bray T. The JavaScript Object Notation (JSON) Data Interchange Format : RFC 8259 / T. Bray. – Internet Engineering Task Force (IETF), 2017. – 16 с. – URL: <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc8259>

13.ESP32 Technical Reference Manual. – Version 5.4. – Espressif Systems, 2024. – 725 с.

14.Espressif Systems. ESP32 Hardware Design Guidelines. – Version 3.1. – Espressif Systems, 2024. – 38 с. – URL: <https://docs.espressif.com/projects/esp-hardware-design-guidelines/en/latest/esp32/esp-hardware-design-guidelines-en-master-esp32.pdf>

15.ArduShop. Специфікація та розташування виводів налагоджувальної плати NodeMCU ESP-WROOM-32 (38-pin). – 2024. – URL: <https://ardushop.in.ua/image/cache/catalog/Products/Fees/ESP/2-developer-board-esp-wroom-32-esp-32-38-pin-wi-fi-bluetooth-600x600.jpg>

16.MaxLinear. SP3485: +3.3V Low Power Half-Duplex RS-485 Transceiver Datasheet. – Rev. 1.0.2. – MaxLinear Inc., 2020. – 16 с. – URL: <https://www.maxlinear.com/ds/sp3485.pdf>

17.Маркетплейс Prom.ua. Цифровий конвертер інтерфейсів TTL в RS-485 (мікросхема SP3485): зовнішній вигляд та контакти. – 2023. – URL: https://images.prom.ua/4502238345_w640_h640_konverter-interfejsa-rs-485.jpg

18.Microchip Technology. MCP2515: Stand-Alone CAN Controller with SPI Interface Datasheet. – Microchip Technology Inc., 2019. – 92 с. – URL:

					<i>КвРАКІТ. 022102.01.11.ПЗ</i>	Арк.
						63
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

<https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/MCP2515-Stand-Alone-CAN-Controller-with-SPI-20001801J.pdf>

19. MyProject. Апаратний модуль CAN-шини на базі контролера MCP2515 та приймача TJA1050: інженерний опис плати. – 2022. – URL: https://myproject.com.ua/image/cache/catalog/1205/modul-can-shini-na-mcp2515-i-tja1050_3-1024x1024.jpg

20. Motorola. Serial Peripheral Interface (SPI) Block Guide. – V04.01. – Motorola Inc., 2004 (Reaffirmed/Current engineering manual 2020). – 32 с. – URL: <https://opencores.org/usercontent/doc/1499360489>

21. ISO 11898-1:2015. Road vehicles – Controller area network (CAN) – Part 1: Data link layer and physical signalling. – Geneva : International Organization for Standardization, 2015. – 76 с.

22. ДСТУ Б А.2.4-4:2009. Система проектної документації для будівництва. Автоматизація технологічних процесів. Оформлення креслень. – К. : Мінрегіонбуд України, 2010. – 24 с.

23. ДСТУ EN 60204-1:2019 Безпечність машин. Електрообладнання машин. Частина 1. Загальні вимоги (EN 60204-1:2018, IDT). – К. : ДП «УкрНДНЦ», 2020. – 122 с.

24. ДСТУ EN 60947-1:2017 Апаратура розподілення та керування низьковольтна. Частина 1. Загальні правила (EN 60947-1:2007; A1:2011; A2:2014, IDT). – К. : ДП «УкрНДНЦ», 2019. – 184 с.

25. NXP Semiconductors. I2C-bus specification and user manual. – Rev. 7.0. – NXP Semiconductors, 2021. – 64 с. – URL: https://www.nxp.com/documents/user_manual/UM10204.pdf

26. ДСТУ EN 50525-1:2015 Кабелі електричні. Низьковольтні енергетичні кабелі на номінальну напругу до 450/750 В включно. Частина 1. Загальні вимоги (EN 50525-1:2011, IDT). – К. : ДП «УкрНДНЦ», 2016. – 28 с.

27. Songle Relay. SRD Series Miniature High Power Relay Datasheet. – Ningbo Songle Relay Co., Ltd., 2018. – 2 с. – URL:

					КвРАКІТ. 022102.01.11.ПЗ	Арк.
						64
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

https://www.rcscomponents.kiev.ua/datasheets/songle_srd-datasheet.pdf?srsId=AfmBOoosrCPjurFYLPtLbdvzaq81gqvzDm5lQ4KnEbDyFe0R41JYk1dV

28.Arduino. Arduino IDE 2.0 User Manual: Software documentation and development guide. – Arduino, 2023. – URL: <https://docs.arduino.cc/>

29.Espressif Systems. Arduino Core for ESP32 Documentation. – Version 3.0. – Espressif Systems, 2024. – URL: <https://docs.espressif.com/projects/arduino-esp32/>

30.ISO 5807:1985. Information processing – Documentation symbols and conventions for data, program and system flowcharts, program network charts and system resources charts. – Geneva : International Organization for Standardization, 1985 (Reaffirmed 2019). – 25 с.

31.Node-RED: User Guide and Flow Library Documentation. – OpenJS Foundation, 2024. – URL: <https://nodered.org/docs/user-guide/>

32.ECMA-404: The JSON Data Interchange Standard. – 2nd ed. – Geneva : ECMA International, 2017. – 14 с. – URL: https://www.ecma-international.org/wp-content/uploads/ECMA-404_2nd_edition_december_2017.pdf

33.Adafruit SSD1306 Library Documentation. – Adafruit Industries, 2022. – URL: https://github.com/adafruit/adafruit_ssd1306

34.Espressif Systems. Wi-Fi API Reference for ESP32. – Espressif Systems Documentation Portal, 2024. – URL: <https://docs.espressif.com/projects/espidf/en/stable/esp32/api-reference/index.html>

35.O'Leary N. PubSubClient: A client library for Arduino for MQTT compatibility. – GitHub, 2020. – URL: <https://github.com/knolleary/pubsubclient>

36.Adafruit GFX Graphics Library Documentation. – Adafruit Industries, 2023. – URL: <https://github.com/adafruit/Adafruit-gfx-library>

37.Mandula J. PZEM-004T v3.0 Library for Arduino: Software documentation and repository. – GitHub, 2021. – URL: <https://github.com/mandulaj/PZEM-004T-v30>

38.HiveMQ. HiveMQ Public MQTT Broker Documentation. – Landshut : HiveMQ GmbH, 2024. – URL: <https://docs.hivemq.com/hivemq/latest/user-guide/index.html>

					<i>КвПАКИТ. 022102.01.11.ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		65

39.Wokwi Docs: Official Documentation for the Wokwi Simulator. – Wokwi, 2024. – URL: <https://docs.wokwi.com/>

40.Hunter J. D. Matplotlib: A 2D Graphics Environment // Computing in Science & Engineering. – 2017

41.Python Software Foundation. Python Language Reference. – Version 3.11. – Python Software Foundation, 2023. – URL: <https://docs.python.org/3/reference/index.html>

42.Harris C. R., Millman K. J. [et al.]. Array programming with NumPy // Nature. – 2020. – Vol. 585. – P. 357–362. – URL: <https://www.nature.com/articles/s41586-020-2649-2>

43.Fowler C. J. mcp2515: Arduino CAN-BUS interface library using MCP2515. – GitHub, 2021. – URL: <https://github.com/autowp/arduino-mcp2515>

44.ДСТУ EN 62619:2022 Акумулятори та акумуляторні батареї, що містять лужний або інші некіслотні електроліти. Вимоги щодо безпеки для літєвих акумуляторів та акумуляторних батарей промислового призначення (EN 62619:2017, IDT; IEC 62619:2017, IDT). – К. : ДП «УкрНДНЦ», 2023. – 34 с.

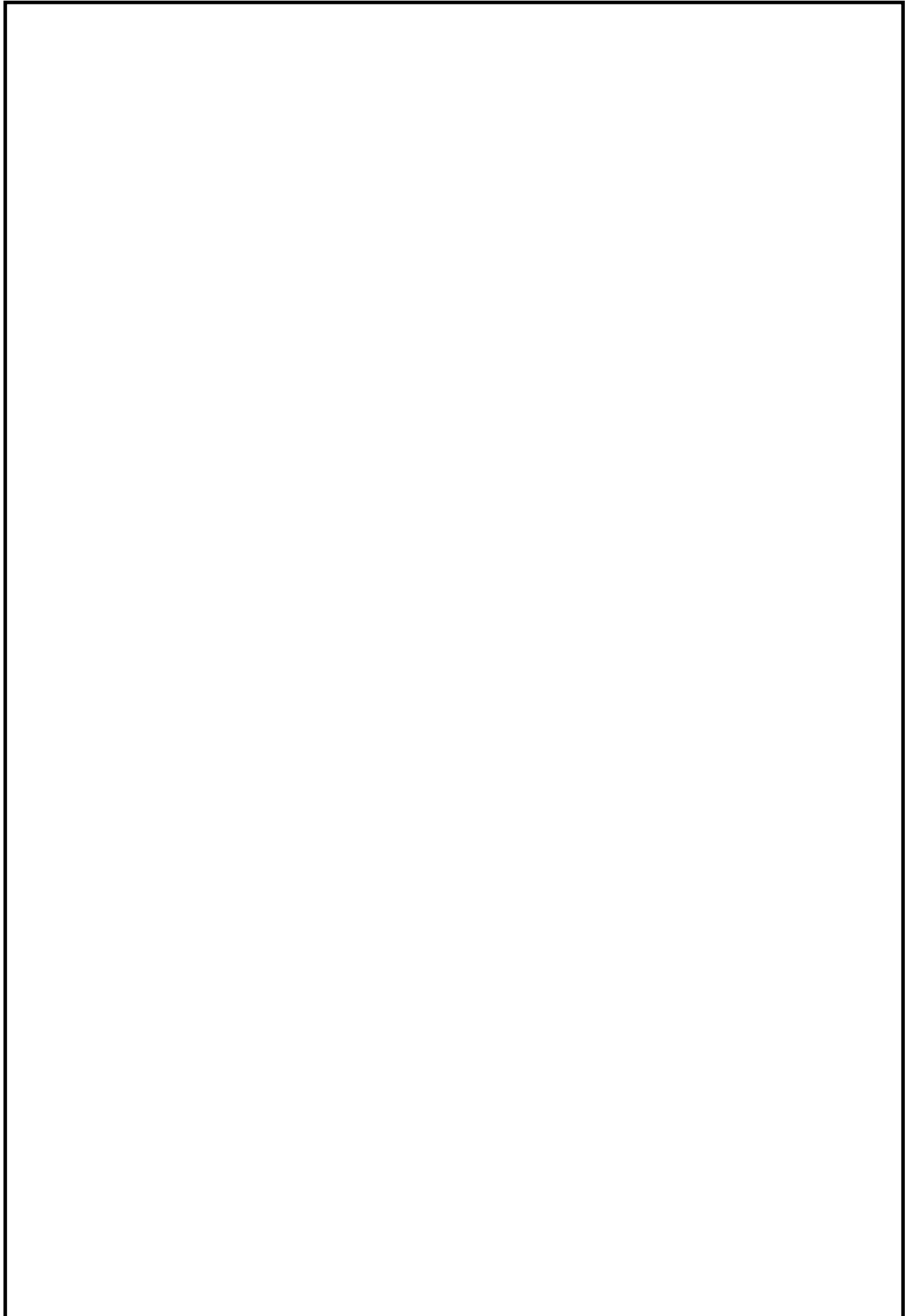
45.The Pandas Development Team. pandas-dev/pandas: Pandas. – Version 2.2. – Zenodo, 2024. – URL: <https://pandas.pydata.org/>

46.Peacefair Electronic. PZEM-004T V3.0 AC User Manual. – Peacefair, 2020. – 18 с. – URL: <https://github.com/vortigont/pzem-edl/blob/main/docs/PZEM-004T-V3.0-Datasheet-User-Manual.pdf>

47.ДСТУ ISO 8528-1:2019 Агрегати генераторні змінного струму з поршневыми двигунами внутрішнього згоряння. Частина 1. Застосування, технічні характеристики та продуктивність (ISO 8528-1:2018, IDT). – К. : ДП «УкрНДНЦ», 2021. – 26 с.

48.ДСТУ EN 60947-6-1:2018 Апаратура розподілення та керування низьковольтна. Частина 6-1. Багатофункціональна апаратура. Комутаційна апаратура автоматичного перемикачання (EN 60947-6-1:2006; A1:2014, IDT). – К. : ДП «УкрНДНЦ», 2019. – 48 с.

					<i>КвРАКІТ. 022102.01.11.ПЗ</i>	Арк.
						66
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



					<i>КвРАКІТ. 022102.01.11.ПЗ</i>	Арк.
						67
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

ДОДАТОК А

ЛІСТИНГ КОДУ

А.1 Код моделювання на мові Python файл “hems_model.py”

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import skfuzzy as fuzzy
from skfuzzy import control as ctrl

print("--- СТАРТ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ HEMS ---")

# 1. Визначення вхідних та вихідних лінгвістичних змінних (Дискурс)
soc = ctrl.Antecedent(np.arange(0, 101, 1), 'SoC')
p_bal = ctrl.Antecedent(np.arange(-6, 7, 1), 'P_bal')
load_shed = ctrl.Consequent(np.arange(0, 101, 1), 'LoadShed')

# 2. Побудова функцій належності (згідно з підрозділом 2.3 вашого диплому)
soc['Low'] = fuzzy.trapmf(soc.universe, [0, 0, 20, 40])
soc['Medium'] = fuzzy.trimf(soc.universe, [25, 50, 75])
soc['High'] = fuzzy.trapmf(soc.universe, [60, 80, 100, 100])

p_bal['Deficit'] = fuzzy.trapmf(p_bal.universe, [-6, -6, -2, 0])
p_bal['Balance'] = fuzzy.trimf(p_bal.universe, [-1, 0, 1])
p_bal['Surplus'] = fuzzy.trapmf(p_bal.universe, [0, 2, 6, 6])

load_shed['None'] = fuzzy.trimf(load_shed.universe, [0, 0, 30])
load_shed['Partial'] = fuzzy.trimf(load_shed.universe, [20, 50, 80])
load_shed['Maximum'] = fuzzy.trimf(load_shed.universe, [70, 100, 100])

# 3. Формування бази продукційних правил Мамдані (Розділ 2 та 4)
rule1 = ctrl.Rule(soc['Low'] & p_bal['Deficit'], load_shed['Maximum'])
rule2 = ctrl.Rule(soc['Medium'] & p_bal['Deficit'], load_shed['Partial'])
rule3 = ctrl.Rule(soc['High'] | p_bal['Surplus'], load_shed['None'])

# 4. Ініціалізація системи нечіткого виведення (Центр мас)
hems_ctrl = ctrl.ControlSystem([rule1, rule2, rule3])
hems_sim = ctrl.ControlSystemSimulation(hems_ctrl)

# Тестове моделювання (Експеримент №5 з Розділу 4: Аварія, низький заряд АКБ)
hems_sim.input['SoC'] = 18.0
hems_sim.input['P_bal'] = -4.0
hems_sim.compute()

# Виведення результатів тестування у консоль
output_val = hems_sim.output['LoadShed']
print(f"Вхідний заряд АКБ: 18.0%")
print(f"Вхідний дефіцит потужності: -4.0 кВт")
print(f"Обчислений рівень відсікання навантаження: {output_val:.2f}%")

# 5. ГЕНЕРАЦІЯ ТА ЗБЕРЕЖЕННЯ ГРАФІКІВ У ПАПКУ
print("Генерація графіків зачекайте кілька секунд...")

# Графік функцій належності SoC
plt.figure(figsize=(7, 4))
```

```

plt.plot(soc.universe, fuzzy.trapmf(soc.universe, [0, 0, 20, 40]), 'r',
label='Low')
plt.plot(soc.universe, fuzzy.trimf(soc.universe, [25, 50, 75]), 'g',
label='Medium')
plt.plot(soc.universe, fuzzy.trapmf(soc.universe, [60, 80, 100, 100]), 'b',
label='High')
plt.title('Функції належності лінгвістичної змінної SoC')
plt.xlabel('State of Charge (SoC), %')
plt.ylabel('Ступінь належності')
plt.legend()
plt.grid(True, linestyle='--')
plt.savefig('soc_membership.png', dpi=300, bbox_inches='tight')
plt.close()

# Побудова та розрахунок 3D поверхні відгуку
soc_space = np.linspace(0, 100, 30)
pbal_space = np.linspace(-6, 6, 30)
S, P = np.meshgrid(soc_space, pbal_space)
Z = np.zeros_like(S)

for i in range(S.shape[0]):
    for j in range(S.shape[1]):
        hems_sim.input['SoC'] = S[i, j]
        hems_sim.input['P_bal'] = P[i, j]
        try:
            hems_sim.compute()
            Z[i, j] = hems_sim.output['LoadShed']
        except:
            Z[i, j] = 0.0 # Безпечний відступ при нульових перетинах множин

fig = plt.figure(figsize=(10, 6))
ax = fig.add_subplot(111, projection='3d')
surf = ax.plot_surface(S, P, Z, cmap='viridis', edgecolor='none', alpha=0.9)
ax.set_xlabel('Заряд АКБ (SoC), %')
ax.set_ylabel('Баланс потужності P_bal, кВт')
ax.set_zlabel('Відсікання навантаження, %')
plt.title('3D-поверхня нечіткого виведення HEMS')
fig.colorbar(surf, shrink=0.5, aspect=10, pad=0.1)

# Налаштування кута огляду для максимальної наочності
ax.view_init(elev=25, azim=-135)

plt.savefig('fuzzy_surface_3d.png', dpi=300, bbox_inches='tight')
print("УСПИХ: Файли 'soc_membership.png' та 'fuzzy_surface_3d.png' збережені
у вашій папці!")
plt.show()

```

A.2 Код реалізованої програми в WOWKI файл “sketch.ino”

```

#include <Wire.h>
#include <Adafruit_GFX.h>
#include <Adafruit_SSD1306.h>

#define SCREEN_WIDTH 128
#define SCREEN_HEIGHT 64
Adafruit_SSD1306 display(SCREEN_WIDTH, SCREEN_HEIGHT, &Wire, -1);

const int POT_SUN_PIN = 34; // Потенціометр сонячної енергії
const int SWITCH_GRID_PIN = 35; // Перемикач наявності міської мережі
const int SWITCH_TARIFF_PIN = 33; // Новий перемикач: Тарифна зона (День/Ніч)

const int RELAY_LINE_2 = 14; // Синє LED-реле (Пральна машина)
const int RELAY_LINE_3 = 12; // Жовте LED-реле (Бойлер)

```

```

const int RELAY_GENERATOR = 27;    // Червоне LED-реле (Генератор)

float SoC = 50.0;                  // Поточний заряд батареї, %
float P_pv = 0.0;                  // Потужність сонця
float P_load = 4.0;                // Споживання будинку 4 кВт
float P_bal = 0.0;                 // Баланс потужності
bool is_grid_available = true;     // наявність міської мережі
bool is_night = false;             // Поточна тарифна зона

void setup() {
    Serial.begin(115200);
    pinMode(RELAY_LINE_2, OUTPUT);
    pinMode(RELAY_LINE_3, OUTPUT);
    pinMode(RELAY_GENERATOR, OUTPUT);
    pinMode(SWITCH_GRID_PIN, INPUT);
    pinMode(SWITCH_TARIFF_PIN, INPUT); // Налаштування входу тарифу

    if(!display.begin(SSD1306_SWITCHCAPVCC, 0x3C)) {
        Serial.println("Помилка ініціалізації OLED");
        for(;;);
    }
    display.clearDisplay();
    display.setTextColor(WHITE);
}

void loop() {
    // 1. Опитування датчиків та органів симуляції
    int analogValue = analogRead(POT_SUN_PIN);
    P_pv = (analogValue / 4095.0) * 5.0; // Потужність СЕС 0-5 кВт
    P_bal = P_pv - P_load;

    is_grid_available = digitalRead(SWITCH_GRID_PIN); // 1 - мережа є, 0 - нема
    is_night = digitalRead(SWITCH_TARIFF_PIN); // 1 - ніч (0.5), 0 - день (1.0)

    // Імітація динаміки акумулятора LiFePO4
    if (P_pv >= P_load) {
        SoC = min(100.0f, SoC + 1.0f); // Заряд від надлишку сонця
    } else if (is_grid_available && is_night && SoC < 95.0) {
        SoC = min(100.0f, SoC + 2.5f); // Швидкий заряд від мережі вночі за дешевим тарифом!
    } else if (is_grid_available && !is_night && SoC < 30.0) {
        SoC = min(100.0f, SoC + 1.0f); // Захисний заряд від мережі вдень (ваша нова логіка)
    } else {
        SoC = max(15.0f, SoC - 1.5f); // Розряд в автономному режимі
    }

    // 2. ВІДОБРАЖЕННЯ НА ДАШБОРДІ OLED
    display.clearDisplay();
    display.setTextSize(1);
    display.setCursor(0, 0);
    display.print("SoC: "); display.print(SoC, 1); display.println(" %");
    display.print("Sun: "); display.print(P_pv, 1); display.println(" kW");
    display.print("Grid: "); display.println(is_grid_available ? "ONLINE" : "OFFLINE");
    display.print("Tariff: "); display.println(is_night ? "NIGHT (0.5)" : "DAY (1.0)");
    display.println("-----");

    // 3. ІНТЕЛЕКТУАЛЬНЕ КЕРУВАННЯ ВИХОДАМИ (База правил Мамдані FLC)

    // СЦЕНАРІЙ 1: Повний Блекаут (Мережі немає, сонця мало, АКБ критично розряджений)
    if (!is_grid_available && P_bal < -1.5 && SoC <= 25.0) {

```

```

digitalWrite(RELAY_LINE_2, LOW); // Відсікання лінії 2
digitalWrite(RELAY_LINE_3, LOW); // Відсікання лінії 3
digitalWrite(RELAY_GENERATOR, HIGH); // ЗАПУСК ГЕНЕРАТОРУ (Остання надія)
display.println("MODE: BLACKOUT!");
display.print("START GENERATOR!");
}
// СЦЕНАРІЙ 2: Економічний нічний заряд АКБ від міської мережі
else if (is_grid_available && is_night && SoC < 90.0) {
digitalWrite(RELAY_LINE_2, HIGH);
digitalWrite(RELAY_LINE_3, HIGH);
digitalWrite(RELAY_GENERATOR, LOW); // Генератор суворо заблокований
display.println("MODE: NIGHT CHARGE");
display.print("SAVING BUDGET...");
}
// СЦЕНАРІЙ 3: Денний захисний заряд від мережі (якщо АКБ < 30%)
else if (is_grid_available && !is_night && SoC < 30.0) {
digitalWrite(RELAY_LINE_2, HIGH);
digitalWrite(RELAY_LINE_3, HIGH);
digitalWrite(RELAY_GENERATOR, LOW);
display.println("MODE: GRID CHARGE");
display.print("BATTERY LOW (DAY)");
}
// СЦЕНАРІЙ 4: Пріоритетне живлення від сонячної станції
else if (P_bal > 0.5) {
digitalWrite(RELAY_LINE_2, HIGH);
digitalWrite(RELAY_LINE_3, HIGH);
digitalWrite(RELAY_GENERATOR, LOW);
display.println("MODE: SOLAR PRIORITY");
display.print("ECO SYSTEM WORK");
}
// СЦЕНАРІЙ 5: Штатна робота від акумулятора
else {
digitalWrite(RELAY_LINE_2, HIGH);
digitalWrite(RELAY_LINE_3, HIGH);
digitalWrite(RELAY_GENERATOR, LOW);
display.println("MODE: STANDARD WORK");
display.print("SYSTEM STATUS: OK");
}

display.display();
delay(1000); // Оновлення екрана щосекунди
}

```

А.3 Код графічної візуалізації (компоновка та з'єднання компонентів) в WOWKI файл "diagram.json"

```

{
  "version": 1,
  "author": "Stud 151 KhNU - Grid & Tariff Switches",
  "editor": "wokwi",
  "parts": [
    { "type": "board-esp32-devkit-c-v4", "id": "esp", "top": 115.2, "left": -4.76,
"attrs": {} },
    { "type": "board-ssd1306", "id": "oled", "top": -121.66, "left": -18.97,
"attrs": {} },
    {
      "type": "wokwi-potentiometer",
      "id": "pot_sun",
      "top": -202.9,
      "left": 57.4,
      "attrs": { "label": "Solar Power (kW)" }
    },
  ],

```

```

{
  "type": "wokwi-slide-switch",
  "id": "sw_grid",
  "top": -168.4,
  "left": 12.7,
  "attrs": { "label": "Grid State (On/Off)" }
},
{
  "type": "wokwi-slide-switch",
  "id": "sw_tariff",
  "top": -168.4,
  "left": -54.5,
  "attrs": { "label": "Tariff (Off:Day / On:Night)" }
},
{
  "type": "wokwi-led",
  "id": "led_12",
  "top": -234,
  "left": -73,
  "attrs": { "color": "blue", "label": "Line 2 (Wash)" }
},
{
  "type": "wokwi-led",
  "id": "led_13",
  "top": -234,
  "left": -25,
  "attrs": { "color": "yellow", "label": "Line 3 (Boiler)" }
},
{
  "type": "wokwi-led",
  "id": "led_gen",
  "top": -234,
  "left": 13.4,
  "attrs": { "color": "red", "label": "GENERATOR" }
}
],
"connections": [
  [ "esp:GND.1", "pot_sun:GND", "black", [ "h-40", "v-190", "h-100" ] ],
  [ "esp:3V3", "pot_sun:VCC", "red", [ "h-30", "v-170", "h-110" ] ],
  [ "esp:34", "pot_sun:SIG", "green", [ "h-20", "v-120", "h-120" ] ],
  [ "esp:GND.1", "oled:GND", "black", [ "h-40", "v-230", "h-31.81", "v-178",
"h86.4" ] ],
  [ "esp:3V3", "oled:VCC", "red", [ "h-30", "v-278.4", "h58.8" ] ],
  [ "esp:22", "oled:SCL", "yellow", [ "h-10", "v-307.2", "h-47.9" ] ],
  [ "esp:21", "oled:SDA", "blue", [ "v-160", "h33.64", "v-171.2", "h-86.47" ] ],
  [ "esp:GND.2", "sw_grid:GND", "black", [ "v0", "h-60" ] ],
  [ "esp:3V3", "sw_grid:VCC", "red", [ "h-30", "v-100", "h-70" ] ],
  [ "esp:35", "sw_grid:OUT", "orange", [ "h-10", "v-80", "h-90" ] ],
  [ "esp:GND.2", "sw_tariff:GND", "black", [ "v0", "h-60" ] ],
  [ "esp:3V3", "sw_tariff:VCC", "red", [ "v40", "h-110" ] ],
  [ "esp:33", "sw_tariff:OUT", "purple", [ "h-10", "v40", "h-120" ] ],
  [ "esp:GND.2", "led_12:CATH", "black", [ "v50", "h-140" ] ],
  [ "esp:GND.2", "led_13:CATH", "black", [ "v50", "h-20" ] ],
  [ "esp:GND.2", "led_gen:CATH", "black", [ "v50", "h-20" ] ],
  [ "esp:14", "led_12:ANOD", "blue", [ "v30", "h-140" ] ],
  [ "esp:12", "led_13:ANOD", "yellow", [ "v30", "h-20" ] ],
  [ "esp:27", "led_gen:ANOD", "red", [ "v30", "h100" ] ],
  [ "esp:35", "sw_grid:2", "purple", [ "h-62.21", "v-81.6", "h167.96", "v-273.6"
] ],
  [ "esp:14", "led_12:A", "orange", [ "h-71.81", "v-480", "h71.96" ] ],
  [
    "esp:12",
    "led_13:A",
    "orange",

```

```

    [ "v4.8", "h-52.61", "v105.6", "h215.96", "v-600", "h-134.4", "v38.4" ]
  ],
  [ "esp:27", "led_gen:A", "orange", [ "h-62.21", "v120", "h201.6", "v-571.2", "h-
100.84" ] ],
  [ "esp:GND.3", "led_gen:C", "black", [ "h52.84", "v-422.4", "h-120.04", "v28.8"
] ],
  [ "led_gen:C", "led_l3:C", "black", [ "v-9.6", "h-48" ] ],
  [ "led_l3:C", "led_l2:C", "black", [ "h-48" ] ],
  [ "esp:33", "sw_tariff:2", "purple", [ "h-148.61", "v-4.8", "h-76.8" ] ],
  [ "sw_tariff:3", "esp:3V3", "red", [ "v9.6", "h125", "v297.6" ] ],
  [ "esp:3V3", "sw_grid:3", "red", [ "h-52.61", "v-52.8", "h167.96", "v-254.4" ]
]
],
"dependencies": {}
}

```

A.4 Код підключення бібліотек в WOWKI файл “libraries.txt”

```

# Wokwi Library List
# See https://docs.wokwi.com/guides/libraries

Adafruit SSD1306
Adafruit GFX Library

```

РЕЦЕНЗІЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Дипломник: Маначин Мирослав Миколайович

Тема: Автоматизована система інтелектуального керування та розподілу енергетичних ресурсів локального житлового об'єкта

Спеціальність: 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

Обсяг кваліфікаційної роботи:

Кількість сторінок записки 67

1. Короткий зміст роботи та прийнятих рішень: Вступ. Дослідження систем HEMS, розробка математичної моделі. Розробка схем автоматизації. Моделювання та оцінка ефективності системи
2. Висновок про відповідність роботи дипломному завданню: Робота повністю відповідає поставленому завданню
3. Характеристика виконання кожного розділу, ступінь використання останніх досягнень науки і техніки і передових методів роботи: У першому розділі проведено системний аналіз концепції Smart Home та обґрунтовано необхідність виділення спеціалізованого інтелектуального рівня HEMS (Home Energy Management System) як ефективного інструменту підвищення енергоефективності локальних житлових об'єктів. У другому розділі розроблено математичну модель миттєвого балансу потужностей локального об'єкта, яка враховує ККД перетворення гібридного інвертора та внутрішні процеси зараду/розряду накопичувача енергії. У третьому розділі Розроблено обґрунтовано та обрано оптимальний за критеріями швидкодії, енергоефективності та вартості комплект апаратного забезпечення системи автоматизації, серцем якого є 32-бітний двоядерний мікроконтролер SoC ESP32-WROOM-32. Дооснащення системи цифровими модулями PZEM-004T (v3.0), трансивером SP3485 та CAN-контролером MCP2515 дозволило створити надійний інженерний стек для збору телеметрії. У четвертому розділі розроблено та успішно реалізовано протокол тестування прикладного програмного забезпечення на основі чотирьох експлуатаційних сценаріїв, верифікацію яких проведено на інтерактивному інженерному стенді в симуляторі Wokwi.
4. Позитивні сторони роботи: висока практична цінність роботи.

5. Негативні сторони роботи: у роботі недостатньо уваги приділяється аналізу існуючих технічних рішень

6. Оцінка графічного оформлення та пояснювальної записки роботи: Пояснювальна записка оформлена коректно, згідно діючих стандартів оформлення документації

7. Відгук про роботу в цілому: Робота виконана на належному науково-технічному рівні.

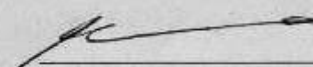
8. Інші зауваження: відсутні

9. Оцінка дипломної роботи: відмінно (90/А)

Рецензент (прізвище, ім'я, по батькові, посада, місце роботи) _____

Квоць Юрій Павлович, к.т.н, саєкт,
Зел. насадури Кібербезпекки, ХНУ

"16" 06 2026 р.

 (підпис)

Завідувачу кафедри автоматизації, комп'ютерно-інтегрованих технологій та робототехніки
Людмилі КОРЕЦЬКІЙ
здобувача вищої освіти
Маначин Мирослав Миколайович факультет ІТ,
курс ІV, група АКІТ-22-1

ЗАЯВА

З правилами чинного Положення про систему забезпечення академічної доброчесності у Хмельницькому національному університеті, згідно з яким виявлення академічного плагіату є підставою для відмови в допуску кваліфікаційної роботи до захисту і застосування заходів академічної відповідальності, ознайомлений. Про використання спеціалізованих програмних засобів (СПЗ) StrikePlagiarism та Anti-Plagiarism для перевірки кваліфікаційних робіт здобувачів вищої освіти на наявність академічного плагіату оповіщений. Надаю університету право на передачу моєї роботи для обробки та збереження в базах даних СПЗ і використання роботи для виявлення академічного плагіату в інших роботах, які перевіряються СПЗ.

Також надаю свою згоду на обробку й збереження університетом моєї роботи в Інституційному репозитарії Хмельницького національного університету.

Робота надається для перевірки в електронному варіанті. Електронна версія моєї роботи збігається (ідентична) з друкованою.

02.06.2026
дата


підпис

Протокол аналізу звіту подібності експертом

Заявляю, що я ознайомився (-лась) з Повним звітом подібності, який був згенерований Системою виявлення і запобігання плагіату щодо роботи:

Автор: Мирослав МАНАЧИН

Співавтор:

Назва: Маначин вр_на_АНТИПЛАГІАТ

Експерт: Микола ФЕДУЛА

Підрозділ: Кафедра автоматизації, комп'ютерно-інтегрованих технологій та робототехніки

Коефіцієнт подібності 1: 0.26%

Коефіцієнт подібності 2: 0%

Мікропробіли: 12

Заміна букв: 1

Інтервали: 0

Білі знаки: 0

Дата створення звіту: 2026-06-17 09:26:15.0

Після аналізу Звіту подібності констатую наступне:

Запозичення, виявлені в роботі є законними і не є плагіатом. Рівень подібності не перевищує допустимої межі. Таким чином робота незалежна і приймається.

Запозичення не є плагіатом, але перевищено граничне значення рівня подібностей. Таким чином робота повертається на доопрацювання.

Виявлено запозичення і плагіат або навмисні текстові спотворення (маніпуляції), як передбачувані спроби укриття плагіату, які роблять роботу невідповідною вимогам законодавства (Ст. 32. ЗУ Про вищу освіту, пункт 3.1, Ст. 42. ЗУ Про освіту) та вимог НАЗЯВО (Критерій 5), а також кодексу етики і процедур. Таким чином робота не приймається.

Обґрунтування:

2026-06-17



Доцент Микола Федула

Дата

експерт

Anti-Plagiarism v-15.258 (global version)

The maximum coincidence with one document 1.0%

Dictionaries check: en_US, ru_RU, ua_UA. **Errors in the documents: 11%**

ID: 275706 Title: БКР Автоматизована система інтелектуального керування та розподілу енергоресурсів локального житлового об'єкта Added in a DB: 2026-06-17 Authors: Мирослав МАНАЧИН Heads: Микола ФЕДУЛА Consultants: Opponents:	Document		Sum coincidence on the DB	
	Symbols	Lexemes	Symbols	Lexemes
	66025	529	1643 (2%)	24 (5%)

Plagiarism sources

ID	Description	Plagiarism presence in the document	
		Symbols	Lexemes

**РІШЕННЯ ЕКСПЕРТНОЇ КОМІСІЇ
КАФЕДРИ АВТОМАТИЗАЦІЇ, КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ТА
РОБОТОТЕХНІКИ ПРО ДОПУСК КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ДО ЗАХИСТУ**

Назва кваліфікаційної роботи: «Автоматизована система інтелектуального керування та розподілу енергоресурсів локального житлового об'єкта»

Автор: Маначин Мирослав Миколайович

Освітня програма: Освітньо-професійна програма «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології»

Рівень вищої освіти: перший (бакалаврський)

Спеціальність: 151 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології

Науковий керівник: Федула Микола Васильович, кандидат технічних наук, доцент

На основі аналізу кваліфікаційної роботи на дотримання вимог академічної доброчесності (у т. ч. відсутності ознак академічного плагіату) з урахуванням результатів перевірки роботи спеціалізованим програмним засобом(ами) комісія зробила такий висновок:

№	Висновок	Позначка про відповідність
1	Ознаки академічного плагіату	
1.1	Запозичення, виявлені в роботі є законними і не є академічним плагіатом. Робота приймається до захисту.	відповідає
1.2	Виявлені запозичення не є академічним плагіатом, розміщені в розділах, які не описують безпосередньо авторське дослідження, але кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. Робота приймається до захисту, але має бути відкоригована.	
1.3	Виявлені запозичення не є академічним плагіатом, але частково розміщені в розділах, які описують безпосередньо авторське дослідження, а кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. Робота може бути допущена до захисту після того як буде відкоригована та доопрацьована і успішно пройде повторну перевірку на академічний плагіат.	
1.4	Робота містить навмисні текстові спотворення, передбачувані спроби укриття текстових запозичень або інші прояви академічного плагіату. Робота містить фабрикацію або фальсифікацію даних. Робота не допускається до захисту.	
2	Інші види порушень академічної доброчесності	

Підтвердження:

Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є плагіатом, оскільки:

1) у тексті роботи системами перевірки на плагіат виявлено схожість з деякими документами в частині загальноживаних обов'язкових словосполучень у стандартних бланках, у структурі змісту, назвах розділів/підрозділів, у назвах публікацій у переліку джерел посилання;

2) усі запозичення є фрагментарними або мають належним чином оформленні посилання;

3) виявлені модифікації тексту не впливають на відсоток схожості.


Сумарний обсяг всіх запозичень, визначений системою виявлення збігів ідентичності/схожості, складає 0,26% і адресується до 48 джерела, що, з урахуванням наведених обґрунтувань, відповідає характеру теми і свідчить на користь кваліфікаційної роботи.

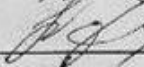
Дата 17.06.2026р.

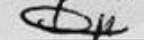
Завідувач кафедри

Гарант освітньої програми

Керівник кваліфікаційної роботи







Людмила КОРЕЦЬКА

Юрій ФОРКУН

Микола ФЕДУЛА