

Міністерство освіти і науки України  
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії  
(повна назва факультету)

Кафедра комп'ютерно-інтегрованих технологій  
(повна назва кафедри)

# КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

магістр

(назва освітнього ступеня)

на тему: Розроблення та дослідження автоматизованої системи моніторингу та керування енергоспоживанням приміщень з використанням технологій IoT

Виконав: студент VI курсу, групи КТм-61

174 Автоматизація,  
комп'ютерно-інтегровані  
технології та робототехніка  
(шифр і назва спеціальності)

Чуревич Б.В.  
(підпис) (прізвище та ініціали)

Дильовий О.О.  
(підпис) (прізвище та ініціали)

Микитишин А.Г.  
(підпис) (прізвище та ініціали)

Левицький В.В.  
(підпис) (прізвище та ініціали)

Микитишин А.Г.  
(підпис) (прізвище та ініціали)

Коноваленко І.В.  
(підпис) (прізвище та ініціали)

Тернопіль  
2024

Міністерство освіти і науки України  
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії  
(повна назва факультету)

Кафедра комп'ютерно-інтегрованих технологій  
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Микитишин А.Г.  
(підпис) (прізвище та ініціали)

«    » листопада 2024 р.

**ЗАВДАННЯ  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

на здобуття освітнього ступеня Магістр  
(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка  
(шифр і назва спеціальності)

Студенту Чуревичу Богдану Васильовичу, Дильовому Олексію Олександровичу  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розроблення та дослідження автоматизованої системи моніторингу та керування енергоспоживанням приміщень з використанням технологій ІоТ

Керівник роботи Микитишин Андрій Григорович, к.т.н., доцент кафедри КТ  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від «29» листопада 2024 року № 4/7-1030

2. Термін подання студентом завершеної роботи 23 грудня 2024р.

3. Вихідні дані до роботи Наукові публікації про автоматизовані системи моніторингу і Керування енергоспоживанням приміщень, застосовуючи технології ІоТ

4. Зміст роботи

Вступ. 1 Аналітична частина, 1.1 Постановка задачі, 1.2 Система енергоменеджменту

1.3 Бездротова мережа давачів та виконавчих механізмів в ІоТ, 1.4 Розробка рішень,

1.5 Огляд відомих технічних рішень, 2 Технологічна частина, 3 Конструкторська частина,

3.1 Опис системи управління енергоспоживанням, 3.2 Бездротова мережа давачів/приводів

3.3 Центральний вузол, 3.4 Бездротові вузли давачів та приводів, 3.5 Хмарний сервер,

3.6 Веб-додаток користувача, 4 Науково-дослідницька частина, 4.1 Результати та оцінки

розробки, 4.2 Аналіз системи, 5 Спеціальна частина, 5.1 Аналіз результатів,

5.2 Продуктивність та тестування системи, 5.3 Обґрунтування переваг і обмежень,

6 Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях, 6.1 Питання щодо охорони праці, 6.2

Питання щодо безпеки в надзвичайних ситуаціях,

Висновки, Перелік джерел, Додатки

5. Перелік графічного матеріалу

1 Титульна сторінка. 2 Тема, Мета, Об'єкт, Предмет дослідження. 3 Завдання дослідження.

4 Актуальність дослідження. 5 Впровадження ДС-МКМ для розробки СЕМ, 6 Структура ІоТ-

СЕМ-БСМА, 7 Архітектура БСМА, 8 Блок-схема функціонування ЦВ, 9 З'єднання підлеглого

вузла з платформою HPL, 10 Структура бази даних і взаємодії з хмарою, 11 Блок-схема веб-

додатку користувача, 12 Потужність та енергетичний відгук, 13 Реакція шини постійної

напруги, 14 Реакція напруги на шині постійного струму, 15 Інтерфейс веб-додатку

користувача, 16 Процесу моніторингу з використанням ВДК 17 Висновки. 18 Завершальний.

6. Консультанти розділів роботи

| Розділ                           | Прізвище, ініціали та посада консультанта | Підпис, дата   |                  |
|----------------------------------|-------------------------------------------|----------------|------------------|
|                                  |                                           | завдання видав | завдання прийняв |
| Охорона праці                    | доц. Тотосько О.В.                        |                |                  |
| Безпека в надзвичайних ситуаціях | ст. викл. Клепчик В.М.                    |                |                  |

7. Дата видачі завдання 29 листопада 2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № з/п | Назва етапів роботи                                       | Термін виконання етапів роботи | Примітка |
|-------|-----------------------------------------------------------|--------------------------------|----------|
| 1.    | Ознайомлення з завданням до кваліфікаційної роботи        | 29.11.2024                     | Виконано |
| 2.    | Підбір джерел про системи моніторингу                     | 30.11.2024-01.12.2024          | Виконано |
| 3.    | Вибір компонентної бази                                   | 02.12.2024-03.12.2024          | Виконано |
| 4.    | Виконання дослідження автоматизованої системи моніторингу | 04.12.2024-05.12.2024          | Виконано |
| 5.    | Переклад та опрацювання джерел                            | 06.12.2024-07.12.2024          | Виконано |
| 6.    | Розроблення архітектури системи                           | 08.12.2024-09.12.2024          | Виконано |
| 7.    | Розроблення панелі керування системи                      | 10.12.2024-11.12.2024          | Виконано |
| 8.    | Оформлення розділу «Аналітична частина»                   | 12.12.2024-13.12.2024          | Виконано |
| 9.    | Оформлення розділу «Конструкторська частина»              | 13.12.2024-14.12.2024          | Виконано |
| 10.   | Оформлення розділу «Науково дослідна частина»             | 14.12.2024-15.12.2024          | Виконано |
| 11.   | Оформлення розділу «Технологічна частина»                 | 15.12.2024-16.12.2024          | Виконано |
| 12.   | Оформлення розділу «Спеціальна частина»                   | 16.12.2024-17.12.2024          | Виконано |
| 13.   | Виконання розділу «Охорона праці та безпека в НС»         | 17.12.2024-18.12.2024          | Виконано |
| 14.   | Підготовка графічного матеріалу                           | 18.12.2024-19.12.2024          | Виконано |
| 15.   | Оформлення кваліфікаційної роботи                         | 19.12.2024-20.12.2024          | Виконано |
| 16.   | Нормоконтроль                                             | 20.12.2024-21.12.2024          | Виконано |
| 17.   | Перевірка на плагіат                                      | 21.12.2024                     | Виконано |
| 18.   | Попередній захист кваліфікаційної роботи                  | 22.12.2024                     | Виконано |
| 19.   | Захист кваліфікаційної роботи                             | 23.12.2024                     |          |
|       |                                                           |                                |          |
| 10.   |                                                           |                                |          |
| 11.   |                                                           |                                |          |
| 12.   |                                                           |                                |          |
| 13.   |                                                           |                                |          |
| 14.   |                                                           |                                |          |
|       |                                                           |                                |          |
|       |                                                           |                                |          |

Студент

Чуревич Б.В.

Студент

(підпис)

Дильовий О.О.  
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Микитишин А.Г.  
(прізвище та ініціали)

## АНОТАЦІЯ

Розроблення та дослідження автоматизованої системи моніторингу та керування енергоспоживанням приміщень з використанням технологій IoT // Кваліфікаційна робота освітнього рівня «Магістр» // Чуревич Богдан Васильович, Дильовий Олексій Олександрович // Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії, кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій, група КТМ-61 // Тернопіль, 2024 // С. 66, рис. – 11, табл. – 1, кресл. – 18, додат. – 3, бібліогр. – 48.

**Ключові слова:** система моніторингу, інтелектуальна система, бездротові мережі, інтернет речей, давачі.

Кваліфікаційна робота присвячена розробці автоматизованої системи моніторингу та керування енергоспоживанням приміщень з використанням технологій IoT.

В першому розділі кваліфікаційної роботи описані відомі технічні рішення та постановка задачі.

В другому розділі кваліфікаційної роботи режими роботи та впровадження системи

В третьому розділі кваліфікаційної роботи вибрано та проаналізовано компоненти системи, представлено технологічні рішення.

В четвертому розділі описано результати та оцінки роботи системи.

В п'ятому розділі висвітлено аналіз продуктивності системи, тестування та переваги і обмеження.

В шостому розділі кваліфікаційної роботи розглянуто забезпечення безпечної роботи з обладнанням.

Об'єкт дослідження: система управління енергоспоживанням мікромереж постійного струму.

Предмет дослідження: методи управління енергоспоживанням мікромереж постійного струму із використанням технологій IoT.

## ANNOTATION

Development and research of an automated monitoring and control system for energy consumption in premises using IoT technologies // The educational level "Master" qualification work // Churevych Bohdan Vasylovych, Dylowyi Oleksii Oleksandrovykh// Ternopil Ivan Pulyuy National Technical University, Faculty of Applied Information Technologies and Electrical Engineering, Department of Computer-Integrated Technologies, KTm-61 group // Ternopil, 2024 // P. 66, fig. - 11, tables - 1, chair. - 18, annexes - 3, ref. - 48.

**Key words:** monitoring system, intelligent system, wireless networks, internet of things, sensors.

The qualification work is devoted to the development of an automated system for monitoring and controlling energy consumption in premises using IoT technologies.

The first chapter of the qualification work describes known technical solutions and the problem statement.

The second section of the qualification work describes the system operation and implementation.

The third section of the qualification work selects and analyses the system components and presents technological solutions.

The fourth section describes the results and evaluation of the system.

The fifth chapter covers the analysis of system performance, testing, and advantages and limitations.

The sixth chapter of the qualification work deals with ensuring safe operation of the equipment.

Object of study: energy management system for DC microgrids.

Subject of research: methods of managing the energy consumption of DC microgrids using IoT technologies.

## **ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ**

IoT (англ. Internet of Things) – Інтернет речей.

HIL – (англ. Hardware-in-the-Loop) – технологія де вихідна система розбивається на частини.

DC – (англ. direct current) – постійний струм

AC – (англ. alternating current) – змінний струм

CN – (англ. Central node) – центральний вузол (ЦВ)

ФЕС – фотоелектрична система

АСЗЕ – акумуляторна система зберігання енергії

СЕП – силові електронні перетворювачі

СА – скінченний автомат

БСМА – бездротова мережа давачів і виконавчих механізмів

СЕМ – система управління енергоменеджменту

ВДЕ – відновлювані джерела енергії

ВДК – веб-додаток користувача

МКМ – мікромережі

ЦК – центральний контролер

БСВ – бездротовий сенсорний вузол

АЦП – аналого-цифровий перетворювач

ЦАП – цифровий-аналого перетворювач

## ЗМІСТ

|                                                                    |    |
|--------------------------------------------------------------------|----|
| ВСТУП .....                                                        | 6  |
| 1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА .....                                         | 9  |
| 1.1 Постановка задачі .....                                        | 9  |
| 1.2 Система енергоменеджменту .....                                | 10 |
| 1.3 Бездротова мережа давачів та виконавчих механізмів в IoT ..... | 11 |
| 1.4 Розробка рішень .....                                          | 13 |
| 1.5 Огляд відомих технічних рішень .....                           | 14 |
| 2 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА .....                                       | 18 |
| 3 КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА .....                                    | 24 |
| 3.1 Опис системи управління енергоспоживанням IoT .....            | 24 |
| 3.2 Бездротова мережа давачів/приводів (Блок А) .....              | 25 |
| 3.3 Центральний вузол .....                                        | 27 |
| 3.4 Бездротові вузли давачів та приводів (локальні сервери) .....  | 29 |
| 3.5 Хмарний сервер (Блок В) .....                                  | 30 |
| 3.6 Веб-додаток користувача (Блок С) .....                         | 31 |
| 4 НАУКОВО ДОСЛІДНИЦЬКА ЧАСТИНА .....                               | 33 |
| 4.1 Результати та оцінки розробки .....                            | 33 |
| 4.2 Аналіз системи .....                                           | 38 |
| 5 СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА .....                                         | 41 |
| 5.1 Аналіз результатів .....                                       | 41 |
| 5.2 Продуктивність та тестування системи .....                     | 42 |
| 5.3 Обґрунтування переваг і обмежень .....                         | 44 |
| 6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ .....          | 45 |
| 6.1 Питання щодо охорони праці .....                               | 45 |
| 6.2 Питання щодо безпеки в надзвичайних ситуаціях .....            | 49 |
| ВИСНОВКИ .....                                                     | 52 |
| ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ .....                                               | 54 |
| ДОДАТКИ                                                            |    |

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Сучасний енергетичний сектор стикається з низкою викликів, пов'язаних зі зростанням попиту на енергію, необхідністю інтеграції відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) та забезпеченням енергоефективності. Використання мікромереж (МКМ) із застосуванням технологій Інтернету речей (IoT) стає важливим кроком до подолання цих викликів. Вдосконалення систем управління енергоменеджменту (СЕМ), що включають бездротові сенсорні мережі та хмарні технології, дозволяє забезпечити стабільність, економічність і гнучкість роботи таких систем.

Інтеграція IoT у СЕМ відкриває можливості для віддаленого моніторингу, автоматизації та оперативного керування мікромережею. Однак реалізація таких рішень супроводжується певними технічними труднощами, зокрема затримками в передачі даних, стабільністю роботи шини постійного струму та залежністю від хмарних платформ. Тема впровадження IoT-СЕМ-БСМА є актуальною через її здатність вирішувати ці питання та забезпечувати якісне енергопостачання з мінімальними витратами.

Враховуючи зростаючий попит на децентралізовані енергетичні системи та їхню адаптацію до умов нестабільності енергоринку, дослідження ефективності таких систем, як IoT-СЕМ-БСМА, є важливим кроком до забезпечення сталого розвитку енергетики.

**Мета і задачі дослідження.** Метою даної кваліфікаційної роботи освітнього рівня «Магістр» є розробка, реалізація та оцінка ефективності системи управління енергоспоживанням IoT-СЕМ-БСМА для мікромереж постійного струму (DC-МКМ), яка забезпечує централізоване управління, віддалений моніторинг, економічність та стабільність функціонування при інтеграції відновлюваних джерел енергії. Для досягнення поставленої мети потрібно виконати ряд завдань, зокрема:

- Дослідити сучасні методи управління мікромережами з використанням IoT.

- Визначити переваги та недоліки існуючих систем управління енергоспоживанням.
- Створити архітектуру системи з використанням бездротової мережі давачів і виконавчих механізмів (БСМА).
- Реалізувати скінченний автомат (СА) для управління режимами роботи елементів DC-МКМ.
- Налаштувати взаємодію між БСМА, хмарним сервером ThingSpeak та веб-додатком користувача.
- Забезпечити роботу системи в автоматичному і ручному режимах.
- Провести моделювання роботи системи на платформі HIL.
- Перевірити коректність роботи вузлів БСМА та їх взаємодію з центральним вузлом.
- Проаналізувати час реакції системи та стабільність напруги на шині постійного струму.
- Оцінити відмовостійкість і гнучкість системи в різних режимах роботи.
- Визначити способи оптимізації часу відновлення СА.

**Об’єкт дослідження** є система управління енергоспоживанням мікромереж постійного струму (DC-МКМ), що включає інтеграцію відновлюваних джерел енергії, бездротових сенсорних мереж (БСМА) та хмарних технологій.

**Предмет дослідження** методи управління енергоспоживанням мікромереж постійного струму (DC-МКМ) із використанням технологій IoT. Особлива увага приділяється алгоритмам скінченних автоматів (СА), бездротовим сенсорним мережам (БСМА) і їхній інтеграції з хмарними платформами для забезпечення стабільності та гнучкості системи. Досліджуються параметри продуктивності, такі як час реакції, стабільність напруги та можливості віддаленого моніторингу і керування.

**Наукова новизна одержаних результатів** кваліфікаційної роботи полягає у розробці нової архітектури IoT-СЕМ-БСМА для мікромереж постійного струму, яка інтегрує бездротові мережі давачів, хмарні сервіси та веб-додаток для управління. Вперше запропоновано скінченний автомат (СА),

що забезпечує автоматичний і ручний режими роботи системи, а також оцінено вплив затримок бездротового зв'язку на стабільність енергетичного балансу. Рішення спрямоване на зниження витрат і підвищення ефективності управління мікромережами.

**Практичне значення одержаних результатів.** полягає в можливості безпосереднього впровадження сучасних систем управління мікромережами постійного струму (DC-МКМ). Розроблена система IoT-СЕМ-БСМА дозволяє забезпечити віддалений моніторинг, гнучке управління енергоспоживанням та ефективну інтеграцію відновлюваних джерел енергії з використанням хмарних технологій і бездротових мереж. Застосування цієї системи сприяє зниженню витрат на інфраструктуру зв'язку, підвищенню надійності енергопостачання та адаптації мікромереж до змінних умов експлуатації.

**Апробація результатів магістерської роботи.** Основні результати проведених досліджень обговорювались на XIII Міжнародній науково-технічній конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій» Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя (м. Тернопіль, 2024 р.).

**Публікації.** Основні результати кваліфікаційної роботи опубліковано у конференції (Див. додаток А).

**Структура й обсяг кваліфікаційної роботи.** Кваліфікаційна робота складається зі вступу, шістьох розділів, висновків, списку літератури з 48 найменувань та 3 додатків. Загальний обсяг кваліфікаційної роботи складає 66 сторінки, з них 54 сторінки основного тексту, який містить 11 рисунків та 1 таблицю.

## 1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

### 1.1 Постановка задачі

Незважаючи на те, що наявність енергії стала необхідною для виконання наших повсякденних завдань, виробництво енергії все ще спричиняє викиди парникових газів. Це пов'язано з використанням викопного палива, а також постійним зростанням попиту на енергію в різних виробничих секторах. Використання відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), таких як сонце, вітер та океанські хвилі, є життєздатною альтернативою для вирішення цієї глобальної проблеми. Для підвищення ефективності використання цих джерел енергії з'являються мікромережі (МКМ), які також надають перевагу їх впровадженню у віддалених місцях [1]. Мікромережа визначається як "група взаємопов'язаних навантажень і розподілених енергетичних ресурсів з визначеними електричними межами, що утворюють локальну електроенергетичну систему на рівні розподільчої напруги, яка діє як єдиний керований об'єкт і здатна працювати як в мережевому, так і в острівному режимі" [2].

Однак, МКМ представляє незручності, пов'язані з переривчастим виробництвом енергії з ВДЕ через стохастичну поведінку в атмосферних умовах; це зазвичай спостерігається у фотоелектричних панелях та вітрогенераторах. Якщо додати коливання добового споживання енергії, різні елементи, пов'язані між собою в МКМ (наприклад, генератори, накопичувачі енергії, навантаження тощо), а також режими роботи мережі, то управління енергетичним балансом в МКМ стає багатообмеженою, багатоцільовою проблемою. Цей тип проблем передбачає скоординоване управління взаємопов'язаними елементами в МКМ; таке скоординоване управління зазвичай називається системою енергетичного менеджменту (СЕМ) [3]. СЕМ гарантує ефективну та економічну роботу МКМ, враховуючи вироблену ВДЕ енергію, стан кожного елемента МКМ, попит на енергію з боку навантажень і навіть деякі зовнішні фактори, які можуть включати вартість електроенергії та палива, погодні умови та їх прогнозування. На основі цих змінних СЕМ може

керувати енергообміном, щоб мінімізувати щоденні експлуатаційні витрати та зменшити втрати енергії [4].

Взаємозв'язок елементів у МКМ здійснюється за допомогою силових електронних перетворювачів (СЕР). Завдяки СЕР можна створити сумісність між різними типами ВДЕ в МКМ, тому функціональність МКМ в основному залежить від управління СЕР, яке виконує СЕМ [5]. На додаток до зменшення негативного впливу, спричиненого методами виробництва енергії, що працюють на викопному паливі, МКМ не тільки виділяється завдяки своїй роботі з вищою ефективністю та меншими витратами, але й завдяки своїй гнучкості, стійкості та стабільності [6,7]. Якщо МКМ може працювати з головною шиною постійного, змінного або обох типів, то МКМ можна класифікувати як АС-МКМ, DC-МКМ або гібридний DC-АС-МКМ [8,9]. Однак, постійний струм має більше переваг, ніж змінний струм, такі як незалежність від контролю частоти синхронізації та зменшення втрат енергії на провідність та реактивну потужність, хоча він передає більшу потужність [10].

## **1.2 Система енергоменеджменту**

СЕМ визначається як - комп'ютерна система, що складається з програмної платформи, яка надає базові допоміжні послуги, та набору додатків, що забезпечують функціональність, необхідну для ефективної роботи об'єктів генерації та передачі електроенергії з метою забезпечення належної безпеки енергопостачання за мінімальних витрат [11]. Зазвичай, структурна ієрархія реалізується як стандартизоване рішення для СЕМ, де можуть існувати три рівні управління: первинний, вторинний та третинний рівні. Первинний рівень містить локальне керування для кожного з елементів, з'єднаних між собою в МКМ. У випадку вторинного рівня відбувається узгоджене регулювання напруги з локальними контролерами на первинному рівні. Цей рівень може також включати регулювання частоти як у випадку АС-МКМ, так і у випадку гібридних DC/АС МКМ. Третинний рівень - це рівень нагляду, який відповідає за реалізацію стратегій управління, управління перетоками електроенергії,

узгодження виробництва та попиту на енергію, а також оптимізацію роботи ММГ [12]. Залежно від розподілу контролерів на кожному рівні, управління структурою СЕМ можна розділити на централізоване, децентралізоване та розподілене. Зокрема, в централізованій структурі (ЦС) всі локальні контролери управляються центральним контролером (ЦК). Тут кожен присутній елемент МКМ постійно надсилає оновлення про свій робочий стан до ЦК, який надсилає їм зворотній зв'язок за допомогою керуючих сигналів. Ці сигнали необхідні для встановлення стабільності на шині постійного струму та організованого обміну енергією між елементами. Оскільки робота КС ґрунтується на обміні інформацією між взаємопов'язаними елементами в МКМ і ЦК, комунікаційний рівень є ключовим елементом для цієї структури [13,14]. Для вибору адекватної технології для комунікаційного рівня в СЕМ важливо враховувати покриття території, швидкість передачі, надійність та енергоспоживання. У літературі повідомляється про використання як дротових (наприклад, лінія електропередач, Ethernet, оптоволокну), так і бездротових (наприклад, GSM, GPRS, WiMAX, Z-wave, ZigBee, 5G, Bluetooth та ін.) технологій. З одного боку, дротові технології не тільки надійніші за бездротові, але й мають вищу швидкість передачі даних. З іншого боку, бездротові технології дешевші за свої аналоги. У той же час, існує чітка тенденція до інтеграції Інтернету речей (IoT) в контексті МКМ, тому використання бездротових технологій зв'язку робить МКМ більш сумісним з цією тенденцією [12,15].

### **1.3 Бездротова мережа давачів та виконавчих механізмів в IoT**

Бездротова сенсорна мережа (БСМ) - це сукупність давачів (бездротових сенсорних вузлів), об'єднаних бездротовим зв'язком і розподілених на певній території. У свою чергу, бездротовий сенсорний вузол (БСВ) - це електронний пристрій, що складається щонайменше з одного давача для вимірювання фізичних явищ, блоку цифрової обробки, прийомопередавача та джерела енергії. Крім того, до складу БСМ можуть входити аналого- цифрові перетворювачі (АЦП) та цифро-аналогові перетворювачі (ЦАП) [16-18].

Основними завданнями БСМ є збір інформації з робочого середовища, її попередня обробка та передача до центрального вузла через проміжні вузли. Зокрема, БСМ використовується в різних галузях, таких як оборона, охорона навколишнього середовища, охорона здоров'я, сільське господарство, енергетика, транспорт та інші. У всіх цих галузях БСМ відповідає за три ключові функції: позиціонування, моніторинг та управління [19,20]. Для розробки програми управління за допомогою БСМ необхідно розширити мережу бездротовими вузлами виконавчих механізмів і керуючими вузлами, щоб перетворити її в бездротову мережу давачів і виконавчих механізмів (БСМА). Як правило, за допомогою БСМА можна вимірювати фізичні явища в процесі; крім того, ця інформація передається контролеру, чий керуючі дії, нарешті, ретранслюються як зворотний зв'язок з низькою затримкою і в надійних умовах. Оскільки мережі БСМА пропонують легку агрегацію в додатки IoT, вони також набули популярності не тільки тому, що їх реалізація вимагає меншої інфраструктури і витрачає менше зусиль, але і тому, що вони дешевші, ніж дротові рішення [21-23].

IoT - це парадигма, орієнтована на взаємозв'язок спільних пристроїв, що працюють зі спільною метою, тобто для досягнення інтерактивності між фізичним і віртуальним середовищами. Таким чином, IoT інтегрує давачі, обчислювальні системи, Інтернет, вбудовані системи, радіочастотну ідентифікацію (RFID) і комунікаційні технології. Загалом, додаток IoT має три основні рівні: рівень сприйняття, мережевий рівень і прикладний рівень. По-перше, рівень сприйняття збирає інформацію від пристроїв (речей) після того, як вони отримали інформацію з робочого середовища. Потім ця інформація передається на прикладний рівень за допомогою набору комунікаційних технологій, встановлених на мережевому рівні. Нарешті, прикладний рівень зберігає інформацію, отриману від речей, а також аналізує її та організовує для відображення користувачам у зрозумілому для них форматі. Оскільки рівень сприйняття взаємодіє з фізичним світом, збираючи з нього інформацію, БСМ та БСМА є ключовими елементами цього рівня [24-26]. Сьогодні IoT трансформував повсякденний спосіб життя людей, головним чином,

пропонуючи можливості моніторингу, аналізу та управління будь-яким пристроєм (річчю) по всьому світу за допомогою підключення до Інтернету [27].

#### **1.4 Розробка рішень**

У цій роботі представлена розробка СЕМ IoT на основі БСМА (IoT-СЕМ БСМА) для DC-МКМ. DC-МКМ складається з ФЕС, АСЗЕ, двонаправленого АС/DC СЕП для з'єднання MG і змінних резистивних навантажень. СЕМ, що контролює DСМКМ, була розроблена як централізована та ієрархічна, і функціонує на основі кінцевого автомата (СА). Для того, щоб зробити СЕМ оперативною, була розроблена глобальна мережа БСМА з центральним вузлом і трьома периферійними вузлами. Ці периферійні вузли сприймають різні змінні від підключених до МКМ елементів і встановлюють режим роботи (РР) для своїх локальних контролерів. Потім отримана інформація надсилається до центрального вузла, який містить СА і відповідає периферійним вузлам адекватним ОМ для їх локальних контролерів. Крім того, центральний вузол концентрує отримані дані від МКМ і відправляє їх на хмарний сервер для зберігання. Нарешті, зібрані дані можуть бути віддалено відображені у веб-додатку користувача (ВДК). ВДК також дозволяє користувачеві визначити ОМ для кожного елемента, підключеного до МКМ, де кожен з них може бути налаштований на роботу в автоматичному режимі (стани, визначені СА) або в ручному режимі.

Це рішення забезпечує централізовану СЕМ з низькою вартістю рівня зв'язку між локальними контролерами та ЦС у порівнянні з дротовими технологіями. Крім того, СЕМ має гнучку інфраструктуру для додавання нових елементів до глобальної мережі БСМА без значних змін. Для віддаленого моніторингу та управління DC-МКМ в комплект поставки входить ВДК. З цією метою ВДК має графічний і зручний інтерфейс, який показує поведінку всіх елементів, підключених до DC-МКМ, надаючи користувачеві загальну панораму всієї системи, а також її продуктивність. Для управління користувач

має можливість визначити індивідуальний ОМ для кожної системи, що міститься в DC-МКМ. Оскільки система включає режим ручного управління, користувач може налаштувати DC-МКМ на безпечний і стабільний режим роботи в непередбачуваних умовах експлуатації за допомогою стратегій енергоменеджменту, навіть для випадків, коли КК не впорався з керуванням, коли будь-яка з систем в DC-МКМ вийшла з ладу. В цілому, ця робота робить внесок наступними положеннями:

- Представити альтернативну недорогу гнучку комунікаційну інфраструктуру.
- Запропонувати додаток для віддаленого моніторингу, заснований на графічному та зручному для користувача контексті.
- Забезпечити віддалений механізм моніторингу та керування DC-МКМ.
- Розширити третинний рівень СЕМ, включивши віддалені ручні дії для управління непередбачуваними умовами експлуатації (наприклад, збої в будь-якій системі) [10].

### **1.5 Огляд відомих технічних рішень**

У цьому розділі розглянуто низку суміжних робіт, пов'язаних із застосуванням БСМ, БСМА та IoT в енергетиці. Зокрема, ці роботи зосереджені на розробці додатків для управління та моніторингу енергетичних систем. Порівняння між сучасним станом цього розділу і запропонованою IoT-СЕМ-БСМА в рамках цього дослідження проводиться в Розділі 7.

В роботі [28] представлено інтелектуальну СЕМ на основі Інтернету речей для управління попитом у "розумній" електромережі. Система має інтелектуальний лічильник, який був побудований з давачами напруги та струму, а також механічним реле. На основі даних з давачів інтелектуальний лічильник обчислює значення середньоквадратичного значення напруги, середньоквадратичного значення струму та коефіцієнта потужності. Потім ці значення завантажуються на хмарний сервер, де зберігаються і

використовуються для обчислення статистичних даних про споживання енергії. Статистичні дані, розміщені на сервері, можуть бути доступні користувачеві через веб-додаток на основі API. Ця система, представлена в [28], має лише керуючу дію підключення/відключення навантаження, оскільки система управляє лише стороною попиту.

Аналогічно, в роботі [29] представлено реалізацію інтелектуальної СЕМ на стороні попиту. [29] представлено реалізацію інтелектуальної СЕМ на основі IoT для сторони попиту. Тут СЕМ інтелектуально підключає/відключає три навантаження, які живляться від фотоелектричної системи (ФЕС). Щоб визначити, яке навантаження має бути підключене/відключене, алгоритм враховує виробництво ФЕС та рівень пріоритету, присвоєний кожному навантаженню. Локальна мережа відповідає за збір даних про виробництво, прогнозування та роботу системи, і ці дані завантажуються на сервер для подальшої візуалізації. Ця локальна мережа включає в себе глобальну мережу БСМА з центральним вузлом і трьома периферійними пристроями для підключення навантажень. Зокрема, СЕМ, запропонована в [29], має управління на стороні попиту, приймаючи рішення про підключення/відключення навантаження, але користувач не може зробити висновок про це рішення.

Проектування та розробка IoT смарт-лічильника з керуванням навантаженням для домашньої СЕМ була представлена в роботі [30]. Зокрема, смарт-лічильник був розроблений з блоком вимірювання електричної енергії, мікроконтролером ESP32 для підключення до Інтернету та парою реле для керування електричними навантаженнями, підключеними до двох штепсельних роз'ємів. Хмарний сервер отримує електричні вимірювання від розумного лічильника. За допомогою цього хмарного сервера можна не тільки візуалізувати ці вимірювання, але й задати певні налаштування для підключення або відключення електричного навантаження, коли воно перевищує попередньо встановлений поріг активної потужності. Подібно до [28,29], цей додаток виконує лише керуючі дії на стороні попиту, але на відміну від [29], користувач має можливість або вмикати, або вимикати підключені електричні навантаження.

У роботі [31] автори розробили IoT-систему для МКМ для моніторингу роботи літій-іонної батареї в режимі реального часу. Система складається з батареї, блоку управління батареєю (Battery Management Unit, BMU), шлюзу GX, Raspberry Pi та хмарного додатку для моніторингу, розробленого за допомогою Grafana та mariaDB. BMU, який використовується для моніторингу акумулятора, має можливість вимірювати напругу, струм і температуру акумулятора, а також оцінювати його стан заряду (SoC). За допомогою цієї системи користувач не тільки дистанційно відстежує як фактичний, так і історичний стан батареї, але й отримує сповіщення, якщо стан заряду або температура виходять за межі діапазону попередньо налаштованих значень. На відміну від [28-30], ця система не може виконувати керуючу дію.

Система моніторингу продуктивності ФЕС була описана в [32]. Тут деякі фотоелектричні панелі віддалено контролювалися за допомогою датчиків напруги та струму з точки зору Інтернету речей, де всі вимірювання завантажувалися на хмарний сервер. Ця пропозиція представляє простий і економічний інструмент для фотоелектричних систем для підтримки безперервного моніторингу під час виробництва енергії. Як і в [31], ця система не виконує жодних керуючих дій, але відрізняється моніторингом, що виконується на стороні генерації. Відповідно, в роботі [33] представлено ієрархічне управління МКМ з використанням Інтернету речей, управління яким було розроблено з трьома рівнями і оцінено за допомогою моделювання в MATLAB. Первинний рівень був розроблений для локального управління чотирма розподіленими генераторами (РГ), які були підключені до основної мережі (МГ). Далі, другий рівень усуває стаціонарні похибки напруги та частоти, реалізуючи алгоритм розподілу між ДГ. Нарешті, третій рівень містить алгоритм машинного навчання для визначення найкращих умов для перемикання мережі в ізолюваний режим. Схема керування була реалізована за допомогою брокера MQTT, до якого підключено кожен з ДГ, а також пара фазометричних вимірювачів. В даній роботі розроблене керування було централізованим, а його алгоритм виконувався на хмарі.

Поряд із застосуванням БСМА для МКМ, в роботі [34] показано реалізацію архітектури захищеного зв'язку з низькою затримкою для операцій керування в ізолюваному МКМ. Тут керування було розроблено централізовано і для роботи в мережі Wi-Fi. У цьому випадку система керування керує лабораторним DC- мікронметром постійного струму, який складається з ФЕС, акумуляторної системи зберігання енергії (АСЗЕ) і двох навантажень з можливістю від'єднання. Бездротова мережа складається з КК та периферійних вузлів, які контролюють підключені елементи в DC-МКМ. З одного боку, периферійні вузли надсилають до КК відповідну інформацію від пристроїв, підключених до DC-МКМ. З іншого боку, КК відповідає командами периферійним вузлам для конфігурації режимів роботи локальних контролерів від ФЕС, АСЗЕ та навантажень. На відміну від [33], алгоритм управління в цій архітектурі виконується в локальному вузлі і не рахується з підключенням до Інтернету.

## 2 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

Різні DC-МКМ, яка була розроблена та реалізована в цій роботі, показана на Рисунку 2.1. МКМ включає ФЕС, АСЗЕ, двонаправлений АС/DC СЕП, з'єднаний з основною мережею (позначений MG на Рисунку 2.1), і навантаження постійного струму (позначений L на Рисунку 2.1). У випадку ФЕС система складається з фотоелектричного масиву (позначеного PV на рисунку 2.1), DC/DC Boost СЕП і локального контролера (позначеного LC на рисунку 2.1). Важливо зазначити, що ФЕС може бути відключена від шини постійного струму або, будучи підключеною до шини, працювати в режимі відстеження точки максимальної потужності (MPPT) або в режимі напруги. У першому режимі система працює, витягуючи максимальну потужність, доступну від ФЕС, для подачі в шину.

Другий режим підтримує регулювання напруги на шині постійного струму до заданого значення. АСЗЕ складається з акумуляторної батареї (позначеної B на Рисунку 2.1), двонаправленого DC/DC СЕП і LC. Ця система може працювати в двох напрямках: вона може витягувати накопичену енергію з акумуляторів для використання шиною постійного струму або витягувати енергію з шини постійного струму для заряджання акумуляторів. Двонаправлений АС/DC СЕП включає LC і має на меті з'єднати DC-МКМ з MG. Таким чином, АС/DC СЕП може працювати як випрямляч для забезпечення шини постійного струму енергією від MG або як інвертор для забезпечення MG енергією від шини постійного струму. Нарешті, для цього дослідження місцеві навантаження були визначені як суто резистивні та змінні.

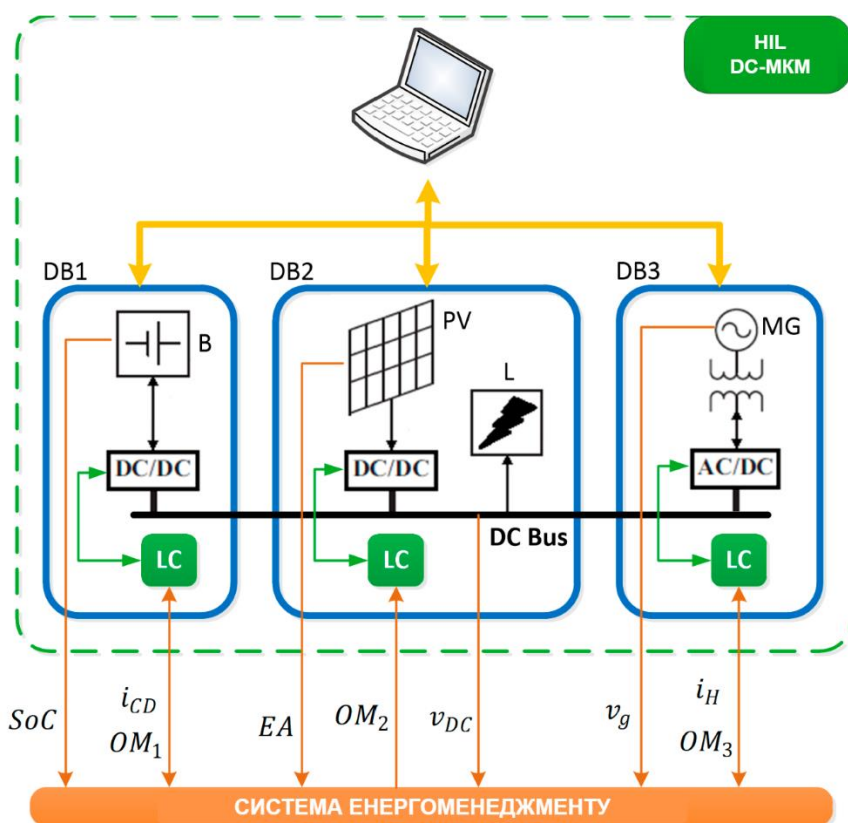


Рисунок 2.1 Впровадження DC-MKM для розробки СЕМ на основі IoT

Платформа HIL була використана для емуляції DC-MKM, що є широко використовуваною стратегією для валідації систем управління та СУЕ [35-38]. Отже, платформа HIL, що використовується в цій роботі, була побудована за допомогою трьох плат для розробки NI MyRIO 1900 і персонального комп'ютера. Платформа HIL позначена на Рисунку 2.1 пунктирним зеленим прямокутником, а плати для розробки відповідають синім прямокутникам з ідентифікаторами DB1, DB2 та DB3. ПК використовується для налаштування параметрів кожної системи, що міститься в DC-MKM. Ці параметри включають кількість фотоелектричних модулів, добовий профіль виробництва фотоелектричної енергії, кількість елементів батареї, початковий стан заряду (SoC) акумуляторної батареї та напругу МГ, серед іншого. Крім того, інтерфейс ПК дозволяє користувачеві вказувати перебої в подачі електроенергії як в МГ, так і в PV, щоб відстежувати еволюцію кожної системи DC-MKM і зберігати дані локально під час роботи DC-MKM.

### **Система енергоменеджменту**

Для досягнення безпечної, ефективної та економічної експлуатації DC-МКМ було запропоновано впровадження СЕМ з 4 основними цілями:

1. Максимально використовувати ВДЕ.
2. Гарантувати необхідне енергопостачання навантаженням постійного струму.
3. Підтримувати регульовану шину постійного струму.
4. Зменшити витрати на експлуатацію.

Водночас, для досягнення цих цілей для СЕМ було запропоновано п'ять стратегій енергоменеджменту. Ці стратегії узгоджуються з цілями наступним чином:

1. Вилучення максимальної потужності з ФЕС, коли це можливо: В рамках цієї стратегії використання ВДЕ максимізується, як це було визначено для першої цілі.

2. Якщо є надлишок енергії, то його бажано зберігати в акумуляторній батареї: ВДЕ в DC-МКМ є унікальним ресурсом, здатним забезпечити надлишок енергії; отже, зберігання цього надлишку сприяє досягненню першої мети. Крім того, наявність накопиченої енергії в акумуляторній батареї допомагає DC-МКМ успішно реагувати на перебої в енергопостачанні з основних джерел. Ця превентивна дія сприяє досягненню другої мети.

3. Якщо існує дефіцит енергії, то необхідну енергію для подачі в мережу бажано отримувати від МГ: оскільки розмір акумуляторної батареї може збільшити вартість системи, це твердження сприяє досягненню цілі 4.

4. Тільки одна з незалежних систем (тобто ФЕС, АСЗЕ або двонаправлений АС/DC СЕП) відповідає за регулювання напруги на шині постійного струму одночасно: таким чином, як місцеве, так і вторинне управління полегшує регулювання шини постійного струму, як того вимагає третя мета.

5. Навантаження є невідомим і змінним, і його неможливо контролювати: припускаючи невідоме змінне навантаження, всі рівні СЕМ

розраховані на досягнення адекватної роботи при зміні навантаження. Це твердження має вплив на другу мету.

На основі цих стратегій енергоменеджменту була розроблена СЕМ з використанням FMS Мура; ця стратегія подібна до інших звітів [39-41]. СЕМ має ієрархічну СУ з КК. Зокрема, КС була розроблена з урахуванням ЛК елементів, що містяться в DC-МКМ, та їхніх ОМ як первинного і вторинного шарів; тим часом, ФСМ займає третинний шар. Всього СА має дев'ять станів, які були визначені на основі всіх робочих комбінацій ОМ кожної системи, підключеної до DC-МКМ. В результаті, виходи, визначені кожним станом, є командами управління, які вказують на ОМ для кожної системи, виділеної в DC-МКМ. LC двонаправленого AC/DC ПЕК визначає, чи працює ПЕК як випрямляч або як інвертор, і СА враховує ці режими роботи для переходів між станами, де відповідний вихід для ПЕК буде визначатися як підключений або роз'єднаний. Таблиця 2.1 показує стани СА та виходи ОМ для АСЗЕ, ФЕС та двонаправленого AC/DC СЕП, які визначені як ,ОМ ОМ таОМ відповідно.

Таблиця 2.1 Вихідна таблиця СА

| Стан СА | Виходи СА       |                  |                        |
|---------|-----------------|------------------|------------------------|
|         | ОМ <sub>1</sub> | ОМ <sub>2</sub>  | ОМ <sub>3</sub>        |
| А       | Відключено      | Відключено       | Відключено             |
| В       | Відключено      | MPPT             | Відключено             |
| С       | Відключено      | Контроль напруги | Відключено             |
| D       | Зарядка         | MPPT             | Відключено             |
| Е       | Відключено      | MPPT             | Підключено (інвертор)  |
| F       | Розрядка        | MPPT             | Відключено             |
| G       | Відключено      | MPPT             | Підключено (випрямляч) |
| Н       | Розрядка        | Відключено       | Відключено             |
| I       | Відключено      | Відключено       | Підключено (випрямляч) |

І навпаки, входи для СА були визначені як SoC акумуляторної батареї, струм, що витягується/вводиться в шину постійного струму СЕП АСЗЕ ( $i$ ), струм, що витягується/вводиться в шину постійного струму двонаправленим АС/DC СЕП ( $i$ ), напруга на шині постійного струму ( $v$ ), пікова напруга МГ ( $v$ ), і булева змінна  $EA$ , що вказує на наявність енергії в ФЕП. Взаємодію між DC-МКМ та СЕМ через входи СА та ОМ можна побачити на Рисунку 2.1. Ця взаємодія була встановлена за допомогою входів і виходів як у цифровому, так і в аналоговому форматах. Для змінних  $i$ ,  $v$ ,  $SoC$  і  $EA$ , та  $v$  було визначено набір аналогових виходів у діапазоні від 0 до 5 В. З одного боку, змінні  $OM$  та  $OM$  були створені з використанням 2-бітового цифрового входу для кожної з них, щоб кодувати їх різні ОМ. З іншого боку, змінна  $OM$  була визначена з 1-бітним цифровим входом, оскільки її поведінка відповідає лише режиму підключення/відключення. Нарешті,  $EA$  було визначено як 1-бітний цифровий вихід. Ці входи і виходи були підключені до периферійних вузлів БСМА.

Оскільки СА має загалом 61 можливий перехід, ми вирішили не включати таблицю переходів станів та діаграму, щоб уникнути великого обсягу статті. Однак, нижче наведено загальне пояснення переходів станів СА (Таблиця 2.1):

- Спочатку ФЕС працює в режимі МРРТ (стан В). У цей час система оцінює, чи відповідає напруга постійного струму в шині попередньо встановленому заданому значенню з допуском  $\pm 5\%$ . Якщо напруга постійного струму знаходиться в цьому діапазоні, то енергія, яку споживає навантаження, дорівнює енергії, що постачається ФЕС. І навпаки, буде або дефіцит енергії, якщо значення нижче діапазону, або надлишок, якщо значення вище діапазону.
- Якщо система виявляє дефіцит енергії, то, по-перше, перевіряється наявність МГ. Якщо МГ доступний, підключається мережа для компенсації дефіциту енергії (стани G і H). І навпаки, недоступність МГ призводить до запуску алгоритму перевірки SoC акумуляторної батареї. Якщо SoC вище 30%, то АСЗЕ використовується для доставки необхідної енергії (стани F і H). У випадку, коли МГ недоступний, а SoC АКБ має достатній рівень, всі джерела енергії відключаються через їхню нездатність виконати енергію, необхідну для навантаження (стан А).

- Наявність надлишку енергії дозволяє системі забирати цей надлишок для зберігання в АСЗЕ, коли рівень заряду акумуляторної батареї нижче 80% (стан D). Якщо акумуляторна батарея заряджена, а MG доступний, то надлишок енергії впорскується в MG (стан E). Нарешті, коли акумуляторна батарея повністю заряджена, але MG недоступний, ФЕС переходить в режим регулювання напруги (стан C). У цьому режимі ФЕС підтримує і регулює напругу на шині, навіть якщо неможливо отримати максимальну потужність від фотоелектричних модулів.

Два основні пороги, які регулюють переходи для СА, - це SoC акумуляторної батареї та коливання шини напруги відносно попередньо встановленого значення. У випадку з порогом SoC було визначено діапазон від 30% до 80%; тим часом для шини постійної напруги було встановлено поріг  $\pm 5\%$ . Для гарантування якості електроенергії для мікромереж допустимим параметром для швидкої зміни напруги є поріг в діапазоні від 0,1% до 7% [42]. Отже, на основі [42], встановивши поріг  $\pm 5\%$ , можна запобігти переходу СА під час швидкої зміни напруги, зберігаючи при цьому якість електроенергії. Хоча SoC може приймати значення в діапазоні від 0% до 100%, в реальності батарея працює зі значеннями SoC від 20% до 80% [43]. Для цієї роботи нижня межа була визначена як 30%, щоб уникнути надмірного розряду; однак ця межа може приймати нижче значення, тобто 20%, як пропонується в [43].

Перед впровадженням СЕМ з використанням Інтернету речей була проведена оцінка системи управління за допомогою контролера NIL. В процесі оцінювання було розроблено СА на ПК платформи NIL, результати якого виявилися задовільними. Зв'язок між CC та LC DC-МКМ був встановлений за допомогою протоколу TCP/IP з частотою дискретизації 100 мс. Попереднє тестування СА на платформі NIL гарантує, що продуктивність IoT СЕМ залежить виключно від реалізації BCMA

## **3 КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА**

### **3.1 Опис системи управління енергоспоживанням IoT**

Структура IoT-СЕМ-БСМА, реалізована в цій роботі, складається з п'яти елементів, які позначені блоками від А до Е на Рисунку 3.1. Мережа БСМА, яка здійснює моніторинг та керування DC-МКМ, представлена блоком А. Блок В являє собою хмарний сервер, на якому зберігаються зібрані мережею БСМА дані; в даному дослідженні в якості хмарного сервера використовувався ThingSpeak [44].

Крім того, цей сервер призначений для зв'язку користувача з DC-МКМ через ВДК. ВДК (блок С) також дозволяє користувачеві здійснювати віддалений моніторинг і керування DC-МКМ через глобальну мережу БСМА.

Далі, блок D відноситься до розробленого СА, що діє як СЕМ для управління елементами DC-МКМ; виконання СЕМ здійснюється в головному вузлі БСМА. Нарешті, DC-МКМ представлений блоком Е.

За допомогою цієї IoTСЕМ-БСМА користувач може не тільки віддалено контролювати еволюцію DC-МКМ, але й визначати, чи працює МКМ в ручному або автоматичному режимі.

Вибравши ручний режим, користувач визначає ОМ для кожного елемента DC-МКМ. І навпаки, автоматичний режим дозволяє СЕМ диктувати ОМ для кожного елемента DC-МКМ.

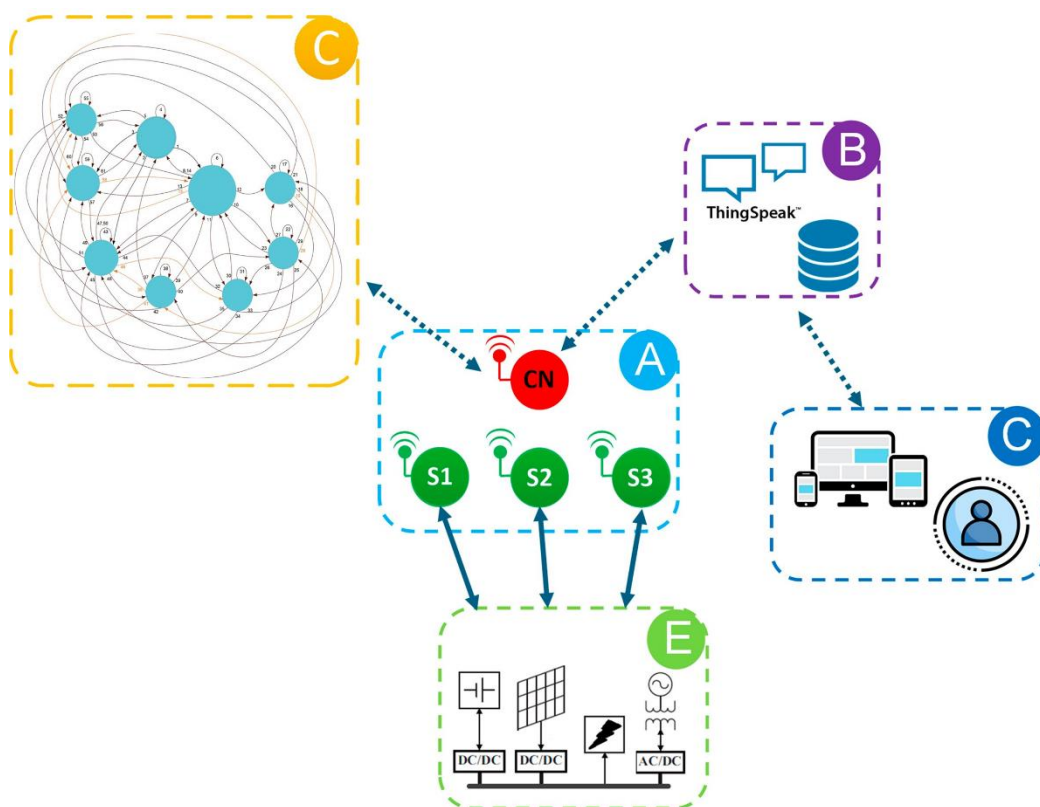


Рисунок 3.1 Структура IoT-СЕМ-БСМА: (А) бездротова мережа давачів/актуаторів, (В) хмарний сервер, (С) веб-додаток користувача, (Д) кінцевий автомат, (Е) емуляція DC-МКМ

### 3.2 Бездротова мережа давачів/приводів (Блок А)

Архітектура БСМА показана на Рисунку 3.2. Тут показано, що вузли зв'язуються через Wi-Fi, використовуючи протокол передачі гіпертексту (HTTP). Ця мережа була сконфігурована за моделлю "ведучий-ведений" з топологією "зірка". Відповідно до цього, БСМА має головний або центральний вузол (ЦВ на рисунках 3.1 і 3.2) і три підлеглі вузли (S1 - S3 на рисунках 3.1 і 3.2). Вузли S1-S3 призначені для виконання функцій локальних серверів (ЛС), отримання інформації від DC-МКМ через набір давачів та модифікації ОМ елементів, підключених до DC-МКМ через свої ЛС, і тому ці вузли також можна розглядати як актуатори. По суті, елементи S1, S2 і S3 об'єднують первинний і вторинний шари СЕМ, тоді як центральний вузол (ЦВ) займає третинний шар. На цьому рівні ЦН відповідає за виконання СЕМ та підключення до хмарного сервера (блок В на Рисунку 3.1) в якості клієнта.

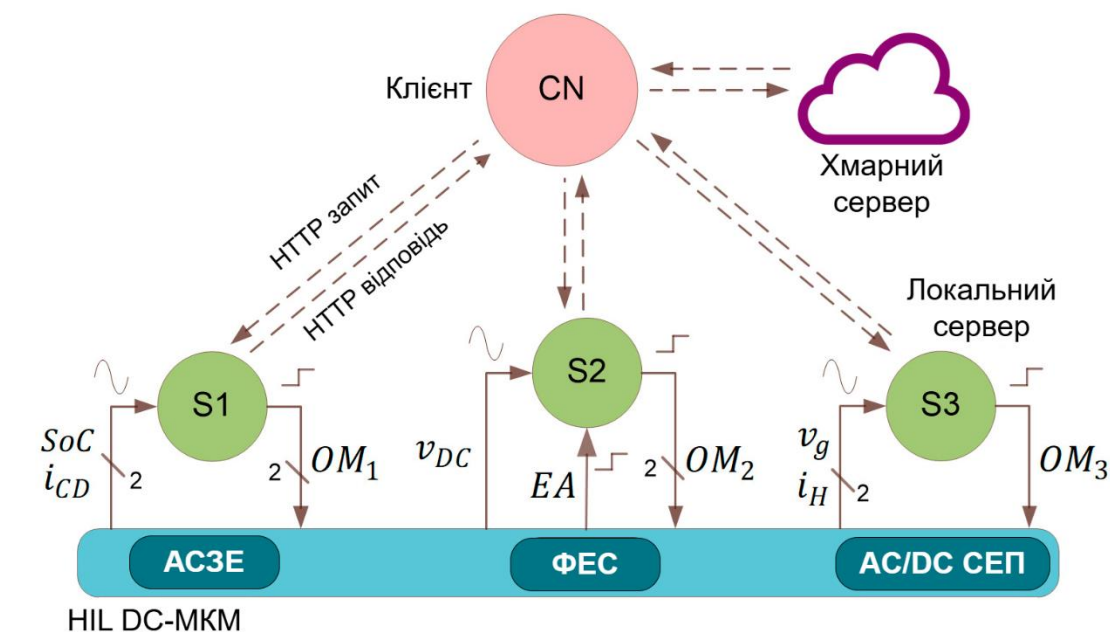


Рисунок 3.2 Архітектура БСМА

Для відновлення вимірних змінних з DC-МКМ та оновлення ОМ на кожному елементі DC-МКМ, ЦВ взаємодіє безпосередньо з кожною БС за допомогою HTTP-запитів. У випадку S1, він пов'язаний з АСЗЕ за допомогою двох аналогових сигналів і двох цифрових виходів. За допомогою аналогових сигналів S1 отримує інформацію, пов'язану з SoC акумуляторної батареї та струмом, що витягується/інжектується на шину АСЗЕ ( $i$ ). Цифрові виходи дозволяють S1 змінювати режим роботи АСЗЕ. ФЕС контролюється S2 через аналоговий вхід для вимірювання напруги на шині постійного струму. Також ФЕС використовує цифровий сигнал  $EA$  для повідомлення про наявність енергії від ФЕС. Подібно до S1, робочий режим ФЕС змінюється за допомогою двох цифрових виходів з S2. Останній LS, тобто S3, був підключений до двонаправленого АС/DC СЕП з набором з двох аналогових сигналів і одного цифрового сигналу. Один з аналогових сигналів використовується для повідомлення про напругу МГ ( $v$ ), тоді як інший відповідає вилученому/введеному струму в шину ( $i$ ). Нарешті, ОМ ДВК модифікується S3 за допомогою цифрового сигналу. Важливо зазначити, що не всі ЛС обчислюють керуючі впливи, оскільки їх функції обмежуються вимірюванням змінних від DC-МКМ і передачею цих вимірювань до ЦВ. Пізніше ПС отримує

від ЦН адекватне ОВ, яке підлягає кодифікації, і після цього ОВ передається до КЦ. Повний процес передачі даних, включаючи порядок послідовностей та інформаційний потік, описано в наступному розділі.

### 3.3 Центральний вузол

ЦВ є ключовим елементом IoT-СЕМ-БСМА, оскільки він служить сполучною ланкою між користувачем і DC-МКМ. Здебільшого це відбувається завдяки його ролі посередника між мережею БСМА і хмарним сервером. Наразі загальна робота ЦВ ілюструється блок-схемою, зображеною на Рисунку 3.3, яка описана далі.

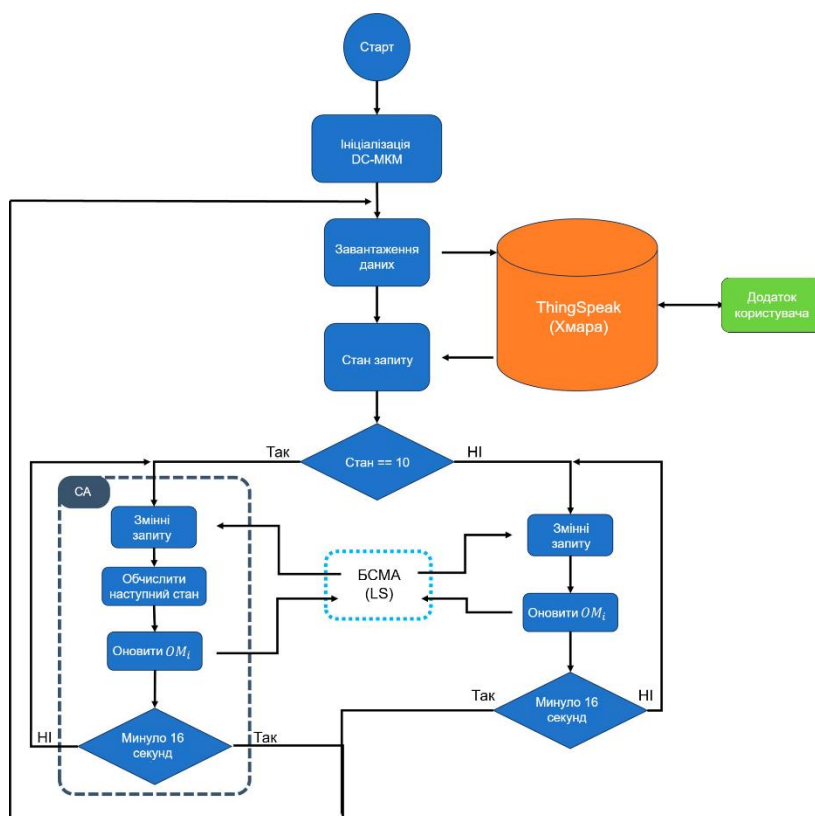


Рисунок 3.3. Блок-схема функціонування ЦВ

Спочатку ЦВ ініціалізує стан за замовчуванням у СА, де всі системи в DСМКМ від'єднані від шини постійного струму. Потім встановлюється з'єднання з локальною мережею WiFi, яка розподіляє всі LS. При успішному з'єднанні ЦВ виконує набір HTTP GET-запитів (HGR), вміст яких включає OM,

як параметр URL-адреси, для кожного елемента DC-MKM. В результаті цих запитів LS приводить DC-MKM до стану за замовчуванням. Негайно ЦВ виконує ще один HGR, але вже до ThingSpeak, щоб отримати режим, в якому СЕМ має працювати DC-MKM, тобто, чи буде МКМ працювати автоматично або вручну, як визначено користувачем. Цей параметр зберігається в ThingSpeak у каналі, який називається каналом ручного керування (MCC); цей параметр визначає два різні випадки. Таким чином, у першому випадку ThingSpeak відповість на HGR станом "10" СА - хоча СА має лише 9 станів - і працюватиме за автоматичною схемою, де СА визначає ОМ для систем у DC-MKM. Після вибору автоматичного режиму ЦВ надсилає HGR окремо до кожного LS із запитом на вимірювання відповідних змінних ( $v$ ,  $v_{EA}$ ,  $SoC$ ,  $i$  та  $i$ ). На основі зібраних вимірювань ЦВ обчислює наступний стан у СА, щоб визначити відповідний ОМ для кожної ЛС, надсилаючи новий HGR окремо. Отже, DC-MKM переходить різними режимами роботи після того, як кожна ЛС змінює або підтримує значення на своїх цифрових виходах. У кожному циклі ЦВ перевіряє час, що минув з моменту останнього з'єднання з ThingSpeak. Якщо час, що минув, становить щонайменше 16 секунд, то ЦВ завантажує інформацію на сервер, посилаючись на пару HGR. В іншому випадку ЦВ продовжує вимірювати змінні з DCMKM, обчислювати наступний стан у СА та оновлювати ОМ елементів МКМ. Коли ЦВ завантажує дані в ThingSpeak, в перший HGR надсилається встановлений СА стан, який зберігається в каналі, названому каналом стану (SC). Другий HGR завантажує вимірювання, зроблені БСМА з DC-MKM; ці вимірювання зберігаються в шестиполосному каналі, який називається каналом змінних (VC). У другому випадку, який відповідає ручному управлінню DC-MKM, ThingSpeak відповість на HGR одним з дев'яти доступних станів у СА. Ці стани відповідають рядкам від А до І в таблиці 2.1. Тут DC-MKM працює на основі обраного користувачем стану. Цей стан буде підтримуватися невизначено довго, якщо користувач не зробить новий вибір; отже, СА не втручається у визначення ОМ. Подібно до автоматичного режиму, ЦВ виконує ГГР на кожній ЛС окремо, щоб отримати вимірювання DC-MKM для підтримання та оновлення ЗВ.

### 3.4 Бездротові вузли давачів та приводів (локальні сервери)

ЦВ та набір LS було створено за допомогою розробницької плати NodeMCU ESP8266, яка має можливість підключення до мережі Wi-Fi. Зокрема, цифрові входи/виходи цієї плати працюють в діапазоні від 0 до 3,3 В, а також плата має лише один АЦП з діапазоном перетворення від 0 до 1 В. З цих причин використання плати вимагало деяких адаптацій для сполучення з платформою HIL, включаючи приєднання двонаправленого перетворювача логічного рівня (BLLC) для сполучення з модулем ADS1115 (4-канальний АЦП з 16-бітною роздільною здатністю). На Рисунку 3.4 показано приклад з'єднання цих елементів для підлеглого вузла S1. ADS1115 можна використовувати для вимірювання чотирьох односторонніх сигналів напруги або двох диференціальних сигналів; модуль працює з протоколом зв'язку I2C. Хоча передбачається, що LS також мають бути BCM, LS, що використовуються в цій роботі, не включають датчиків, оскільки платформа HIL, що використовується для емуляції DC-MKM, також емулює датчиків.

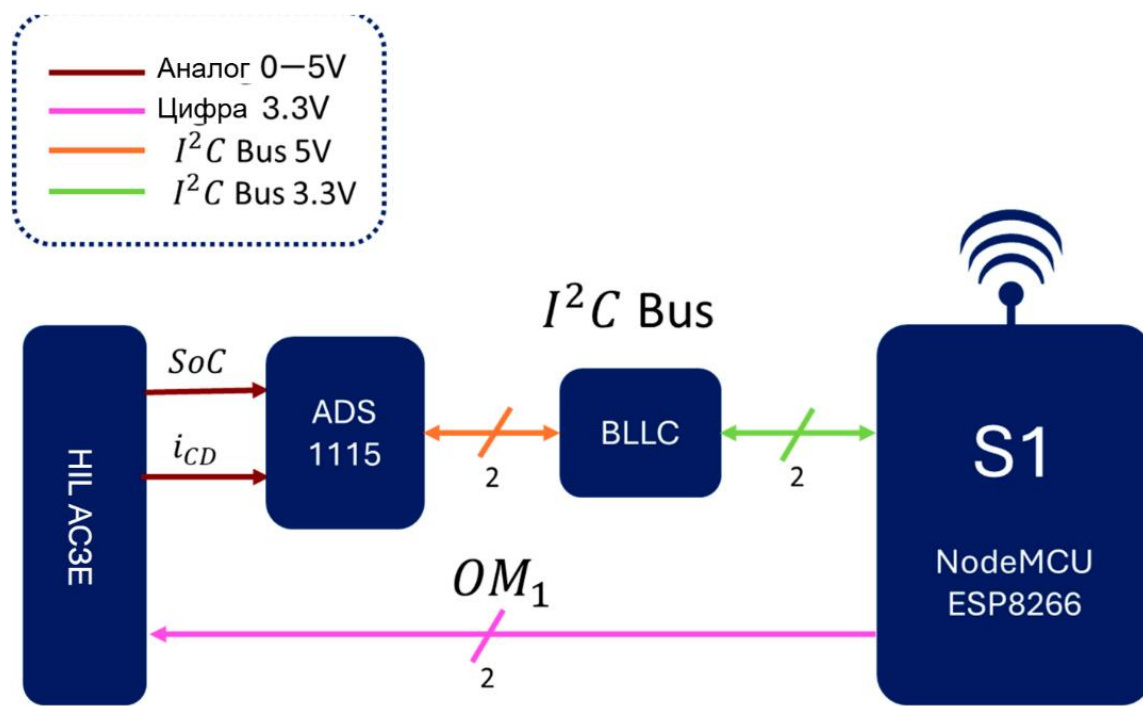


Рисунок 3.4 Приклад з'єднання підлеглого вузла з платформою HIL

Як згадувалося раніше, ЦВ і LS спілкуються один з одним через мережу Wi-Fi і за допомогою HTTP. Щоб надіслати ПГР до БМ, ЦН використовує його IP-адресу. У кожному циклі, що виконується ЦН як у ручному, так і в автоматичному режимах, БС отримують по два ГТР: перший - для запиту вимірних змінних від DC-МКМ, а другий - для оновлення ОМ. Загалом, протягом одного циклу, який виконує ЦН, ГТР споживають близько 1200 мс: кожна ЛС споживає близько 400 мс.

### 3.5 Хмарний сервер (Блок В)

ThingSpeak було обрано в якості хмарного сервера для цієї роботи через низку переваг, включаючи можливість зберігання даних та доступ до API, який було використано для двостороннього зв'язку з ВДК та ЦВ. Раніше було описано реалізовану структуру для зберігання зібраних даних з DC-МКМ, а також для досягнення взаємодії між ThingSpeak, ВДК та ЦВ. Ця структура показана на Рисунку 3.5.

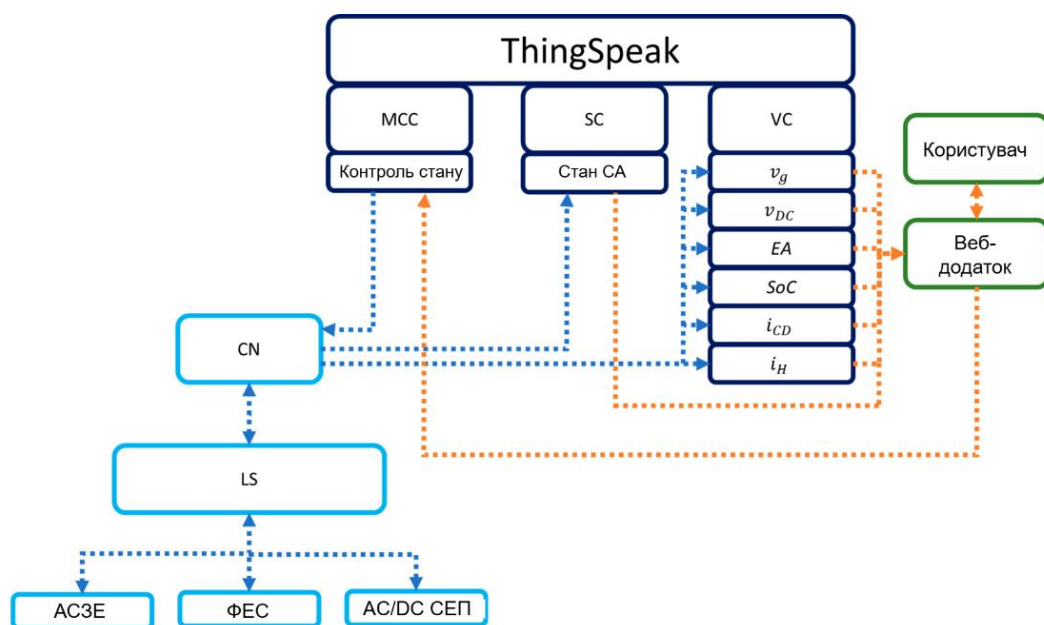


Рисунок 3.5. Структура бази даних та процес взаємодії з хмарним сервером ЦВ

### 3.6 Веб-додаток користувача (Блок С)

Інтерфейс ВДК для цієї роботи був розроблений таким чином, щоб надати користувачеві елементи керування та індикатори. Серед елементів управління було включено текстове поле для введення ключа API для запису для МСС. Цей ключ додає безпеки до СУІБ на основі IoT, запобігаючи неналежному використанню несанкціонованими користувачами. Крім того, елементи керування включають спеціальні випадаючі меню для ОМ кожного елемента, що міститься в DC-МКМ. Це налаштування дозволяє користувачеві легко вибирати між ручним або автоматичним керуванням. Індикатори представляють завантажені змінні ( $v$ ,  $v_{EA}$ ,  $SoC$ ,  $i_{ii}$ ) на сервер у графічному форматі, що дозволяє користувачеві спостерігати за еволюцією DC-МКМ для кращого управління сіткою.

Блок-схему функціонування ВДК, включаючи її взаємодію з хмарним сервером і користувачем, можна побачити на Рисунку 3.6. На першому кроці ВДК відображає графіки часових рядів збережених змінних у ThingSpeak за допомогою Iframe.

Далі перевіряється ключ API для запису, щоб увімкнути/вимкнути користувацькі елементи керування. Коли користувач увійшов у систему з дійсним ключем і вибрав ОУ для кожної системи за допомогою меню, ВДК сприйме ці вибрані ОУ як комбінацію, щоб порівняти її з дійсним станом з СА (Таблиця 2.1).

Якщо комбінація збігається з допустимим станом СА, то кодований номер від 1 до 9 надсилається до МСС в ThingSpeak; в іншому випадку ВДК не надсилає жодного номера до ThingSpeak. У випадку автоматичного вибору режиму, ВДК надсилає до МСС стан під номером 10.

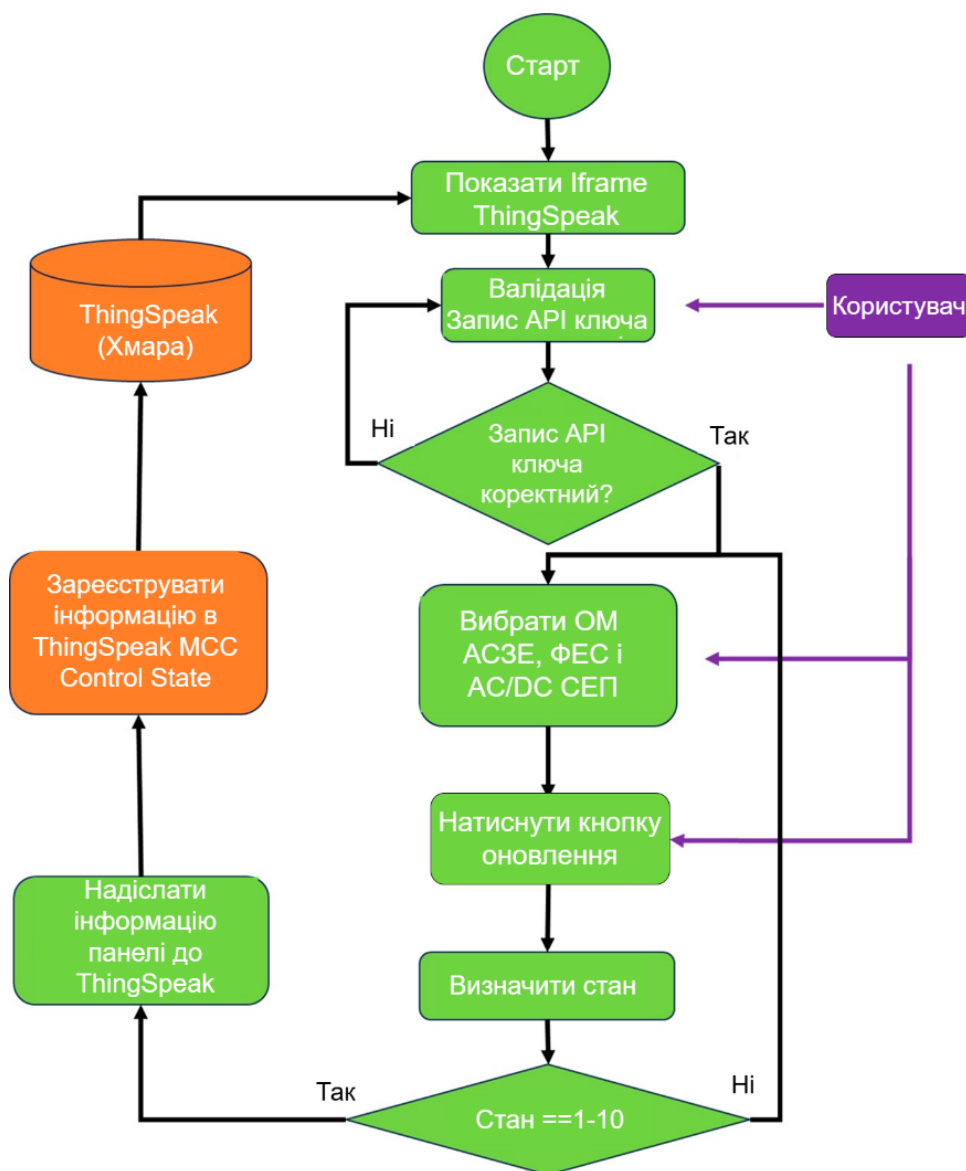


Рисунок 3.6 Блок-схема веб-додатку користувача

У процесі розгортання система може бути адаптована під конкретні умови міської інфраструктури, враховуючи конфігурацію перехресть, характеристики дорожньої мережі та закономірності розподілу трафіку. Застосування моделювання мікроскопічного рівня дозволяє спрогнозувати вплив нових налаштувань на пропускну здатність мережі та своєчасно виявити потенційні вузькі місця. Таким чином, реалізація описаної інтелектуальної системи дорожньої сигналізації забезпечує адаптивне, масштабоване та ефективне керування міським транспортним потоком.

## 4 НАУКОВО ДОСЛІДНИЦЬКА ЧАСТИНА

### 4.1 Результати та оцінки розробки

Щоб оцінити продуктивність IoT-СЕМ-БСМА, спочатку було перевірено ручний режим, протестувавши режими роботи DC-МКМ індивідуально. Потім був проведений експеримент для імітації поведінки ФЕС в ясний день, а також перебоїв в подачі енергії як від ФЕС, так і від МГ. Умовами для цього експерименту були ЦВ, що працює в автоматичному режимі, рандомізовані значення навантаження (тобто навантаження вимагало 0,8, 1 або 1,2 кВт), ФЕ з максимальною потужністю, встановленою на 1,2 кВт, уставка шини постійного струму 360 В, а також акумуляторна батарея з початковим рівнем заряду 50%. Важливо зазначити, що затримку емуляції НІЛ було прискорено для емуляції 24-годинного циклу лише за 6 годин. ПК платформи НІЛ використовувався для зберігання вимірювань з DC-МКМ з затримкою 500 мс; враховуючи, що дані завантажуються в ThingSpeak кожні

16 секунд, використання ПК дозволяє мати локальний запис з високою затримкою. Реакцію енергоресурсів, підключених до DC-МКМ, для забезпечення необхідної потужності постійним навантаженням (чорна лінія) можна побачити на рисунку 4.1 Також на цьому рисунку показано передачу енергії між елементами, підключеними до DC-МКМ, тобто від акумуляторної батареї до шини постійного струму (зелена зона), від МГ до шини постійного струму (синя зона), від ФЕП до шини постійного струму (жовта зона), від шини постійного струму до МГ (фіолетова зона), і від шини постійного струму до акумуляторної батареї (червона зона). Зокрема, передача енергії від шини постійного струму до акумуляторної батареї відображається з від'ємними значеннями, оскільки цей процес вимагає передачі енергії від шини. Важливо зазначити, що в умовах, створених для цього експерименту, в системі не було жодного випадку, коли енергія передавалася б від шини постійного струму до МГ.

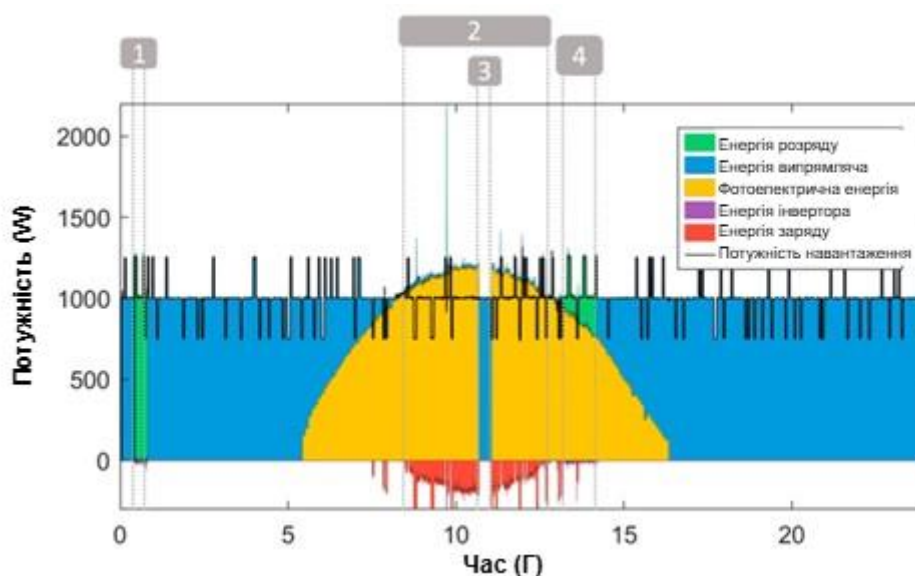


Рисунок 4.1 Потужність та енергетичний відгук у DC-МКМ з впровадженою БСМА СЕМ на основі IoT в ясний день

Як показано на Рисунку 4.1, ініціалізація DC-МКМ не тільки почала покривати енергію, необхідну для навантаження постійного струму за допомогою МГ (АС/DC СЕП, що працює як випрямляч), але також не включала фотоелектричну систему для задоволення цього попиту. Після цієї ініціалізації DСMKM пройшла через чотири особливі умови експлуатації, які пронумеровані від 1 до 4 на Рисунку 4.1 Під час першої умови (подія 1) було згенеровано відключення від МГ на зразку 100, і СЕМ відреагувала, налаштувавши АСЗЕ на живлення навантаження постійного струму енергією, накопиченою в акумуляторній батареї; ця подія позначена зміною синього кольору на зелений на Рисунку 4.1 Наступний стан (подія 2) спостерігався від зразка 1800 до зразка 2800. Ця подія характеризується надлишком енергії, що постачається ФЕС для задоволення попиту навантаження постійного струму. Тому СЕМ реагує, заряджаючи цим надлишком акумуляторну батарею (АСЗЕ в комплекті з зарядним ОМ). Фактично, цей надлишок енергії, що постачається ФЕС (жовта область над лінією потужності навантаження на Рисунку 4.1), відповідає енергії, використаній для заряджання акумуляторної батареї за той самий період (червона область під лінією 0 Вт на Рисунку 4.1). Під час другої події було індуковано відключення від ФЕС (подія 3), яке почалося в момент 2225. Щоб виправити цей стан, СЕМ не тільки призупиняє процес заряджання

аккумуляторної батареї, але й забирає необхідну енергію від МГ, щоб задовольнити попит на енергію з боку навантаження постійного струму. Нарешті, відключення від МГ відбулося у зразку 2800 (подія 4); тут АСЗЕ супроводжувала ФЕС з аккумуляторною батареєю, щоб задовольнити попит на енергію від навантаження постійного струму.

Щоб розширити аналіз продуктивності IoT-CEM-WAN, виробництво енергії фотоелектричною системою було протестовано в частково хмарний день; зокрема, такі погодні умови змушують фотоелектричну систему швидше реагувати на зміни під час виробництва енергії. Результати цього експерименту представлені на Рисунку 4.2. Подібно до випадку, представленого на Рисунку 4.1, цей експеримент також включає відключення МГ (події 1 і 2), відключення ФЕС (подія 3) і надлишок енергії, отриманий від виробництва ФЕС (подія 4), що дозволяє нам зарядити аккумуляторну батарею.

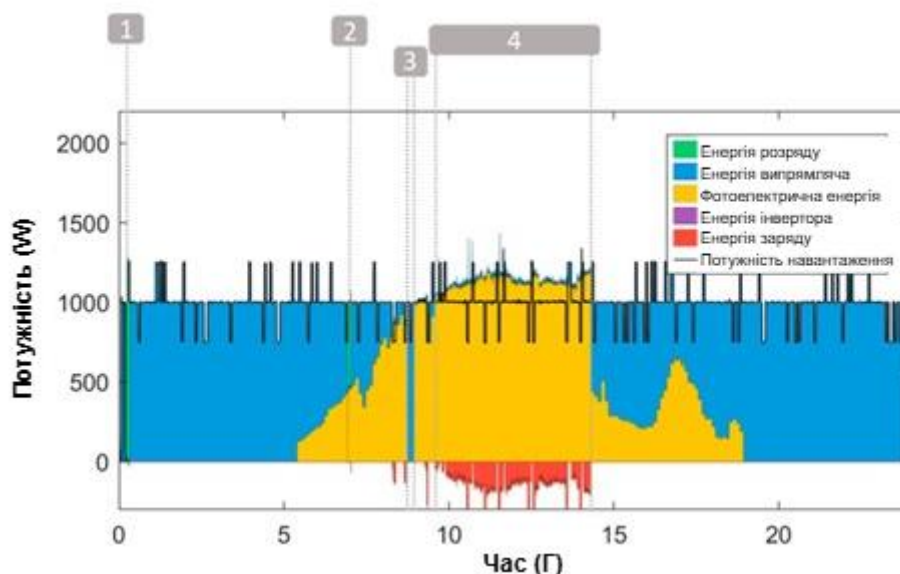


Рисунок 4.2. Потужність та енергетичний відгук в DC-МКМ з реалізованою БСМА СЕМ на основі IoT в похмурий день

Порівняно з результатами, отриманими під час оцінювання реалізованого СА на комп'ютері платформи HIL, реалізований СА з використанням БСМА показав більше коливань напруги на шині постійного струму ( $v$ ) для того самого експерименту. Ці коливання, а також відповіді, отримані обома стратегіями, можна побачити на Рисунку 4.3. Тут протягом 230 с червоною лінією показано

напругу на шині постійного струму ( $v$ ), що підтримується реалізованим СА на комп'ютері платформи НІЛ; тим часом синьою лінією показано значення  $v$ , досягнуті реалізованим СА з використанням БСМА. Пара пунктирних ліній на рисунку 4.3 позначає діапазон  $\pm 2\%$  для уставки напруги 360 В. У той же час, спостерігалось збільшення часу відновлення для шини постійної напруги в умовах відключення енергії від різних енергоресурсів; ця особлива реакція спостерігалася під час подій 1, 3 і 4 на Рисунку 4.1. На рисунку 4.4 можна детально спостерігати реакцію шини постійної напруги під час події 1, яка показана на рисунку 4.1. З одного боку, на рисунку 4.4а показано відгук, який випромінює реалізований СА з платформою РС НІЛ.

З іншого боку, відповідь реалізованого СА з БСМА показано на рисунку 4.4б.

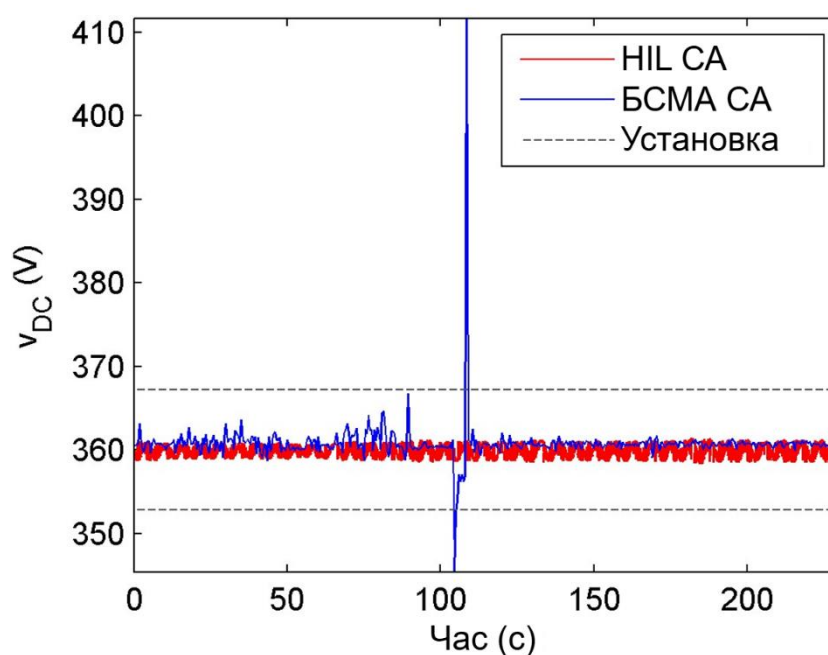


Рисунок 4.3. Реакція шини постійної напруги на реалізовані скінченні автомати НІЛ та БСМА

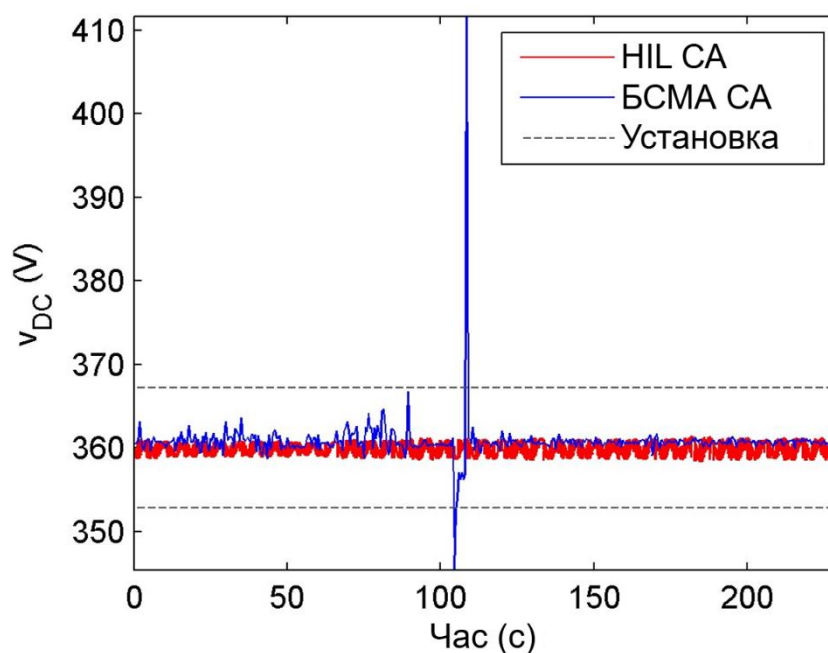


Рисунок 4.4. Реакція напруги на шині постійного струму при відключенні джерела: (а) з СА, реалізованим в ПК на платформі HIL та (б) з СА, реалізованим в БСМА

Розроблений інтерфейс для ВДК, який використовувався в цій роботі, показано в Додатку Б. Цей інтерфейс містить випадаючі меню для вибору автоматичного або ручного режиму, а також ОМ для різних систем, що містяться в DC-МКМ. Крім того, в Додатку Б показано деякі графіки, що містяться в інтерфейсі ВДК. Ці графіки відображають залежність часу від значень і станів таких змінних, як напруга на шині постійного струму ( $v$ ), логічний стан  $EA$ , стан керування, збережений в МСС, і струм, що вводиться/виводиться на шину постійного струму двонаправленим AC/DC СЕП ( $i$ ). Графіки решти змінних, які не показані в Додатку Б, були опущені через оригінальний розмір екрану; однак вони доступні для їх вивчення в ВДК.

Для ілюстрації користувацького досвіду процесу моніторингу в Додатку В показано візуальну реакцію інтерфейсу ВДК на відключення ФЕС під час події 3, зазначеної на Рисунку 4.1. Важливо зазначити, що ЦВ завантажує в хмару значення вимірюваних змінних без будь-якої нормалізації або масштабування. Таким чином, операції, що виконуються ЦН та всіма ЛС, зведені до мінімуму. Наприклад, значення 0 А представляється з 2,5 сирим

значенням як для струму АСЗЕ ( $i$ ), так і для змінного/постійного струму СЕП ( $i$ ). Аналогічно, змінна  $E_A$  може приймати значення 0 (PV-енергія недоступна) або 5 (PV-енергія доступна); тим часом, сире значення 3,51 у напрузі шини постійного струму представляє 360 В. Зокрема, подія 3 згенерувала різні візуальні ефекти в інтерфейсі ВДК, як показано в Додатку В. Ці візуальні ефекти включають відключення ФЕС, представлене зміною  $E_A$  з 5 до 0 (див. верхній лівий графік в Додатку В); збільшення  $i$  вище 2,5, що вказує на те, що МГ живить навантаження постійного струму (верхній правий графік в Додатку В); зміну з четвертого на дев'ятий стан у СА (лівий нижній графік в додатку В); і зміну значень  $i_v$ . Графік, що представляє зміни  $i$  (середній правий графік в Додатку В), показує процес заряджання акумуляторної батареї зі значеннями нижче 2,5, оскільки АСЗЕ витягує енергію з шини постійного струму за рахунок надлишку енергії, що постачається ФЕС. Коли ФЕС від'єднується від DC-МКМ,  $i$  досягає значення 2,5, що вказує на відключення АСЗЕ. Аналогічно, графік використовується для представлення еволюції  $i_v$  (нижній правий графік в Додатку В), значення якого майже постійно підтримується на рівні 3,51 (360 В), за винятком випадків, коли стан ФЕС змінюється або змінюється навантаження на постійному струмі.

## 4.2 Аналіз системи

Виходячи з відповідей, які представляє СЕМ для забезпечення енергопостачання підключеного навантаження (на рисунках 9 і 10), можна зробити висновок, що результати продемонстрували, що IoT-СЕМ- БСМА забезпечує адекватний енергетичний баланс під час управління DC-МКМ.

Важливо, що ЦВ було налаштовано на час виконання 1200 мс, що в 10 разів швидше, ніж реалізований СА на ПК платформи HIL. Отже, цей збільшений час виконання є причиною варіацій у реалізованому СА для БСМА, як показано на Рисунку 4.3. Тим не менш, реалізований набір стратегій управління енергоспоживанням задовольняв енергетичний обмін між елементами DC-МКМ. Крім того, ці варіації не були здатні дестабілізувати

шину постійного струму, оскільки вони в основному присутні в діапазоні  $\pm 2\%$  навколо заданого значення. У будь-якому випадку, реалізований СА для БСМА не тільки виконує очікувані характеристики, але й підтримує стабільну шину постійного струму, незважаючи на існуючі варіації. Щоб керувати відключеннями під час подій 1, 2 та 4, показаних на Рисунку 4.1, СА повинен був змінити свій стан. Оскільки відключення джерела енергії є наслідком стану СА, який регулює шину постійної напруги на основі джерела енергії, відключення не тільки призводить до падіння напруги на шині постійної напруги, воно також перериває подачу енергії на навантаження постійного струму. Тут затримка СА стає дуже важливою, оскільки час відновлення під час падіння напруги буде повністю залежати від неї. Для прикладу можна порівняти вплив цього часу відновлення між реалізованим СА з БСМА та реалізованим СА з платформою PC Hil. Тут СА з БСМА потребує 1 с для відновлення, що на 850 мс повільніше, ніж реалізований СА з платформою PC Hil, який потребує лише 150 мс. На основі [42], цей приріст часу відновлення відображає нижчу якість енергії через перехід від миттєвого переривання енергії (0,3-500 мс) до миттєвого переривання енергії (500 мс-3 с).

СА, реалізований у БСМА, вимагає відносно великого часу виконання, оскільки ЦВ виконує два HGR до кожного LS, дотримуючись цієї послідовності:

1. ЦВ ініціалізує з'єднання з LS.
2. ЦВ надсилає запит до LS на вимірювання своїх змінних.
3. LS відповідає ЦВ з результатами вимірювань.
4. ЦВ обчислює наступний стан для СА, який включає відповідне оновлення для OM.
5. КН просить ОУ оновити OM.
6. LS оновлює OM.
7. ЦВ і LS замикають з'єднання.

В Додатку В можна продемонструвати, що ВДК є ефективним інструментом для моніторингу DC-МКМ та його компонентів. Безсумнівно, процес моніторингу можна вдосконалити, щоб зробити його більш зручним для

користувачів. Зокрема, графіки могли б включати дані в нормалізованому форматі з адекватним масштабуванням. Крім того, включення графіку, подібного до того, що показаний на Рисунку 4.1, могло б запропонувати користувачеві інструмент безперервного моніторингу з більш широкою перспективою щодо внеску кожного компонента в DC-МКМ. Ці функції розглядаються для майбутнього вдосконалення інтерфейсу ВДК. Важливо зазначити, що оскільки інтерфейс ВДК працює в хмарі, запропоновані вдосконалення не вплинуть на фактичну продуктивність інших елементів, таких як БСМА, ЦВ або LS

## 5 СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА

### 5.1 Аналіз результатів

Системи управління енергоспоживанням (СЕМ) є ключовим компонентом для забезпечення ефективного та стабільного функціонування мікромереж (МКМ). У сучасних умовах інтеграція відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) та розвиток Інтернету речей (IoT) значно розширюють можливості таких систем. У цій роботі розглядається IoT-СЕМ-БСМА — система управління енергоспоживанням на основі бездротової мережі давачів і виконавчих механізмів (БСМА), яка дозволяє забезпечити централізоване управління мікромережею постійного струму (DC-МКМ) з використанням хмарного сервера ThingSpeak та веб-додатку.

Впровадження бездротових технологій у МКМ дає змогу скоротити витрати на інфраструктуру зв'язку, зберігаючи при цьому надійність і масштабованість. Проте важливо оцінити продуктивність та стабільність роботи таких систем, особливо у випадках коливань навантаження та перебоїв у енергопостачанні. Ця частина роботи присвячена детальному опису архітектури IoT-СЕМ-БСМА, аналізу її продуктивності та обґрунтуванню переваг і обмежень.

IoT-СЕМ-БСМА складається з п'яти ключових компонентів:

1. Безпроводна мережа давачів і виконавчих механізмів (БСМА) — включає центральний вузол (ЦВ) і три підлеглі вузли (LS), які забезпечують моніторинг та управління елементами DC-МКМ.
2. Хмарний сервер ThingSpeak — використовується для зберігання даних і двостороннього обміну інформацією між мікромережею та веб-додатком.
3. Веб-додаток користувача (ВДК) — інтерфейс для віддаленого моніторингу та керування.
4. Скінченний автомат (СА) — алгоритм управління, який працює на центральному вузлі БСМА.

5. Мікромережа DC-MKM — включає фотоелектричну систему (ФЕС), акумуляторну систему зберігання енергії (АСЗЕ) і двонаправлений AC/DC перетворювач.

Варто також розглянути алгоритм роботи СА. СА є ієрархічною системою управління, що реалізує три рівні: локальний, вторинний і третинний. СА визначає операційний режим (ОМ) кожного елемента мікромережі на основі вхідних даних, таких як стан заряду батареї (SoC), струм і напруга на шині постійного струму. Наприклад, у разі дефіциту енергії СА спочатку перевіряє доступність мережі MG, а у разі її недоступності — переходить до використання енергії АСЗЕ. З іншого боку, надлишок енергії використовується для заряджання акумуляторів або передається в мережу.

## **5.2 Продуктивність та тестування системи**

Взаємодія між центральним вузлом, локальними вузлами та хмарним сервером здійснюється за протоколом HTTP. ЦВ виконує два основні завдання: збір даних з LS і хмарного сервера та передача керуючих сигналів. Завдяки цьому забезпечується як автоматичний, так і ручний режими роботи мікромережі, залежно від налаштувань користувача.

Одним із ключових параметрів продуктивності є час реакції системи. У випадку реалізації СА на базі БСМА час оновлення становить 1200 мс, що є значно повільнішим порівняно з реалізацією СА на дротовій архітектурі (150 мс). Попри це, система забезпечує стабільну роботу шини постійного струму в межах допустимих коливань ( $\pm 2\%$  від уставки).

Використання ThingSpeak як хмарного сервера дозволяє ефективно зберігати дані та здійснювати моніторинг у реальному часі. Проте значна затримка у 16 с між циклами завантаження даних обмежує можливості реагування на критичні події, такі як відключення енергоресурсів. Ручний режим роботи дозволяє користувачеві миттєво втручатися у функціонування системи, що підвищує її гнучкість.

## Розглянемо варіанти тестування та валідації

### 1. Моделювання на платформі HIL:

- Використання апаратного моделювання для тестування реакції СА в реальному часі.

- Емуляція змінних навантажень і перебоїв у подачі енергії для оцінки стабільності шини постійного струму.

### 2. Лабораторні експерименти:

- Реалізація БСМА у контрольованому середовищі для перевірки коректності роботи вузлів та взаємодії з центральним вузлом.

- Тестування затримки передачі даних між компонентами.

### 3. Інтеграційне тестування:

- Перевірка інтеграції БСМА з хмарним сервером ThingSpeak.

- Оцінка роботи веб-додатку (ВДК) у режимах реального часу.

## Параметри для валідації

1. Точність вимірювань: Порівняння даних, отриманих від БСМА, із реальними показниками апаратури.

2. Час реакції системи: Оцінка часу відгуку СА на зміну стану мікромережі; Аналіз впливу затримок на стабільність шини постійного струму.

3. Стабільність напруги на шині: Перевірка підтримання напруги в межах  $\pm 2\%$  від заданого рівня під час критичних подій.

4. Відмовостійкість: Імітація збоїв у мережевому з'єднанні для перевірки автономної роботи СА.

5. Зручність інтерфейсу: Оцінка ефективності ВДК для віддаленого моніторингу та керування.

### 5.3 Обґрунтування переваг і обмежень

До переваг належать:

1. Економічна ефективність: Використання БСМА значно знижує початкові витрати на інфраструктуру зв'язку, особливо порівняно з дротовими рішеннями.
2. Масштабованість: Легка інтеграція нових вузлів без необхідності значних змін в архітектурі.
3. Гнучкість керування: Поєднання автоматичного та ручного режимів дозволяє адаптувати систему до різних умов експлуатації.

До обмежень належать:

1. Час відновлення: Для стабілізації напруги на шині постійного струму після перебоїв СА потребує до 1 с, що перевищує стандартні вимоги до якості енергопостачання.
2. Відсутність системи оповіщення: Поточна реалізація не передбачає автоматичного інформування користувача про критичні події.
3. Залежність від хмарного сервера: Переривання зв'язку з ThingSpeak може обмежити функціональність моніторингу.

IoT-СЕМ-БСМА є ефективним рішенням для управління мікромережею DC-МКМ, яке поєднує низьку вартість, гнучкість і можливості віддаленого моніторингу. Система демонструє стабільну роботу навіть за умов перебоїв енергопостачання. Проте деякі обмеження, такі як час відновлення та залежність від хмарного сервера, потребують подальшого вдосконалення. У майбутньому доцільно впровадити систему оповіщення та оптимізувати алгоритми СА для підвищення швидкодії.

## 6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

### 6.1 Питання щодо охорони праці

Тема кваліфікаційної роботи освітнього рівня «Магістр» присвячена розробці та дослідження автоматизованої системи моніторингу та керування енергоспоживанням приміщень з використанням технологій IoT.

Доцільно розглянути загальні вимоги безпеки до виробничого обладнання та технологічних процесів.

Основними складовими безпеки праці на виробництві є:

- безпечне виробниче обладнання;
- безпечні технологічні процеси;
- організація безпечного виконання робіт.

ГОСТ 12.2.003–91.— основний нормативний документ з загальних вимог безпеки до виробничого обладнання за виключенням обладнання, яке є джерелом іонізуючих випромінювань.

Вимоги безпеки до виробничого обладнання конкретних груп, видів, моделей розробляються відповідно до вимог ГОСТ 12.2.003–91 з урахуванням призна-чення, виконання та умов його експлуатації.

- Безпека виробничого обладнання забезпечується:
- вибором принципів дії, джерел енергії, параметрів робочих процесів;
- мінімізацією енергії, що споживається чи накопичується;
- застосуванням вмонтованих в конструкцію засобів захисту та інформації про можливі небезпечні ситуації;
- застосуванням засобів автоматизації, дистанційного керування та контролю;
- дотримання ергономічних, обмеження фізичних і нервово психологічних навантажень працівників.

Виробниче обладнання, при роботі як самостійно, так і в складі технологічних комплексів, повинно відповідати вимогам безпеки на протязі всього періоду його експлуатації.

Виробниче обладнання, робота якого супроводжується виділенням шкідливих речовин чи мікроорганізмів або пожежо- та вибухонебезпечних речовин, повинно включати вмонтовані пристрої для локалізації цих виділень. При відсутності таких пристроїв, в конструкції обладнання мають бути передбачені місця для підключення автономних пристроїв локалізації виділень. За необхідності згадані пристрої мають бути виконані з урахуванням чинних вимог щодо стану повітря робочої зони та захисту довкілля.

Якщо виробниче обладнання являється джерелом шуму, ультра та інфразвуку, вібрації, виробничих випромінювань (електромагнітних, лазерних тощо), то воно повинно бути виконано таким чином, щоб дія на працюючих перерахованих шкідливих виробничих факторів не перевищувала меж, встановлених відповідними чинними нормативами.

Однією із складових безпеки виробничого обладнання є конструкція робочого місця, його розміри, взаємне розміщення органів управління, засобів відображення інформації, допоміжного обладнання тощо. При розробці конструкції робочого місця слід дотримуватись вимог ГОСТ 12.2.032–78, ГОСТ12.2.033–84, ГОСТ12.2.049–80, ГОСТ12.2.061–81 та інших чинних нормативів. При цьому розміри робочого місця і його елементів мають забезпечувати виконання операцій в зручних робочих позах і не ускладнювати рухи працюючих. Конструкція крісла і підставки для ніг мають відповідати ергономічним вимогам.

Повне чи часткове припинення енергопостачання з наступним його відновленням, а також пошкодження мережі управління енергопостачанням не повинно призводити до виникнення небезпечних ситуацій.

Засоби захисту, що входять в конструкцію виробничого обладнання, повинні: забезпечувати можливість контролю їх функціонування; виконувати своє призначення безперервно в процесі роботи обладнання; діяти до повної нормалізації відповідного небезпечного чи шкідливого фактора, що спричинив

спрацювання захисту; зберігати функціонування при виході із ладу інших засобів захисту. За необхідності включення засобів захисту до початку роботи виробничого обладнання, схемою управління повинні передбачатись відповідні блокування тощо.

ГОСТ 12.3.002–75.— чинний нормативний документ з загальних вимог безпеки до виробничих процесів.

Безпека виробничих процесів визначається, у першу чергу безпекою обладнання, яка забезпечується шляхом урахування вимог безпеки при складанні технічного завдання на його проектування, при розробці ескізного й робочого проекту, випуску та випробуваннях випробного зразка й передачі його у серійне виробництво згідно ГОСТ 15.001—73 «Розробка і постановка продукції на виробництво. Основні положення».

Основними вимогами безпеки до технологічних процесів є: усунення безпосереднього контакту працюючих з вихідними матеріалами, заготовками, напівфабрикатами, готовою продукцією та відходами виробництва, що є вірогідними чинниками небезпек; заміна технологічних процесів та операцій, що пов'язані з виникненням небезпечних та шкідливих виробничих факторів, процесами і операціями, за яких зазначені фактори відсутні або характеризуються меншою інтенсивністю; комплексна механізація та автоматизація виробництва, застосування дистанційного керування технологічними процесами і операціями при наявності небезпечних та шкідливих виробничих факторів; герметизація обладнання; застосування засобів колективного захисту працюючих; раціональна організація праці та відпочинку з метою профілактики монотонності й гіподинамії, а також обмеження важкості праці; своєчасне отримання інформації про виникнення небезпечних та шкідливих виробничих факторів на окремих технологічних операціях (системи отримання інформації про виникнення небезпечних та шкідливих виробничих факторів необхідно виконувати за принципом пристроїв автоматичної дії з виводом на системи попереджувальної сигналізації); впровадження систем конт-ролю та керування технологічним процесом, що забезпечують захист працюючих та аварійне відключення виробничого

обладнання; своєчасне видалення і знешкодження відходів виробництва, що є джерелами небезпечних та шкідливих виробничих факторів, забезпечення пожежної й вибухової безпеки.

Розташування виробничого обладнання, вихідних матеріалів, заготівок, напівфабрикатів, готової продукції та відходів виробництва у виробничих приміщеннях і на робочих місцях не повинно являти собою небезпеку для персоналу. Відстані між одиницями обладнання, а також між обладнанням та стінами виробничих приміщень, будівель і споруд повинна відповідати вимогам діючих норм технологічного проектування, будівельним нормам та правилам.

До факторів, що визначають умови праці, відносяться також раціональні методи технології і організації виробництва. Зокрема, велику роль відіграє зміст праці, форми побудови трудових процесів, ступінь спеціалізації працюючих при виконанні виробничих процесів, вибір режимів праці та відпочинку, дисципліна праці, психологічний клімат у колективі, організація санітарного й побутового забезпечення працюючих відповідно до

До осіб, які допущені до участі у виробничому процесі, ставляться вимоги щодо відповідності їх фізичних, психофізичних і, в окремих випадках, антропометричних даних характеру роботи. Перевірка стану здоров'я працюючих має проводитися як при допуску їх до роботи, так і періодично згідно з чинними нормативами. Періодичність контролю за станом їх здоров'я повинна визначатися залежно від небезпечних та шкідливих факторів виробничого процесу в порядку, встановленому Міністерством охорони здоров'я.

У автоматизованому виробництві необхідне також суворе виконання вимог безпеки під час ремонту й налагодження автоматичних машин та їх систем. Одним з перспективних напрямків комплексної автоматизації виробничих процесів є використання промислових роботів.

## 6.2 Питання щодо безпеки в надзвичайних ситуаціях

Тема кваліфікаційної роботи освітнього присвячена Розроблення та дослідження автоматизованої системи моніторингу та керування енергоспоживанням приміщень з використанням технологій IoT, тому доцільно розглянути питання з вимог електробезпеки до приміщень з ЕОМ.

- Характерною особливістю науково-технічного прогресу на сучасному етапі є створення автоматизованих систем управління на основі впровадження електронно-обчислювальної техніки, наслідками чого є:

- збільшення кількості об'єктів і їх параметрів, якими необхідно управляти;

- розвиток системи дистанційного управління об'єктами, про динаміку яких судять на основі сприйнятих сигналів від засобів відображення інформації;

- ускладнення і збільшення швидкості перебігу виробничих процесів;
  - зміни в умовах праці;
  - зміни в структурі і характері трудової діяльності, поява професії оператора, основними функціями якого є управління, налагодження і контроль роботи різноманітних автоматизованих систем;

- створення різних типів систем «людина-машина», функціонування яких залежить від взаємодії технічних пристроїв і діяльності людини в єдиному контурі регулювання.

Під системою «людина—машина» розуміють систему, яка включає людину-оператора (групу операторів) і сукупність технічних засобів, за допомогою яких здійснюється трудова діяльність.

В одних випадках можливості людини набагато більші, ніж у машини, в інших, навпаки, машина має переваги над людиною. Так, людина здатна працювати в несподіваних ситуаціях, їй властива висока гнучкість і адаптивність до мінливих зовнішніх впливів, може працювати по багатьох програмах. Для машини неможливо запрограмувати всі випадковості; їй властиві мала гнучкість і висока ціна багатоваріантної роботи. Людина здатна

створити повне уявлення про події, явища за неповної інформації. У машини така можливість обмежена. Людина має великі можливості для вибору способів дії, може швидко використовувати резерви, виправляти помилки. У машини ці можливості обмежені. В той же час у людини обмежена «пропускна здатність» щодо сприймання і переробки інформації. У машини — навпаки. У людини зменшується працездатність внаслідок розвитку втоми, розсіюється увага, з'являється різні емоційні стани і переживання. Машина має практично постійну роботоздатність. Людина порівняно повільно і неточно виконує обчислювальні операції, в той час як для машини характерні висока швидкість і точність обчислень. В зв'язку з цим необхідна автоматизація тих функцій, які можуть бути виконані без участі людини. За людиною залишаються функції щодо прийняття рішень, що і зумовлює більшу ефективність праці людини порівняно з роботою автоматичних пристроїв. Мислячий оператор посідає центральне місце у великих системах управління.

До взаємодії людини і технічних засобів ставляться підвищені вимоги, що вимагає пристосування техніки до людини (конструювання машин з врахуванням людських можливостей) і людини до машини (добір і підготовка спеціалістів). Зазначені особливості операторської праці дозволяють виділити її в специфічний вид професійної діяльності, основні етапи якої такі.

— Сприймання інформації щодо об'єктів керування та навко-лишнього середовища, яка важлива для розв'язання завдань, поставлених перед системою «людина-машина». Для цього оператор повинен помітити сигнали, виділити з їх сукупності найбільш важливі та розшифрувати. Внаслідок цих дій у оператора формується попереднє уявлення про стан керованого об'єкта. Якість сприймання інформації залежить від типу і кількості індикаторів, організації інформаційного поля, характеристик інформації.

— Оцінка і переробка інформації. На цьому етапі порівнюються задані і реальні режими роботи системи, здійснюється аналіз та узагальнення інформації, виділяються критичні об'єкти і ситуації. На основі вже відомих критеріїв важливості і терміновості встановлюється черговість обробки інформації. На оцінку і переробку інформації впливають спосіб кодування,

обсяг і динаміка змін в системі, а також відповідність обсягів інформації можливостям пам'яті і мислення оператора.

— Прийняття рішення про необхідні дії на основі проведеного аналізу та оцінки інформації, а також на основі інших відомостей про мету і умови роботи системи, можливі способи дії, наслідки правильних і неправильних рішень. Ефективність прийнятого рішення залежить від типу задачі, складності логічних умов, алгоритму та кількості можливих варіантів рішення.

— Реалізація прийнятого рішення шляхом виконання певних дій або видачі відповідних розпоряджень. На цьому етапі окремими діями є перекодування прийнятого рішення в машинний код, пошук потрібного органу керування і маніпуляції з ним тощо. Виконання рухів залежить від кількості органів керування, їх типу і способів розміщення.

На кожному етапі необхідний контроль власних дій, який може бути інструментальним або візуальним, що забезпечує надійність роботи оператора. Перші два етапи називають отриманням інформації, інші два — її реалізацією. Отримання інформації відбувається через сприймання оператором інформаційної моделі об'єкта керування, тобто різних носіїв інформації. Після декодування сприйнятих сигналів формується логічне знання про керований процес, яке називають концептуальною моделлю. Концептуальна модель дає можливість операторові поєднувати в єдине ціле окремі частини керованого процесу і на основі прийнятого рішення здійснити ефективні керівні дії, тобто реалізувати отриману інформацію.

## ВИСНОВКИ

В майбутньому зв'язок між КН та БС можна покращити двома способами. Його можна модифікувати так, щоб усунути кроки з'єднання/роз'єднання, зберігаючи зв'язок живим. Також зв'язок можна звести до одного HGR, обчислюючи наступний стан на основі вимірювань як поточної, так і попередніх взаємодій. Однак, управління буде здійснюватися з урахуванням затримки, тому ця альтернатива вимагає іншого підходу до теорії управління. Незважаючи, що ВДК можна використовувати для виявлення критичних подій, таких як відключення енергії в DC-МКМ, IoT-СЕМ-БСМА не включає систему оповіщення для інформування користувача про такі події. Тому включення системи оповіщення, наприклад, через електронну пошту, є важливою функцією, яку слід розглянути як частину майбутнього вдосконалення. В цілому, представлений IoT-СЕМ-БСМА виявився ефективним інструментом для дистанційного моніторингу та управління DC-МКМ, навіть коли система має деякі можливості для її вдосконалення. У порівнянні з [28-30], бездротові вузли, що складають IoT-СЕМ-БСМА в цій роботі, здійснюють керуючі дії не тільки на стороні попиту, але і на всіх елементах, що містяться в DC-МКМ. Крім простого моніторингу елементів DC-МКМ, як в [31,32], розроблена IoT-СЕМ-БСМА має перевагу у виконанні керуючих дій на ці елементи. Крім того, користувач має можливість вирішувати, які саме керуючі дії будуть виконуватися цією системою, що відсутня в аналогічних дослідженнях [29]. Важливою перевагою цієї IoT-СЕМ-БСМА є те, що вищий рівень СЕМ виконується локально як альтернатива зовнішньому виконанню на хмарі [33]. Отже, система може підтримувати ефективну роботу навіть у разі збою зв'язку з хмарним сервером. На відміну від [34], розроблена СЕМ для цієї роботи інтегрує перспективу IoT, щоб запропонувати моніторинг та дистанційне керування DC-МКМ. Підсумовуючи, розроблена IoT-СЕМ-БСМА, яка була представлена в цій роботі, виділяється як зручна система для моніторингу та керування DC-МКМ. З одного боку, система пропонує зручний інтерфейс моніторингу для спостереження за поведінкою всіх компонентів, пов'язаних

між собою в DC-МКМ. З іншого боку, система не тільки пропонує дистанційне керування роботою DC-МКМ, але й дозволяє користувачеві конфігурувати DC-МКМ для його автономної роботи або вибрати режим роботи для кожного джерела, підключеного до DC-МКМ. Зокрема, ця функція ручного керування розширює третинний рівень СЕМ. Завдяки впровадженню СЕМ з БСМА, інфраструктура для рівня зв'язку в DC-МКМ зменшується завдяки функціональності та життєздатності впровадженої СЕМ. Отже, її впровадження вимагає менших початкових інвестицій, що відображає комерційну перевагу. Однак, взаємопов'язані елементи в DC-МКМ з СЕМ на базі БСМА повинні мати як бездротовий зв'язок, так і локальні контролери з можливістю роботи за схемою БСМА. Наприкінці IoT-СЕМ-БСМА було перевірено за допомогою DC-МКМ, який був емітований на платформі НІЛ, що є дослідницькою інфраструктурою для розробки нових результатів у таких галузях досліджень, як ВДЕ, МКМ, СЕМ та інших суміжних темах. Безумовно, постійне використання платформ НІЛ пов'язане з низкою переваг, які включають емуляцію різноманітних профілів фотоелектричної генерації, незалежність від погодних умов під час експериментального етапу, легке налаштування розмірів МКМ, емуляцію відключення енергії від ФЕС або МГ, а також скорочення загального часу, необхідного для виконання експериментального етапу. Більшість з цих переваг були чітко продемонстровані тут, а перевагою, яка виділяється, є скорочення часу експерименту, як зазначено раніше в представлених результатах. Нарешті, адаптація БСМА в цій платформі НІЛ не тільки покращує її можливості, але й розширює можливості досліджень в цій галузі. Наприклад, дослідження, представлені в цій роботі, були зосереджені на перевірці функціональності та корисності СЕМ на основі БСМА в рамках парадигми IoT: повна система була розроблена як IoTСЕМ-БСМА. Ефективність цієї IoT-СЕМ-БСМА була оцінена шляхом порівняння з локальною СЕМ, яка була реалізована на рівні дротового зв'язку з високою затримкою. В результаті, це порівняння не тільки продемонструвало функціональність IoT-СЕМ-БСМА; воно також дало поштовх для оцінки інших підходів до СЕМ з використанням тієї ж платформи НІЛ.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ

- 1 Muhtadi, A.; Pandit, D.; Nguyen, N.; Mitra, J. Distributed energy resources based microgrid: Review of architecture, control, and reliability. *IEEE Trans. Ind. Appl.* 2021, 57, 2223–2235.
- 2 Ahmad, S.; Shafiullah, M.; Ahmed, C.B.; Alowaifeer, M. A review of microgrid energy management and control strategies. *IEEE Access* 2023, 11, 21729–21757.
- 3 Thirunavukkarasu, G.S.; Seyedmahmoudian, M.; Jamei, E.; Horan, B.; Mekhilef, S.; Stojcevski, A. Role of optimization techniques in microgrid energy management system—A review. *Energy Strategy Rev.* 2022, 43, 100899.
- 4 Zahraoui, Y.; Alhamrouni, I.; Mekhilef, S.; Basir Khan, M.R.; Seyedmahmoudian, M.; Stojcevski, A.; Horan, B. Energy management system in microgrids: A comprehensive review. *Sustainability* 2021, 13, 10492.
- 5 Souza Junior, M.E.T.; Freitas, L.C.G. Power electronics for modern sustainable power system: Distributed generation, microgrids and smart grids—A review. *Sustainability* 2022, 14, 3597.
- 6 Chandak, S.; Rout, P.K. The implementation framework of a microgrid: A review. *Int. J. Energy Res.* 2021, 45, 3523–3547.
- 7 Shahgholian, G. A brief review on microgrids: Operation, applications, modeling, and control. *Int. Trans. Electr. Energy Syst.* 2021, 31, e12885.
- 8 Patnaik, B.; Mishra, M.; Bansal, R.C.; Jena, R.K. AC microgrid protection—A review: Current and future prospective. *Appl. Energy* 2020, 271, 115210.
- 9 Ullah, Z.; Wang, S.; Lai, J.; Azam, M.; Badshah, F.; Wu, G.; Elkadeem, M.R. Implementation of various control methods for the efficient energy management in hybrid microgrid system. *Ain Shams Eng. J.* 2023, 14, 101961.
- 10 Chandra, A.; Singh, G.K.; Pant, V. Protection techniques for DC microgrid—A review. *Electr. Power Syst. Res.* 2020, 187, 106439.

- 11 Arunkumar, A.P.; Kuppusamy, S.; Muthusamy, S.; Pandiyan, S.; Panchal, H.; Nagaiyan, P. An extensive review on energy management system for microgrids. *Energy Sources, Part A: Recovery. Util. Environ. Eff.* 2022, 44, 4203–4228.
- 12 Vuddanti, S.; Salkuti, S.R. Review of energy management system approaches in microgrids. *Energies* 2021, 14, 5459.
- 13 Chaudhary, G.; Lamb, J.J.; Burheim, O.S.; Austbø, B. Review of energy storage and energy management system control strategies in microgrids. *Energies* 2021, 14, 5459.
- 14 Al-Ismail, F.S. DC microgrid planning, operation, and control: A comprehensive review. *IEEE Access* 2021, 9, 36154–36172.
- 15 Ali, S.; Zheng, Z.; Aillerie, M.; Sawicki, J.P.; Pera, M.C.; Hissel, D. A review of DC Microgrid energy management system dedicated to residential applications. *Energies* 2021, 14, 4308.
- 16 Sámano-Ortega, V.; Arzate-Rivas, O.; Martínez-Nolasco, J.; Aguilera-Álvarez, J.; Martínez-Nolasco, C.; Santoyo-Mora, M. Multipurpose Modular Wireless Sensor for Remote Monitoring and IoT Applications. *Sensors* 2024, 24, 1277.
- 17 Kandris, D.; Nakas, C.; Vomvas, D.; Koulouras, G. Applications of Wireless Sensor Networks: An Up-to-Date Survey. *Appl. Syst. Innov.* 2020, 3, 14.
- 18 BenSaleh, M.S.; Saida, R.; Kacem, Y.H.; Abid, M. Wireless sensor network design methodologies: A survey. *J. Sens.* 2020, 2020, 9592836.
- 19 Huanan, Z.; Suping, X.; Jiannan, W. Security and application of wireless sensor network. *Procedia Comput. Sci.* 2021, 183, 486–492.
- 20 Temene, N.; Sergiou, C.; Georgiou, C.; Vassiliou, V. A survey on mobility in wireless sensor networks. *Ad Hoc Netw.* 2022, 125, 102726.
- 21 Wang, Z.; Liu, Z.; Liu, L.; Fang, C.; Li, M.; Zhao, J. Joint Optimization of Control Strategy and Energy Consumption for Energy Harvesting BCMA. *Entropy* 2022, 24, 723.
- 22 Seferagić, A.; Famaey, J.; De Poorter, E.; Hoebeke, J. Survey on Wireless Technology Trade-Offs for the Industrial Internet of Things. *Sensors* 2020, 20, 488.

23 Jurado Perez, L.; Salvachúa, J. Simulation of scalability in cloud-based iot reactive systCEM leveraged on a BCMA simulator and cloud computing technologies. *Appl. Sci.* 2021, 11, 1804.

24 Ahmad, R.; Wazirali, R.; Abu-Ain, T. Machine Learning for Wireless Sensor Networks Security: An Overview of Challenges and Issues. *Sensors* 2022, 22, 4730.

25 Nourildean, S.W.; Hassib, M.D.; Mohammed, Y.A. Internet of things based wireless sensor network: A review. *Indones. J. Electr. Eng. Comput. Sci.* 2022, 27, 246–261.

26 Landaluce, H.; Arjona, L.; Perallos, A.; Falcone, F.; Angulo, I.; Muralter, F. A review of IoT sensing applications and challenges using RFID and wireless sensor networks. *Sensors* 2020, 20, 2495.

27 Diwakar, M.; Sharma, K.; Dhaundiyal, R.; Bawane, S.; Joshi, K.; Singh, P. A review on autonomous remote security and mobile surveillance using internet of things. *J. Phys. Conf. Ser.* 2021, 1854, 012034.

28 Saleem, M.U.; Usman, M.R.; Usman, M.A.; Politis, C. Design, deployment and performance evaluation of an IoT based smart energy management system for demand side management in smart grid. *IEEE Access* 2022, 10, 15261–15278

29 Pawar, P.; TarunKumar, M. An IoT based Intelligent Smart Energy Management System with accurate forecasting and load strategy for renewable generation. *Measurement* 2020, 152, 107187.

30 Munoz, O.; Ruelas, A.; Rosales, P.; Acuña, A.; Suastegui, A.; Lara, F. Design and Development of an IoT Smart Meter with Load Control for Home Energy Management SystCEM. *Sensors* 2022, 22, 7536.

31 Gonzalez, I.; Calderón, A.J.; Folgado, F.J. IoT real time system for monitoring lithium-ion battery long-term operation in microgrids. *J. Energy Storage* 2022, 51, 104596.

32 Rani, D.P.; Suresh, D.; Kapula, P.R.; Akram, C.M.; Hemalatha, N.; Soni, P.K. IoT based smart solar energy monitoring systCEM. *Mater. Today Proc.* 2023, 80, 3540–3545.

- 33 Ali, W.; Ulaszay, A.; Mehmood, M.U.; Khattak, A.; Imran, K.; Zad, H.S.; Nisar, S. Hierarchical control of microgrid using IoT and machine learning based islanding detection. *IEEE Access* 2021, 9, 103019–103031.
- 34 Kondoro, A.; Dhaou, I.B.; Tenhunen, H.; Mvungi, N. A low latency secure communication architecture for microgrid control. *Energies* 2021, 14, 6262.
- 35 Hosseini, E.; Horrillo-Quintero, P.; Carrasco-Gonzalez, D.; García-Triviño, P.; Sarrias-Mena, R.; García-Vázquez, C.A.; Fernández-Ramírez, L.M. Optimal energy management system for grid-connected hybrid power plant and battery integrated into multilevel configuration. *Energy* 2024, 294, 130765.
- 36 Bhattar, C.L.; Chaudhari, M.A. Centralized Energy Management Scheme for Grid Connected DC Microgrid. *IEEE Syst. J.* 2023, 17, 3741–3751.
- 37 Krishan, O.; Suhag, S. Power management control strategy for hybrid energy storage system in a grid-independent hybrid renewable energy system: A hardware-in-loop real-time verification. *IET Renew. Power Gener.* 2020, 14, 454–465.
- 38 Rajput, A.K.; Lather, J.S. Energy management of a DC microgrid with hybrid energy storage system using PI and ANN based hybrid controller. *Int. J. Ambient. Energy* 2023, 44, 703–718.
- 39 MHilmi; Lystianingrum, V.; Romlie, M.F. Energy Management System Based on Finite State Machine for Battery-Supercapacitor Hybrid Energy Storage System on Standalone Photovoltaic, In *Proceedings of the 2024 IEEE 4th International Conference in Power Engineering Applications (ICPEA)*, Pulau Pinang, Malaysia, 4–5 March 2024; pp. 91–96.
- 40 Pamulapati, T.; Allahham, A.; Walker, S.L.; Giaouris, D. Evolution Operator-based automata control approach for CEM in active buildings, In *Proceedings of the 11th International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD)*, Hybrid Conf, Newcastle, UK, 21–23 June 2022; pp. 775–779.
- 41 Kanouni, B.; Badoud, A.E.; Mekhilef, S.; Bajaj, M.; Zaitsev, I. Advanced efficient energy management strategy based on state machine control for multi-sources PV-PEMFC-batteries system. *Sci. Rep.* 2024, 14, 7996.

42 Sepasi, S.; Talichet, C.; Pramanik, A.S. Power quality in microgrids: A critical review of fundamentals, standards, and case studies. *IEEE Access* 2023, 11, 108493–108531.

43 Wang, Z.; Feng, G.; Zhen, D.; Gu, F.; Ball, A. A review on online state of charge and state of health estimation for lithium-ion batteries in electric vehicles. *Energy Rep.* 2021, 7, 5141–5161.

44 ThingSpeak. Natick, Massachusetts: The MathWorks Inc. Available online: <https://thingspeak.com/> (Доступно 10.12.2024).

45 Stanko, A., Wieczorek, W., Mykytyshyn, A., Holotenko, O., & Lechachenko, T. (2024). Real-time air quality management: Integrating IoT and Fog computing for effective urban monitoring. *CITI'2024: 2nd International Workshop on Computer Information Technologies in Industry 4.0*, June 12–14, 2024, Ternopil, Ukraine.

46 Stanko, A., Palka, O., Matiichuk, L., Martsenko, N., & Matsiuk, O. (2021, September). Smart City: A Review of Model Architecture and Technology. In *2021 IEEE 16th International Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT)* (Vol. 2, pp. 273-277). IEEE.

47 Микитишин А.Г., Митник М.М., Стухляк П.Д. Телекомунікаційні системи та мережі: навчальний посібник для студентів спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» – Тернопіль: Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2017 – 384 с

48 Стручок В.С. Безпека в надзвичайних ситуаціях. Методичний посібник для здобувачів освітнього ступеня «магістр» всіх спеціальностей денної та заочної (дистанційної) форм навчання / В.С.Стручок. — Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2022. — 156 с.

# ДОДАТКИ

## Тези конференцій

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя (Україна)  
Університет імені П'єра і Марії Кюрі (Франція)  
Маріборський університет (Словенія)  
Технічний університет у Кошице (Словаччина)  
Вільнюський технічний університет ім. Гедимінаса (Литва)  
Наукове товариство ім. Т.Шевченка

# АКТУАЛЬНІ ЗАДАЧІ СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

## Збірник тез доповідей

**XIII Міжнародної науково-практичної  
конференції молодих учених та студентів**  
11-12 грудня 2024 року



УКРАЇНА  
ТЕРНОПІЛЬ – 2024

УДК 004.8:004.6:656.05

Микитишин А.Г., к.т.н., доц., Чуревич Б.В., Дильовий О.О.

(Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна)

## **ПРОМИСЛОВІ СИСТЕМИ ЕНЕРГОМОНІТОРИНГУ НА ОСНОВІ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ**

Mykytyshyn A.G., Ph.D., Assoc. Prof., Churevych B.V., Dylovyyi O.O.

## **INDUSTRIAL ENERGY MONITORING SYSTEMS BASED ON THE INTERNET OF THINGS**

Граничні технології Інтернету речей у поєднанні зі звичайними промисловими процесами допомагають розвивати різноманітні додатки в епоху Промислового Інтернету речей (IIoT) та Індустрії 4.0, наближаючи технології хмарних обчислень до апаратного забезпечення. Інновації, що з'являються в результаті, пропонують інтелектуальне управління промисловими екосистемами, зосереджуючись на підвищенні продуктивності та зниженні експлуатаційних витрат завдяки локальній обробці великих обсягів даних. У цій роботі робимо огляд систем на основі Інтернету речей та периферії для моніторингу енергоспоживання стаціонарних та мобільних активів на заводі за допомогою бездротових та дротових лічильників енергії. Як тільки периферія отримує дані лічильника, вона зберігає інформацію на сервері бази даних, після чого застосовується метод обробки даних для знаходження дев'яти додаткових аналітичних параметрів. Периферія також надає головний користувацький інтерфейс (UI) для порівняльного аналізу та індивідуальний UI для поглибленого аналізу енергоспоживання, з подальшим оповіщенням про активність і неактивність, а також функціями щоденного звітування електронною поштою. Крім того, периферійний сервер використовує техніку фільтрації даних для надсилання даних одного бездротового лічильника в хмару для віддаленого моніторингу енергоспоживання та тривоги відповідно до обсягу проекту. Згідно з оцінкою, периферійний сервер ефективно обробляє дані із середнім завантаженням процесора до 5,58%, уникаючи при цьому помилок вимірювань через випадкові перебої в електропостачанні протягом дня.

Електрика є носієм електричного заряду, також відомим як вторинне джерело енергії, оскільки вона перетворюється з первинних джерел, таких як вугілля, викопне паливо, сонячна та вітрова енергія [1]. За останні кілька століть електрична енергія трансформувала світову екосистему: від заміни свічок і масляних ламп до безпрецедентних випадків використання в практичному житті, заклавши основу для нового цифрового світу [2] і діючи як вирішальний причинно-наслідковий зв'язок між розробками, якістю поставок, інфраструктурою та зростанням нашої економіки [3]. Згідно зі звітом Управління енергетичної інформації США за 2023 рік, очікується, що до 2050 року світове виробництво електроенергії зросте від 30% до 76% порівняно з 2022 роком, тоді як лише промислове енергоспоживання збільшиться з 9% до 62% [4]. Крім того, в іншому звіті прогнозується, що світовий попит на електроенергію зросте з 62% до 185% до 2050 року порівняно з 2021 роком [5]. Виходячи з прогнозу споживання електроенергії, наведеного в обох звітах, необхідно вжити негайних заходів для уникнення будь-яких проблем з дефіцитом електроенергії шляхом розробки інтелектуальних систем енергомоніторингу, які

допоможуть пом'якшити та оптимізувати споживання електроенергії, особливо в промислових цілях.

З іншого боку, моніторинг промислових процесів зазнає значного технологічного прогресу завдяки інтеграції інформаційних технологій (ІТ) з операційними технологіями (ОТ) в рамках зміни парадигми Індустрії 4.0 та промислового Інтернету речей (ІоТ). Ця еволюція створила значні можливості для моніторингу та управління енергією від її розподілу до використання в різних сферах, таких як інтелектуальний транспорт, «розумні» мережі, «зелений» Інтернет речей та «розумні» будівлі. Тим часом, оскільки швидко впровадження технології ІоТ забезпечує надійний моніторинг промислових польових пристроїв через хмару, її злиття з периферійними обчисленнями ще більше прокладає шлях для розробки масштабованих та інтелектуальних систем, наближаючи можливості хмарних обчислень до апаратного забезпечення, що призводить до поліпшення затримок у роботі та підвищення апаратного забезпечення, що призводить до покращення затримок. Інтелектуальні системи з підтримкою периферійних обчислень полегшують збір і зберігання великої кількості даних з польових пристроїв і підтримують моніторинг процесів з високим рівнем кастомізації та надійності. Крім того, периферійні платформи також підтримують обробку даних часових рядів з використанням механізму правил, щоб допомогти користувачеві в прийнятті рішень на основі даних, ефективному використанні ресурсів і зниженні операційних витрат.

У сучасних дослідженнях розглядають архітектури системи на основі периферійного Інтернету речей для моніторингу енергоспоживання стаціонарних і мобільних промислових процесів на виробничому майданчику промислового підприємства за допомогою функції обробки даних для обчислення додаткових показників енергоспоживання. Запропоноване рішення може використовувати промислові трифазні дровоті та бездротові лічильники для моніторингу енергоспоживання різних промислових процесів та надсилання цієї інформації на периферійну машину, яка зберігає дані, обчислює нові параметри енергоспоживання за допомогою техніки обробки даних на основі JavaScript в механізмі периферійних правил, надає локальний інтерфейс користувача, а потім фільтрує та надсилає дані в хмару для віддаленого моніторингу одного бездротового лічильника відповідно до обсягу проекту. Запропоноване рішення представляє підхід до моніторингу індивідуальної аналітики з кожного лічильника енергії та колективної аналітики споживання енергії з усіх лічильників енергії, щоб полегшити кінцевому користувачеві моніторинг всієї системи на основі енергетичних параметрів, розрахованих за допомогою методу обробки даних. Крім того, вона також забезпечує тривожні події активності та неактивності, коли лічильник енергії недоступний протягом певного часу, і надсилає звіти панелі користувачеві електронною поштою. Нижче наведено основні аспекти досліджень:

- Розробка архітектури системи ІоТ для локального та віддаленого енергомоніторингу стаціонарних та мобільних промислових процесів на заводі.
- Реалізація методу обробки даних на основі JavaScript на периферії для обчислення нових параметрів енергоспоживання на основі зібраних даних лічильників енергії.
- Розробка загальних та індивідуальних інформаційних панелей енерголічильників для порівняльної та індивідуальної інформації про використання енергії.
- Реалізація сигналізації про активність/пасивність пристрою та функція звітування на основі електронної пошти для інтелектуального моніторингу енергоспоживання.

Інтеграція технологій Інтернету речей (ІоТ) та периферійних обчислень у промислові процеси сприяє ефективному управлінню енергоспоживанням. Запропоновані

на сьогодні системи забезпечують локальну обробку великих обсягів даних, підвищуючи продуктивність і знижуючи витрати. Такі системи підтримують моніторинг стаціонарних і мобільних активів за допомогою дротових і бездротових лічильників енергії, пропонує користувацькі інтерфейси для аналізу енергоспоживання, функції сповіщення та автоматизоване звітування. Система також інтегрує віддалений моніторинг через хмару та демонструє високу ефективність.

#### Література

1. Stern, D. I., Burke, P. J., & Bruns, S. B. (2019). The impact of electricity on economic development: A macroeconomic perspective. UC Berkeley: Center for Effective Global Action. Отримано September 26, 2024, from <https://escholarship.org/uc/item/7jb0015q>
2. U.S. Energy Information Administration (EIA). (n.d.). Electricity explained. Отримано 26, 2024, from <https://www.eia.gov/energyexplained/electricity/>
3. Stern, D., Burke, P., & Bruns, S. (2018). The impact of electricity on economic development: A macroeconomic perspective. *International Review of Environmental and Resource Economics*, 12(1), 85–127. <https://doi.org/10.1561/101.00000109>
4. U.S. Energy Information Administration (EIA). (2023). International energy outlook 2023. Отримано September 26, 2024, from <https://www.eia.gov/outlooks/ico/narrative/index.php>
5. Raimi, D., Zhu, Y., Newell, R. G., Prest, B. C., & Bergman, A. (2023). Global energy outlook 2023: Sowing the seeds of an energy transition (Technical Report 23-02). Resources for the Future. Отримано September 26, 2024, from <https://www.rff.org/publications/reports/global-energy-outlook-2023/>

## Інтерфейс веб-додатку користувача

## Система енергоменеджменту

Дані, отримані бездротовою сенсорною мережею:

## Контрольна панель

Reset  
Write API key  Validate API Key

## Режим

Automatic ▾

## Режим ФЕС

Disconnected ▾

## Режим АСЗЕ

Disconnected ▾

## Режим АС/DC

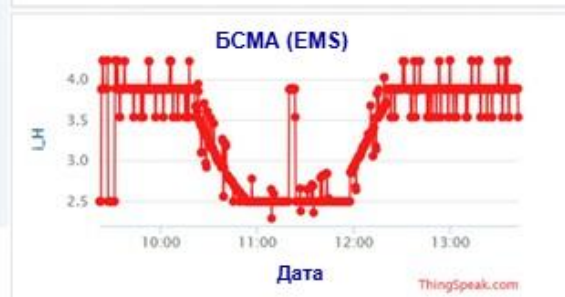
Disconnected ▾

Update

## Статус



## ФЕС



## Процес моніторингу з використанням інтерфейсу ВДК

