

Міністерство освіти і науки України
Західноукраїнський національний університет
Факультет комп'ютерних інформаційних технологій
Кафедра спеціалізованих комп'ютерних систем

Олег Іванович ФЕДИШИН

**АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ЗАРЯДНИМИ
СТАНЦІЯМИ ДЛЯ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ З ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИМ
РОЗПОДІЛОМ НАВАНТАЖЕННЯ /
AUTOMATED CONTROL SYSTEM FOR ELECTRIC
VEHICLE CHARGING STATIONS WITH INTELLIGENT LOAD
DISTRIBUTION**

Спеціальність 151 - Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
Освітньо-професійна програма – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані
технології

Випускна кваліфікаційна робота за ступенем вищої освіти "бакалавр"

Виконав студент групи АКІТ-41
Олег ФЕДИШИН

Науковий керівник:
к.т.н., доц. Н.Г. Яцків

Дипломну роботу допущено до захисту:
" ____ " _____ 20__ р.

Завідувач кафедри
_____ А.І.Сегін

Тернопіль 2026

Західноукраїнський національний університет
Факультет комп'ютерних інформаційних технологій
Кафедра спеціалізованих комп'ютерних систем
Ступінь вищої освіти "бакалавр"
Спеціальність: 151 - Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
Освітньо-професійна програма – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

“ЗАТВЕРДЖУЮ”

Завідувач кафедри СКС

_____ А.І.Сегін

“ ____ ” _____ 20__ р.

З А В Д А Н Н Я
НА БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТУ
ФЕДИШИНУ Олегу Івановичу

(прізвище, ім'я по-батькові)

1. Тема роботи

Автоматизована система керування зарядними станціями для електромобілів з інтелектуальним розподілом навантаження / Automated Control System for Electric Vehicle Charging Stations with Intelligent Load Distribution

керівник роботи _____ к.т.н., доц. Н.Г. Яцків

затверджені наказом по університету від "01" грудня 2025 р. № 894

2. Строк подання студентом закінченої дипломної роботи 25 травня 2026р.

3. Вихідні дані до роботи:

1. Характеристики зарядних станцій для електромобілів та параметри їх функціонування.

2. Вимоги до автоматичного розподілу електричного навантаження між зарядними станціями.

3. Вимоги до реалізації алгоритму інтелектуального балансування навантаження.

4. Вимоги до моніторингу параметрів процесу заряджання та керування системою.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):

1. Аналіз сучасних систем керування зарядними станціями електромобілів.

2. Розроблення функціональної схеми автоматизованої системи керування зарядними станціями.

3. Математичне моделювання та дослідження системи інтелектуального розподілу навантаження.

5. Перелік графічного матеріалу у роботі

1. Структурна схема автоматизованої системи керування зарядними станціями електромобілів.

2. Функціональна схема системи інтелектуального розподілу навантаження.

3. Вебінтерфейс моніторингу та керування зарядними станціями.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
1	Яцків Н.Г.		
2	Яцків Н.Г.		
3	Яцків Н.Г.		

7. Дата видачі завдання 01 грудня 2025р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз сучасних підходів до побудови систем керування зарядними станціями електромобілів	12.2025р. – 01.2026р.	
2	Алгоритми розподілу навантаження в зарядних станціях та їх математичне моделювання	02.2026р. – 03.2026р.	
3	Моделювання та дослідження системи керування зарядними станціями електромобілів	04.2026р. – 05.2026р.	

Студент

(підпис)

О.І. Федішин

Керівник роботи

(підпис)

к.т.н., доц. Н.Г. Яцків

АНОТАЦІЯ

Федишин О.І. Автоматизована система керування зарядними станціями для електромобілів з інтелектуальним розподілом навантаження. – Рукопис.

Дослідження на здобуття освітнього ступеня «бакалавр» за спеціальністю 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка», освітньо-професійна програма. – Західноукраїнський національний університет, Тернопіль, 2026.

У роботі розглянуто питання розроблення автоматизованої системи керування зарядними станціями для електромобілів з інтелектуальним розподілом навантаження. Розроблено структуру автоматизованої системи керування зарядною інфраструктурою, яка забезпечує збір, обробку, передачу та аналіз інформації про процес заряджання електромобілів. Проаналізовано основні технології керування зарядними станціями та обґрунтовано використання алгоритмів балансування навантаження, інтелектуального розподілу потужності та засобів моніторингу параметрів електричної мережі. Розроблено алгоритм інтелектуального розподілу навантаження між зарядними станціями залежно від кількості підключених електромобілів та доступної потужності електромережі.

Розроблено математичну модель системи та програмне забезпечення для моделювання процесів керування зарядними станціями у середовищі MATLAB/Simulink.

Практичне значення роботи полягає у можливості використання розробленої системи для підвищення ефективності роботи зарядних станцій електромобілів, раціонального використання енергетичних ресурсів та автоматизації процесів керування зарядною інфраструктурою.

Ключові слова: зарядна станція, електромобіль, інтелектуальний розподіл навантаження, Smart Charging, балансування навантаження, MATLAB/Simulink, автоматизована система, електроенергія.

ABSTRACT

Fedyshyn O.I. Automated Control System for Electric Vehicle Charging Stations with Intelligent Load Distribution. – Manuscript.

Research on obtaining a bachelor's degree in the specialty 174 "Automation and Computer-Integrated Technologies and Robotics", educational and professional program. – West Ukrainian National University, Ternopil, 2026.

The thesis addresses the development of an automated control system for electric vehicle charging stations with intelligent load distribution. An analysis of modern charging station management systems is carried out, and the feasibility of using intelligent load balancing algorithms is substantiated.

A structure of the automated charging infrastructure management system is developed, which provides acquisition, processing, transmission and analysis of information about the electric vehicle charging process. The main charging station control technologies are investigated, and the use of load balancing algorithms, intelligent power distribution methods and electrical grid monitoring tools is justified. An intelligent load distribution algorithm based on the number of connected vehicles and available grid power is developed.

A mathematical model of the system and software for simulation in the MATLAB/Simulink environment are developed.

The practical significance of the work lies in the possibility of applying the developed system to improve the performance of electric vehicle charging stations, ensure rational use of energy resources and automate charging infrastructure management processes.

Keywords: charging station, electric vehicle, intelligent load distribution, Smart Charging, load balancing, MATLAB/Simulink, automated system, electric power.

ЗМІСТ

ВСТУП	6
1 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ПІДХОДІВ ДО ПОБУДОВИ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ЗАРЯДНИМИ СТАНЦІЯМИ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ.....	8
1.1 Інфраструктура зарядних станцій для електромобілів: структура, принципи роботи та сфери застосування.....	8
1.2 Аналіз технологій керування процесом заряджання електромобілів.....	13
1.3 Архітектура інтелектуальних систем керування зарядними станціями з розподілом навантаження	17
2 АЛГОРИТМИ РОЗПОДІЛУ НАВАНТАЖЕННЯ В ЗАРЯДНИХ СТАНЦІЯХ ТА ЇХ МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ.....	21
2.1 Математична модель процесу керування зарядними станціями електромобілів	21
2.2 Математична модель алгоритму інтелектуального розподілу електричного навантаження	25
2.3 Принцип роботи інтелектуальної системи керування зарядною станцією...	28
2.4 Обґрунтування вибору контролера та апаратного забезпечення зарядної станції.....	32
3 МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЗАРЯДНИМИ СТАНЦІЯМИ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ.....	39
3.1 Визначення параметрів системи автоматичного керування.....	39
3.2 Комп'ютерне моделювання системи автоматичного керування.....	49
3.3 Технічні показники ефективності системи.....	54
ВИСНОВКИ	60
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	62
ДОДАТКИ.....	67

					ДП.АКІТ.11582780.00.00.000 ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Федишин О.І.			Автоматизована система керування зарядними станціями для електромобілів з інтелектуальним розподілом навантаження / Automated Control System for Electric Vehicle Charging Stations with Intelligent Load Distribution	Літ.	Арк.	Акрушів
Перевір.		Яцків Н.Г.					5	63
Консульт.		Яцків Н.Г.				ЗУНУ.ФКІТ.АКІТ-42/1		
Н. Контр.								
Затверд.		Сергін А.І.						

ВСТУП

У сучасних умовах розвитку транспортних систем та енергетичної інфраструктури особливого значення набуває впровадження екологічно чистих технологій [1]. Одним із перспективних напрямів є використання електромобілів, що сприяють зменшенню шкідливих викидів, підвищенню енергоефективності та зниженню залежності від традиційних видів палива.

Актуальність теми. Однією з основних проблем функціонування зарядної інфраструктури є нерівномірний розподіл електричного навантаження, що виникає при одночасному підключенні великої кількості електромобілів. [3]. Тому актуальним є розроблення інтелектуальних систем керування зарядними станціями, які забезпечують адаптивний розподіл потужності між споживачами.

Сучасні підходи до вирішення цієї задачі ґрунтуються на використанні математичних моделей та алгоритмів оптимізації, що враховують стан електромережі, кількість підключених транспортних засобів і параметри акумуляторів. Водночас ефективність їх реалізації залежить від апаратної платформи, здатної забезпечити обробку даних у реальному часі [4]. Важливу роль відіграє контролер зарядної станції, який забезпечує збір даних, формування керуючих сигналів і взаємодію з інформаційними системами. Реалізація контролера на базі мікроконтролера дозволяє інтегрувати вимірювальні, керуючі та комунікаційні функції для впровадження інтелектуальних алгоритмів розподілу навантаження. Важливим етапом розроблення є математичне моделювання системи керування в різних режимах роботи. Використання середовищ MATLAB та Simulink дає змогу реалізувати модель процесу заряджання, дослідити алгоритми розподілу потужності та оцінити їх ефективність [11].

Метою роботи є дослідження та розроблення автоматизованої системи керування зарядними станціями електромобілів з інтелектуальним розподілом електричного навантаження, реалізація апаратної частини контролера та

					ДП.АКІТ.11582780.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

оцінювання ефективності системи шляхом математичного моделювання.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі **завдання**:

- провести аналіз сучасних підходів до побудови систем керування зарядними станціями електромобілів;
- дослідити технології керування процесом заряджання акумуляторних батарей;
- проаналізувати архітектуру інтелектуальних систем керування;
- розробити математичну модель процесу керування зарядними станціями та алгоритму інтелектуального розподілу навантаження;
- розробити апаратну частину контролера зарядної станції;
- виконати моделювання системи керування в середовищах MATLAB та Simulink.

Об’єктом дослідження є процеси керування зарядними станціями електромобілів.

Предметом дослідження є методи, алгоритми та апаратні засоби інтелектуального розподілу електричного навантаження між зарядними станціями.

Методи дослідження: системний аналіз, математичне моделювання, методи оптимізації та комп’ютерне моделювання.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості використання розроблених алгоритмів, моделей та апаратної реалізації контролера для підвищення ефективності використання електроенергії, стабільності електричних мереж і скорочення часу заряджання електромобілів.

Апробація. О. І. Федішин, Л. В. Бабала Автоматизована система керування зарядними станціями електромобілів з інтелектуальним розподілом навантаження. Збірник матеріалів всеукраїнської науково-практичної конференції «Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології» (АКІТ - 2026), Тернопіль, 2026. – с.92-97.

					ДП.АКІТ.11582780.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

1 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ПІДХОДІВ ДО ПОБУДОВИ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ЗАРЯДНИМИ СТАНЦІЯМИ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ

1.1 Інфраструктура зарядних станцій для електромобілів: структура, принципи роботи та сфери застосування

У сучасних умовах розвитку транспортної інфраструктури значну увагу приділяють використанню екологічно чистих транспортних засобів. Одним із перспективних напрямів є застосування електромобілів, які дозволяють зменшити рівень шкідливих викидів у атмосферу та підвищити енергоефективність транспортної системи. Важливим елементом розвитку електромобільного транспорту є створення розвиненої інфраструктури зарядних станцій, що забезпечують ефективне та безпечне заряджання акумуляторних батарей.

Інфраструктура зарядних станцій електромобілів являє собою комплекс технічних засобів і систем, які забезпечують передачу електричної енергії від електричної мережі до акумуляторної батареї транспортного засобу. До основних елементів такої інфраструктури належать зарядні станції, системи керування, комунікаційні мережі, а також програмне забезпечення для моніторингу та управління процесом заряджання [1].

Типова зарядна станція електромобіля складається з декількох основних функціональних компонентів. До них належать джерело електроживлення, силові перетворювачі, система керування, датчики параметрів та комунікаційні модулі. Джерелом електроенергії виступає електрична мережа, від якої електроенергія надходить до зарядної станції [2]. Силові перетворювачі забезпечують перетворення електричної енергії у необхідні параметри напруги та струму для заряджання акумуляторної батареї електромобіля.

Система керування виконує функції контролю процесу заряджання, аналізує показники датчиків та регулює роботу силових перетворювачів. Датчики забезпечують вимірювання таких параметрів, як напруга, струм та

					ДП.АКІТ.11582780.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

температура. Отримані дані використовуються для забезпечення безпечного режиму роботи зарядної станції. Структурну схему зарядної станції електромобіля наведено на рисунку 1.1 [3].

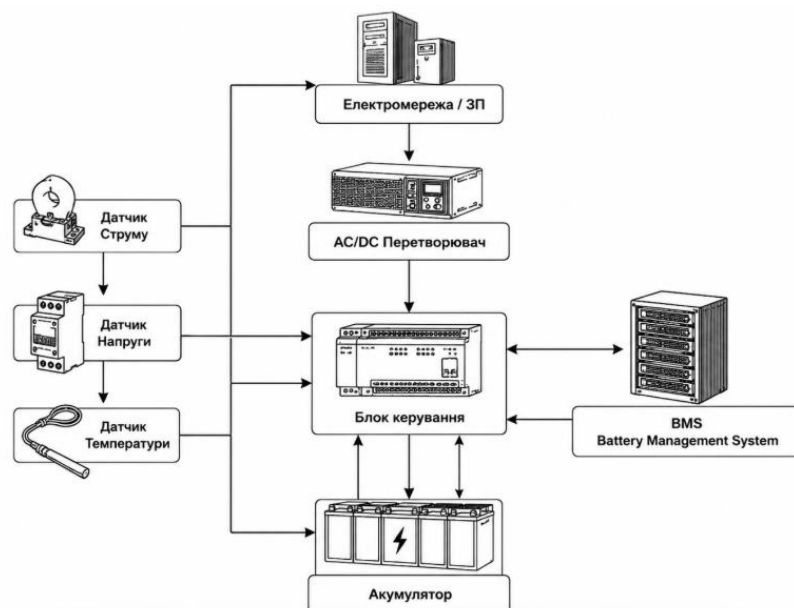


Рисунок 1.1 – Структурна схема зарядної станції електромобіля

Сучасні зарядні станції можуть функціонувати як окремі пристрої або як частина розгалуженої мережі зарядної інфраструктури. У такій мережі зарядні станції об'єднані комунікаційними каналами та підключені до центральної системи керування. Це дозволяє здійснювати моніторинг стану зарядних станцій, контролювати навантаження електромережі та оптимізувати використання електроенергії.

Мережа зарядних станцій включає електричну мережу, систему керування, зарядні станції, електромобілі та інформаційну систему моніторингу. Центральний сервер здійснює обробку інформації про стан зарядних станцій та керує їх роботою [4]. Архітектуру мережі зарядних станцій наведено на рисунку 1.2.

					ДП.АКІТ.11582780.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

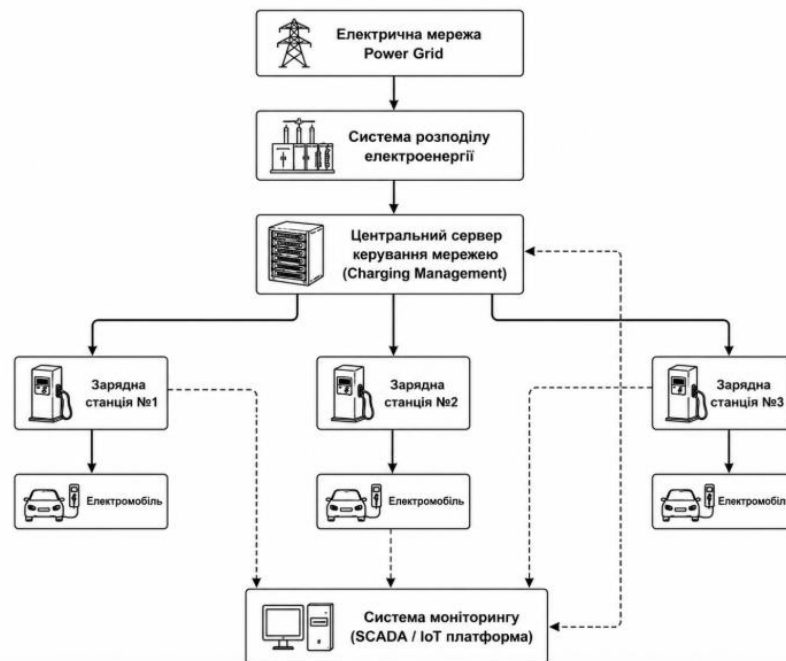


Рисунок 1.2 – Архітектура мережі зарядних станцій електромобілів

Заряджання електромобілів може здійснюватися різними способами залежно від потужності зарядної станції та типу електричного струму. Найбільш поширеними є три основні типи заряджання: повільна зарядка, стандартна зарядка та швидка зарядка.

Повільна зарядка здійснюється від звичайної побутової електричної мережі та має потужність до 3,7 кВт. Стандартна зарядка передбачає використання спеціалізованих зарядних станцій змінного струму з потужністю від 7 до 22 кВт. Швидка зарядка використовує постійний струм і може забезпечувати потужність до 350 кВт, що дозволяє значно скоротити час заряджання акумулятора [5]. Основні типи заряджання електромобілів наведено на рисунку 1.3 [6].

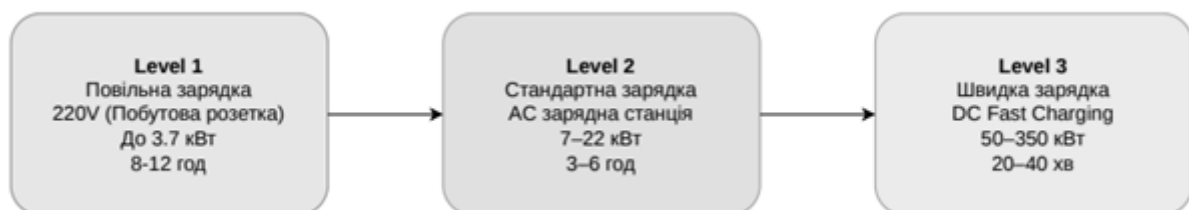


Рисунок 1.3 – Типи заряджання електромобілів

У різних країнах світу використовуються різні стандарти заряджання електромобілів, що відрізняються типом струму, потужністю заряджання та конструкцією роз'ємів. Найбільш поширеними стандартами є CCS, CHAdeMO та Type 2. Порівняння основних стандартів заряджання електромобілів наведено в таблиці 1.1 [5, 6, 7].

Таблиця 1.1 – Порівняння стандартів заряджання електромобілів

Стандарт	Тип струму	Максимальна потужність	Регіон використання	Особливості
CCS	AC / DC	до 350 кВт	Європа, США	комбінований роз'єм
CHAdeMO	DC	до 400 кВт	Японія	підтримка технології V2G
Type 2	AC	до 43 кВт	Європа	стандарт AC зарядки
Tesla	DC	до 250 кВт	США, Європа	власний стандарт Tesla

У сучасних умовах розвитку електромобільної інфраструктури значну увагу приділяють використанню інтелектуальних систем керування зарядними станціями, які дозволяють автоматично розподіляти електричне навантаження, балансувати енергоспоживання та оптимізувати використання електроенергії. Центральна система керування аналізує інформацію про стан електромережі та параметри заряджання електромобілів. Архітектуру інтелектуальної системи керування зарядною інфраструктурою наведено на рисунку 1.4 [8].

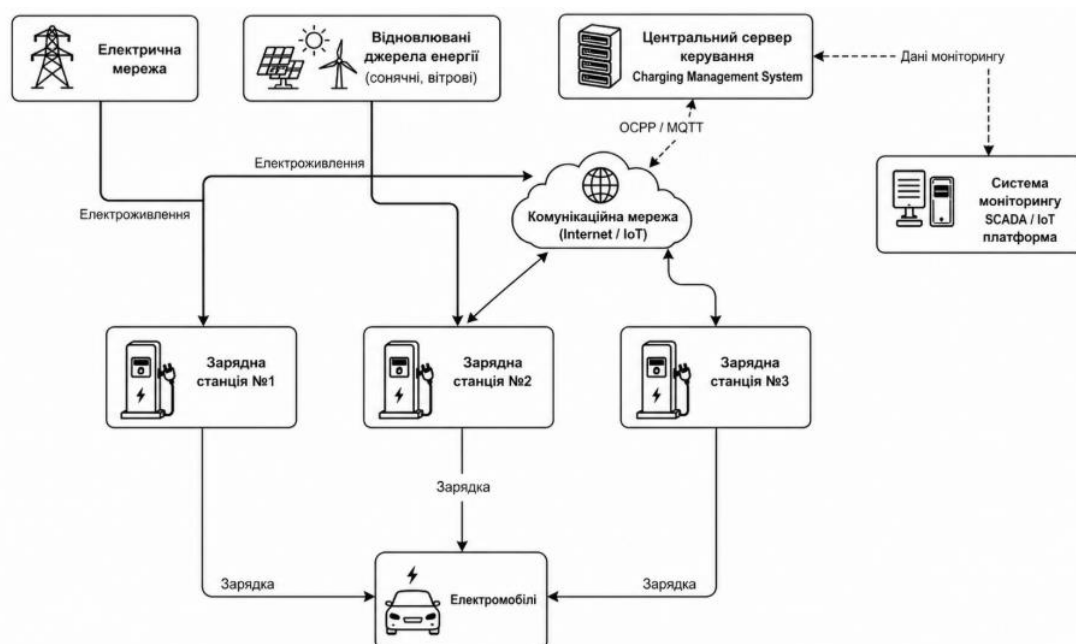


Рисунок 1.4 – Архітектура інтелектуальної системи керування зарядною інфраструктурою

Система керування зарядною станцією складається з мікроконтролера, силового перетворювача, датчиків параметрів та комунікаційного модуля. Контролер забезпечує аналіз даних датчиків та керування процесом заряджання акумуляторної батареї. Архітектуру системи керування зарядною станцією наведено на рисунку 1.5.

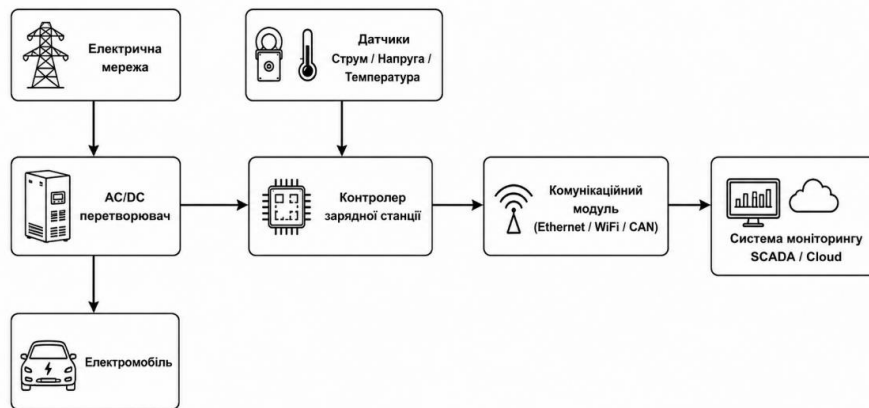


Рисунок 1.5 – Архітектура системи керування зарядною станцією

Одним із перспективних напрямів розвитку зарядної інфраструктури є інтеграція зарядних станцій у систему інтелектуальних електричних мереж Smart Grid, що дозволяє оптимізувати розподіл електроенергії, зменшити перевантаження мережі та підвищити ефективність використання енергетичних ресурсів [10]. У системах Smart Grid зарядні станції можуть взаємодіяти з відновлюваними джерелами енергії, а також використовувати технологію Vehicle-to-Grid, яка забезпечує передачу електроенергії від електромобілів до мережі [9]. Інтеграцію зарядних станцій у систему Smart Grid наведено на рисунку 1.6.

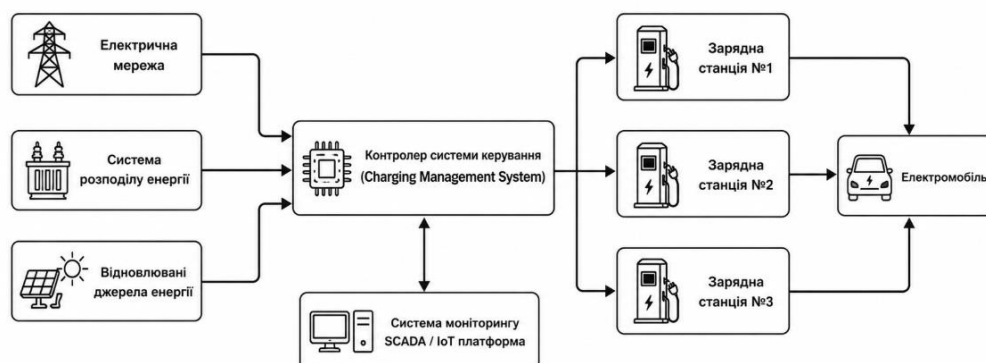


Рисунок 1.6 – Інтеграція зарядних станцій у систему Smart Grid

					ДП.АКТ.11582780.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Таким чином, інтеграція зарядних станцій електромобілів у систему Smart Grid [10], як показано на рисунку 1.6, забезпечує ефективне керування розподілом електричної енергії, оптимізацію навантаження електромережі та підвищення надійності зарядної інфраструктури. Важливу роль у таких системах відіграють інтелектуальні алгоритми керування процесом заряджання, які визначають параметри струму, напруги та режими роботи зарядних пристроїв. Ефективність зарядної інфраструктури значною мірою залежить від застосованих технологій керування, що сприяють автоматизації процесів, підвищенню енергоефективності та зниженню навантаження на електричну мережу.

1.2 Аналіз технологій керування процесом заряджання електромобілів

Розвиток електромобільного транспорту зумовлює необхідність створення ефективних систем керування процесом заряджання акумуляторних батарей, від яких залежить швидкість заряджання, енергоефективність, безпека експлуатації та стабільність роботи електромережі. Система керування зарядною станцією забезпечує контроль параметрів заряджання, регулювання потужності, визначення рівня заряду акумулятора (State of Charge), контроль температури та захист від перевантаження [11–13].

Використання автоматизованих систем керування сприяє підвищенню ефективності використання електроенергії та продовженню терміну служби акумуляторних батарей. Одним із найбільш поширених алгоритмів заряджання є CC–CV (Constant Current – Constant Voltage) [14], який передбачає заряджання спочатку в режимі постійного струму, а після досягнення заданої напруги — у режимі постійної напруги зі зменшенням струму. Основні етапи алгоритму заряджання наведено на рисунку 1.7.

					ДП.АКІТ.11582780.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

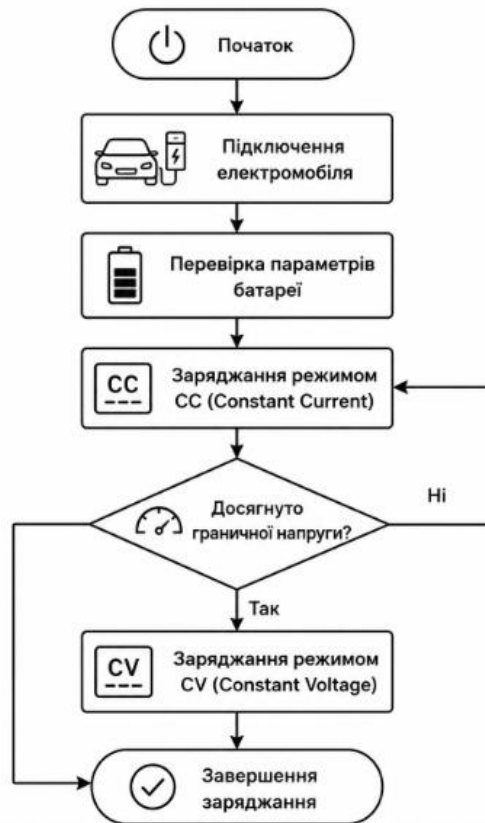


Рисунок 1.7 – Алгоритм керування процесом зарядження акумулятора електромобіля

У сучасних зарядних системах широко використовуються інтелектуальні технології керування, які дозволяють оптимізувати роботу зарядних станцій.

До таких технологій належать:

- Smart Charging – інтелектуальне керування зарядкою [10];
- Load Balancing – балансування навантаження [12];
- Vehicle-to-Grid (V2G) – взаємодія електромобіля з електромережею [9].

Технологія Smart Charging дозволяє автоматично регулювати потужність зарядження залежно від стану електромережі та кількості підключених електромобілів. У випадку одночасного підключення великої кількості електромобілів до зарядної інфраструктури виникає ризик перевантаження електричної мережі. Для вирішення цієї проблеми використовуються алгоритми балансування навантаження. Це забезпечує стабільність роботи електричної мережі та зменшує ризик аварійних ситуацій. Архітектуру системи балансування навантаження наведено на рисунку 1.8.



Рисунок 1.8 – Архітектура системи балансування навантаження зарядних станцій [15]

Різні технології керування зарядними станціями мають свої переваги та недоліки. Для аналізу їхніх характеристик доцільно провести порівняння основних технологій.

Таблиця 1.2 – Порівняння технологій керування заряджанням електромобілів [10-15]

Технологія	Основна функція	Переваги	Недоліки
CC–CV	регулювання струму та напруги	простота реалізації	обмежена оптимізація енергоспоживання
Smart Charging	оптимізація заряджання	ефективне використання електроенергії	складність реалізації
Load Balancing	балансування навантаження	стабільність електромережі	потребує централізованого керування
V2G	передача енергії у мережу	інтеграція з Smart Grid	складна інфраструктура

Подальший розвиток технологій керування зарядними станціями пов'язаний із впровадженням інтелектуальних алгоритмів, використанням технологій штучного інтелекту та інтеграцією зарядної інфраструктури з

системами Smart Grid. Для реалізації алгоритмів керування зарядними станціями застосовуються різні типи контролерів, які відрізняються архітектурою, продуктивністю та сферою застосування. Порівняння основних типів контролерів зарядних станцій наведено в таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 – Порівняння типів контролерів зарядних станцій електромобілів [16-18]

Тип контролера	Основні характеристики	Переваги	Недоліки	Приклад застосування
Мікроконтролерні системи (MCU)	Використовують вбудовані процесори з периферійними модулями для керування силовими перетворювачами	Низька вартість, висока енергоефективність, простота реалізації	Обмежені обчислювальні ресурси	Домашні та малопотужні зарядні станції
Промислові контролери (PLC)	Використовуються у промислових системах автоматизації, підтримують стандартні протоколи зв'язку	Надійність, стабільність роботи, простота інтеграції	Висока вартість, менша гнучкість програмування	Публічні зарядні станції
Вбудовані комп'ютерні системи (Embedded PC)	Використовують операційні системи реального часу та мають розширені можливості обробки даних	Висока продуктивність, підтримка складних алгоритмів	Вища енергоспоживаючість	Швидкі зарядні станції
Хмарні системи керування	Використовують віддалені сервери для керування зарядною інфраструктурою	Масштабованість, централізоване управління	Залежність від інтернет-з'єднання	Мережі зарядних станцій

Як видно з таблиці 1.3, вибір типу контролера залежить від потужності зарядної станції, складності алгоритмів керування та вимог до системи автоматизації. Сучасні дослідження спрямовані на створення систем, здатних прогнозувати навантаження електромережі та автоматично оптимізувати роботу зарядних станцій, що підвищує ефективність використання електроенергії та стабільність енергосистеми. Аналіз технологій керування процесом заряджання показує, що сучасна зарядна інфраструктура

використовує широкий спектр алгоритмів і методів керування. Найбільш перспективними є технології Smart Charging та алгоритми балансування навантаження, які можуть бути використані при розробленні автоматизованих систем керування зарядними станціями електромобілів.

1.3 Архітектура інтелектуальних систем керування зарядними станціями з розподілом навантаження

Стрімке зростання кількості електромобілів створює додаткове навантаження на електричні мережі, що потребує впровадження сучасних інтелектуальних систем керування зарядною інфраструктурою. Традиційні підходи до керування зарядними станціями не завжди забезпечують ефективний розподіл електричної потужності між споживачами, що може призводити до перевантаження електричних мереж та зниження ефективності роботи енергетичних систем. Для вирішення цих проблем використовуються інтелектуальні системи керування зарядними станціями, які забезпечують автоматичне регулювання параметрів заряджання, балансування навантаження та оптимізацію використання електричної енергії. Основною особливістю таких систем є використання алгоритмів аналізу даних та адаптивного керування.

Інтелектуальна система керування зарядними станціями складається з декількох взаємопов'язаних компонентів, що забезпечують ефективну роботу зарядної інфраструктури. До основних компонентів системи належать [16]:

- центральний сервер керування;
- зарядні станції;
- система моніторингу;
- комунікаційна мережа;
- електрична мережа;
- електромобілі.

Центральний сервер керування здійснює обробку інформації про стан зарядних станцій, рівень навантаження електромережі та параметри заряджання

					ДП.АКІТ.11582780.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

електромобілів. На основі отриманих даних система формує керуючі сигнали для оптимального розподілу електричної потужності. Інтелектуальна система керування зарядною інфраструктурою включає центральний сервер керування, комунікаційну мережу, зарядні станції та систему моніторингу. Центральний сервер аналізує параметри роботи зарядних станцій та рівень навантаження електричної мережі, після чого формує керуючі сигнали для оптимального розподілу електричної потужності [19]. Архітектуру системи Smart Charging наведено на рисунку 1.9.

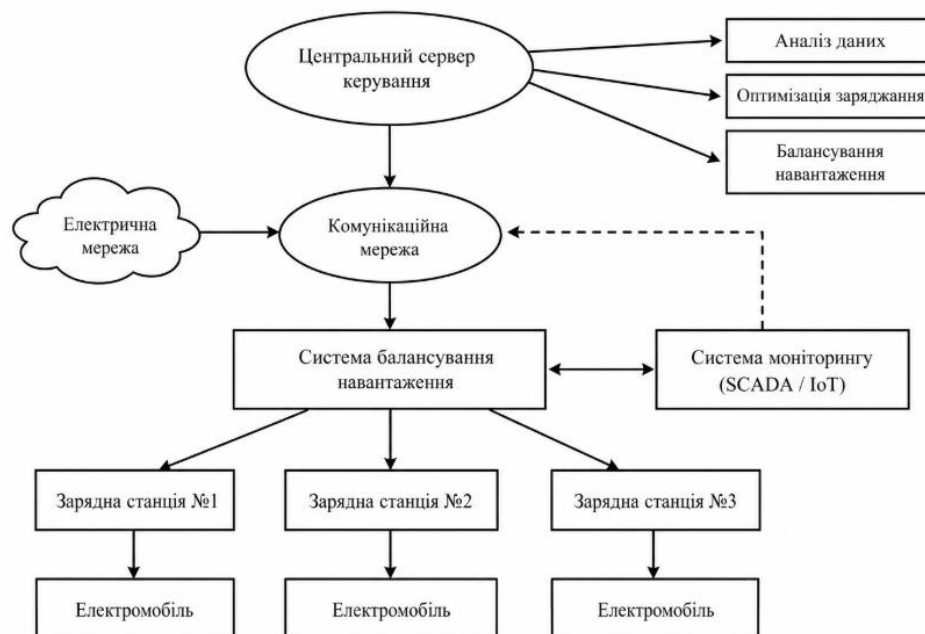


Рисунок 1.9 – Архітектура інтелектуальної системи керування зарядними станціями

Одним із ключових елементів інтелектуальних систем керування зарядними станціями є система розподілу навантаження, яка забезпечує ефективне використання доступної електричної потужності та запобігає перевантаженню електромережі. Основними функціями такої системи є визначення доступної потужності, розподіл енергії між зарядними станціями, пріоритезація заряджання та контроль параметрів процесу заряджання. Алгоритми балансування навантаження адаптують процес заряджання до змін стану електромережі та кількості підключених електромобілів. Важливу роль у

роботі системи відіграє комунікаційна інфраструктура, що забезпечує обмін даними між зарядними станціями, центральною системою керування та системами моніторингу із застосуванням протоколів OCPP, Modbus, CAN та Ethernet. У сучасних зарядних системах використовуються статичні, динамічні та адаптивні алгоритми розподілу навантаження. Для оцінювання ефективності різних підходів доцільно провести порівняння основних алгоритмів керування, що використовуються у зарядних станціях. Порівняння алгоритмів наведено в таблиці 1.4.

Таблиця 1.4 – Порівняння алгоритмів балансування навантаження зарядних станцій [11-15]

Алгоритм	Принцип роботи	Переваги	Недоліки
Статичний розподіл	Потужність рівномірно розподіляється між станціями	Простота реалізації	Низька гнучкість
Динамічний розподіл	Потужність змінюється залежно від кількості автомобілів	Ефективніше використання енергії	Потребує моніторингу
Пріоритетний алгоритм	Зарядка з урахуванням пріоритету автомобілів	Швидка зарядка важливих авто	Нерівномірний розподіл
Інтелектуальний (AI)	Використання алгоритмів оптимізації або ІІ	Максимальна ефективність	Складність реалізації

Для ефективного використання електроенергії у зарядній інфраструктурі застосовуються алгоритми інтелектуального балансування навантаження, які аналізують кількість підключених електромобілів, рівень заряду батарей та доступну потужність електромережі. Алгоритм інтелектуального балансування навантаження зарядних станцій наведено на рисунку 1.10.

У сучасних системах використовуються статичний, динамічний та адаптивний розподіл навантаження, причому найбільш ефективним є адаптивний підхід, що забезпечує автоматичну оптимізацію процесу заряджання залежно від стану мережі. Використання інтелектуальних систем керування дозволяє підвищити ефективність використання електроенергії, зменшити навантаження на електромережу, підвищити надійність зарядної інфраструктури та оптимізувати процес заряджання електромобілів.

					ДП.АКІТ.11582780.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

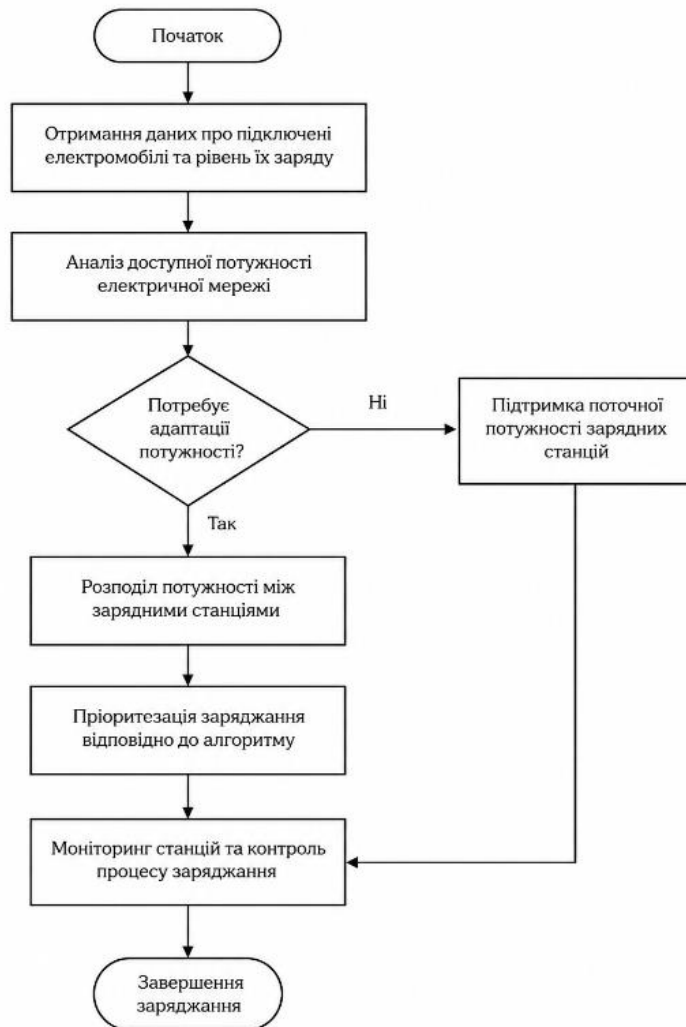


Рисунок 1.10 – Алгоритм інтелектуального балансування навантаження зарядних станцій

Використання інтелектуальних систем дозволяє інтегрувати зарядну інфраструктуру із системами Smart Grid, забезпечуючи ефективне керування енергетичними потоками. Архітектура таких систем базується на сучасних інформаційних технологіях, засобах автоматизації та алгоритмах розподілу навантаження, що сприяє оптимізації використання електроенергії та ефективній роботі зарядної інфраструктури. Результати аналізу архітектури інтелектуальних систем керування можуть бути використані при розробленні автоматизованої системи керування зарядними станціями електромобілів з інтелектуальним розподілом навантаження.

2 АЛГОРИТМИ РОЗПОДІЛУ НАВАНТАЖЕННЯ В ЗАРЯДНИХ СТАНЦІЯХ ТА ЇХ МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

2.1 Математична модель процесу керування зарядними станціями електромобілів

Використання інтелектуальних систем дозволяє інтегрувати зарядну інфраструктуру із системами Smart Grid, забезпечуючи ефективне керування енергетичними потоками. Архітектура таких систем базується на сучасних інформаційних технологіях, засобах автоматизації та алгоритмах розподілу навантаження, що сприяє оптимізації використання електроенергії та ефективній роботі зарядної інфраструктури. Результати аналізу архітектури інтелектуальних систем керування можуть бути використані при розробленні автоматизованої системи керування зарядними станціями електромобілів з інтелектуальним розподілом навантаження:

$$P_{grid}$$

Потужність, яка подається на i -ту зарядну станцію:

$$P_i$$

Тоді сумарна потужність усіх зарядних станцій повинна задовольняти обмеження:

$$\sum_{i=1}^N P_i \leq P_{grid} \quad (2.1)$$

де:

P_i – потужність i -тої зарядної станції;

N – кількість зарядних станцій;

P_{grid} – доступна потужність електричної мережі.

Основні параметри математичної моделі наведено в таблиці 2.1.

					ДП.АКІТ.11582780.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Таблиця 2.1 – Основні параметри математичної моделі керування зарядними станціями [10, 12, 16]

Позначення	Параметр	Одиниця вимірювання	Опис
P_{grid}	Потужність електричної мережі	кВт	Максимальна доступна потужність
P_i	Потужність зарядної станції	кВт	Потужність, що подається на i -ту станцію
P_{max}	Максимальна потужність станції	кВт	Гранична потужність зарядного пристрою
SOC_i	Рівень заряду батареї	%	Поточний стан заряду акумулятора
N	Кількість станцій	шт.	Кількість підключених зарядних станцій
w_j	Коефіцієнт пріоритету	–	Пріоритет заряджання електромобіля

Потужність заряджання акумулятора електромобіля визначається як добуток напруги та струму:

$$P = U \cdot I \quad (2.2)$$

де: P – потужність заряджання; U – напруга заряджання; I – струм заряджання.

Одним із найбільш поширених методів заряджання акумуляторів електромобілів є алгоритм Constant Current – Constant Voltage (CC–CV). На початковому етапі використовується режим постійного струму, після чого система переходить у режим постійної напруги.

Графік процесу заряджання наведено на рисунку 2.1.

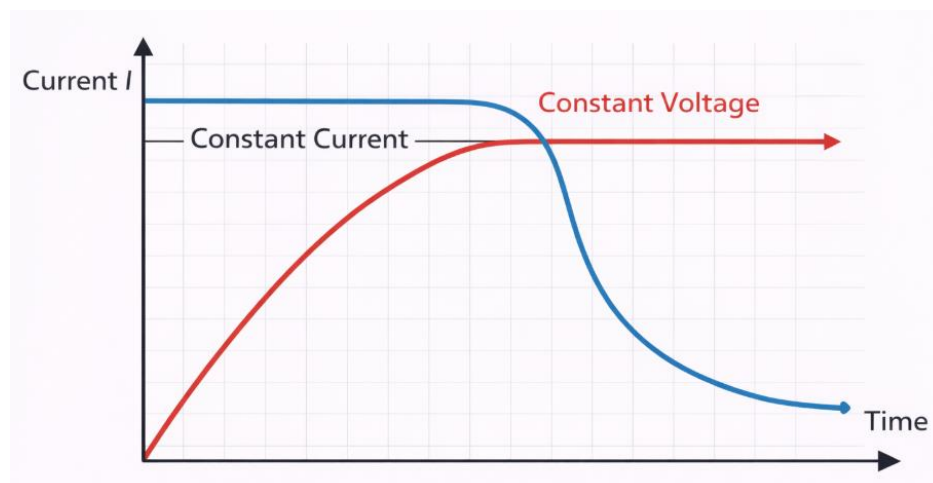


Рисунок 2.1 – Графік процесу заряджання акумулятора за алгоритмом CC–CV

Зміна рівня заряду акумулятора (SOC – State of Charge) описується рівнянням:

$$SOC(t) = SOC_0 + \frac{1}{C} \int_0^t I(\tau) d\tau \quad (2.3)$$

де:

$SOC(t)$ – початковий рівень заряду батареї;

C – ємність акумулятора;

$I(\tau)$ – струм заряджання.

Для керування зарядними станціями використовується функція керування:

$$P_i = f(SOC_i, P_{grid}, N) \quad (2.4)$$

де:

SOC_i – рівень заряду i -того електромобіля;

P_{grid} – доступна потужність мережі;

N – кількість підключених електромобілів.

Таким чином, потужність заряджання кожного електромобіля визначається залежно від поточного стану акумулятора та доступної потужності електромережі.

Задача керування зарядними станціями може бути сформульована як задача оптимізації. Необхідно мінімізувати різницю між бажаною та фактичною потужністю заряджання:

$$\min \sum_{i=1}^N (P_i - P_i^{req})^2 \quad (2.5)$$

де:

P_i^{req} – бажана потужність заряджання електромобіля.

При цьому повинні виконуватися обмеження:

$$0 \leq P_i \leq P_{max} \quad (2.6)$$

де:

P_{max} – максимальна потужність зарядної станції.

Для реалізації інтелектуального керування зарядними станціями використовується функція адаптивного розподілу потужності:

					ДП.АКІТ.11582780.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

$$P_i = \frac{P_{grid}}{\sum_{j=1}^N w_j} \cdot w_j \quad (2.7)$$

де:

w_j – коефіцієнт пріоритету заряджання i -того електромобіля.

Коефіцієнт пріоритету може визначатися залежно від рівня заряду батареї:

$$w_j = 1 - SOC_i \quad (2.8)$$

Таким чином, електромобілі з нижчим рівнем заряду отримують більшу частку доступної потужності. Приклад розподілу потужності між зарядними станціями наведено на рисунку 2.2. Розроблена математична модель дозволяє описати процес керування зарядними станціями електромобілів та оптимізувати розподіл електричної потужності між ними. Використання такої моделі дає можливість забезпечити ефективне використання ресурсів електричної мережі та підвищити ефективність роботи зарядної інфраструктури.

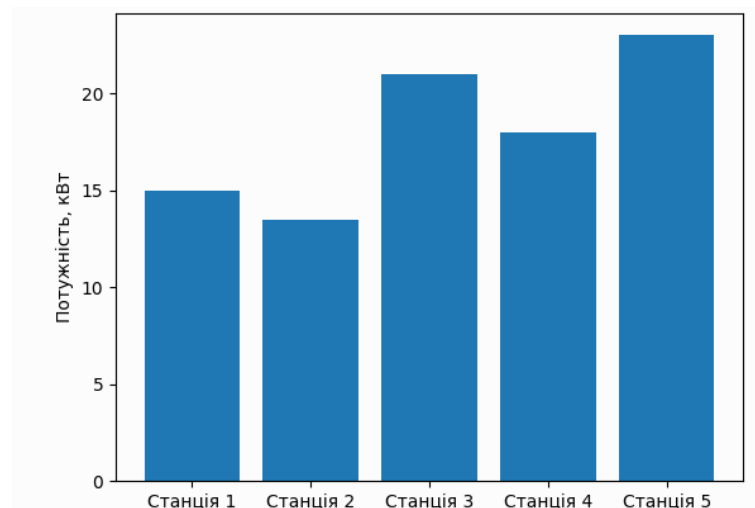


Рисунок 2.2 – Приклад розподілу потужності між зарядними станціями

Отримані результати можуть бути використані при розробленні алгоритмів інтелектуального керування зарядними станціями електромобілів.

					ДП.АКІТ.11582780.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

2.2 Математична модель алгоритму інтелектуального розподілу електричного навантаження

Збільшення кількості електромобілів призводить до значного зростання навантаження на електричні мережі, що потребує використання інтелектуальних алгоритмів керування зарядною інфраструктурою. Основною задачею таких алгоритмів є оптимізація процесу розподілу електричної потужності між зарядними станціями з урахуванням обмежень енергосистеми та потреб користувачів. Математична модель інтелектуального розподілу навантаження базується на принципах оптимізації часу заряджання електромобілів та рівномірного використання доступних ресурсів електричної мережі [18]. Час заряджання акумуляторної батареї визначається співвідношенням між енергією, яку необхідно передати батареї, та потужністю зарядного пристрою:

$$T_i = \frac{E_i}{P_i} \quad (2.9)$$

де:

T_i – час заряджання i -того електромобіля;

E_i – необхідна енергія для повного заряджання батареї;

P_i – потужність заряджання.

Енергія, необхідна для заряджання батареї, визначається як:

$$E_i = C_i(SOC_{max} - SOC_i) \quad (2.10)$$

де:

C_i – ємність акумулятора;

SOC_i – поточний рівень заряду батареї;

SOC_{max} – максимальний рівень заряду.

Таким чином, електромобілі з нижчим рівнем заряду потребують більшої кількості енергії для повного заряджання. Для забезпечення ефективного розподілу потужності між зарядними станціями використовується функція

					ДП.АКТ.11582780.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

керування, яка враховує час заряджання електромобілів:

$$P_i(t + 1) = P_i(t) + k(T_{avg} - T_i) \quad (2.11)$$

де:

$P_i(t)$ – потужність заряджання у момент часу t ;

T_{avg} – середній час заряджання електромобілів у системі;

k – коефіцієнт регулювання.

Це рівняння дозволяє коригувати потужність заряджання таким чином, щоб вирівнювати час заряджання електромобілів. Сумарне навантаження електричної мережі визначається як:

$$P_{load}(t) = \sum_{i=1}^N P_i(t) \quad (2.12)$$

де: $P_{load}(t)$ – загальне навантаження мережі; N – кількість активних зарядних станцій.

Для запобігання перевантаженню електричної мережі використовується обмеження:

$$P_{load}(t) \leq P_{limit} \quad (2.13)$$

де: P_{limit} – максимально допустиме навантаження електромережі.

Алгоритм інтелектуального керування зарядними станціями включає такі етапи:

- отримання інформації про підключені електромобілі;
- визначення необхідної енергії для заряджання;
- розрахунок часу заряджання;
- визначення середнього часу заряджання;
- коригування потужності зарядних станцій;
- контроль навантаження електричної мережі.

Алгоритм інтелектуального балансування навантаження наведено на рисунку 2.3.

					ДП.АКІТ.11582780.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

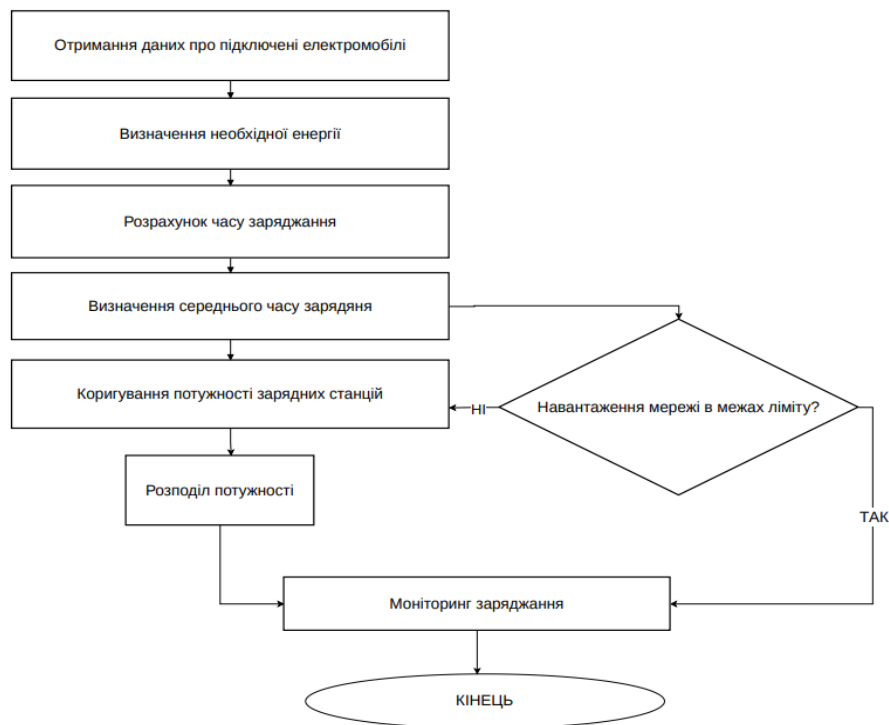


Рисунок 2.3 – Алгоритм інтелектуального розподілу навантаження зарядних станцій

Для оцінки ефективності запропонованого алгоритму використовується критерій мінімізації середнього часу заряджання електромобілів:

$$J = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_i \quad (2.14)$$

де:

J – середній час заряджання електромобілів.

Мінімізація цього критерію дозволяє забезпечити більш рівномірний розподіл потужності між зарядними станціями та скоротити час очікування користувачів. Основні характеристики алгоритмів керування наведено в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 - Основні характеристики алгоритмів керування зарядними станціями

Алгоритм	Основний критерій	Переваги	Недоліки
Статичний	Рівномірний розподіл	Простота	Низька ефективність
Динамічний	Аналіз навантаження	Краща адаптація	Потребує моніторингу
Інтелектуальний	Мінімізація часу заряджання	Висока ефективність	Складність реалізації

Розроблена математична модель алгоритму інтелектуального розподілу електричного навантаження дозволяє оптимізувати процес керування зарядними станціями електромобілів. Використання моделі часу заряджання та динамічного регулювання потужності забезпечує ефективне використання ресурсів електричної мережі й скорочення часу заряджання транспортних засобів.

2.3 Принцип роботи інтелектуальної системи керування зарядною станцією

Інтелектуальна система керування зарядною станцією призначена для забезпечення ефективного, безпечного та автоматизованого процесу заряджання електромобіля. Вона реалізує функції збору даних, аналізу параметрів електромережі, керування силовими елементами та взаємодії із зовнішніми інформаційними системами (рисунк 2.3).

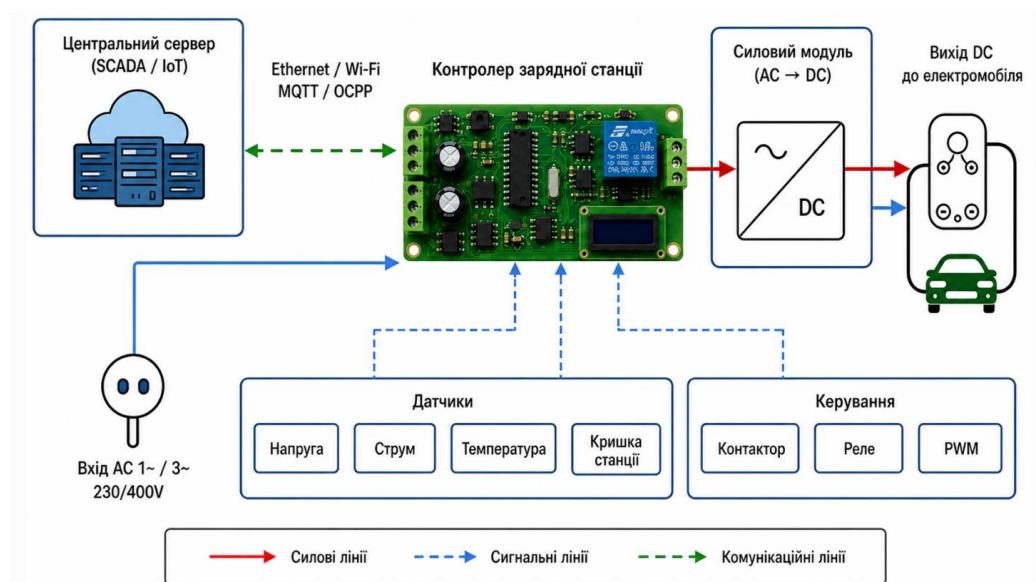


Рисунок 2.4 – Структурна схема інтелектуальної системи зарядної станції

Структурна система включає центральний контролер, силову частину, підсистему датчиків, виконавчі елементи та комунікаційні інтерфейси. Загальна логіка роботи системи полягає у безперервному моніторингу параметрів та адаптивному керуванні процесом заряджання. Живлення системи здійснюється від мережі змінного струму напругою 230/400 В. Силова частина виконує

перетворення змінного струму у постійний (AC–DC), який подається на акумулятор електромобіля. Центральний контролер здійснює обробку сигналів із датчиків, прийняття рішень та формування керуючих впливів. Перед початком заряджання контролер виконує перевірку стану системи. У разі відповідності параметрів допустимим значенням активується контактор, після чого запускається процес заряджання. Регулювання потужності здійснюється за допомогою широтно-імпульсної модуляції (PWM).

Для забезпечення надійної роботи зарядної станції використовується система датчиків, яка здійснює контроль основних електричних та фізичних параметрів. Основні характеристики датчиків наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Основні параметри датчиків системи зарядної станції

№	Назва датчика	Величина	Діапазон	Модель	Сигнал	Призначення
1	Напруги	В	0–400	ZMPT101B	Аналоговий	Контроль мережі
2	Струму	А	0–30	ACS712	Аналоговий	Контроль струму
3	Температури	°C	-55...125	DS18B20	Цифровий	Захист від перегріву
4	Кришки станції	0/1	Відкр/закр	Геркон	Дискретний	Безпека

Вимірювання напруги здійснюється за допомогою модуля ZMPT101B, який забезпечує гальванічну розв'язку. Датчик струму ACS712 працює на основі ефекту Холла. Контроль температури реалізовано за допомогою цифрового датчика DS18B20. Датчик кришки станції забезпечує контроль доступу та блокує роботу при відкритті. Таким чином, система забезпечує ефективне керування процесом заряджання, контроль параметрів та високий рівень безпеки.

Апаратна частина контролера зарядної станції призначена для керування процесом заряджання електромобіля, збору та обробки даних із датчиків, взаємодії з центральним сервером, а також керування силовими елементами системи. Принципова електрична схема контролера зарядної станції наведена на рисунку 2.5.

					ДП.АКІТ.11582780.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

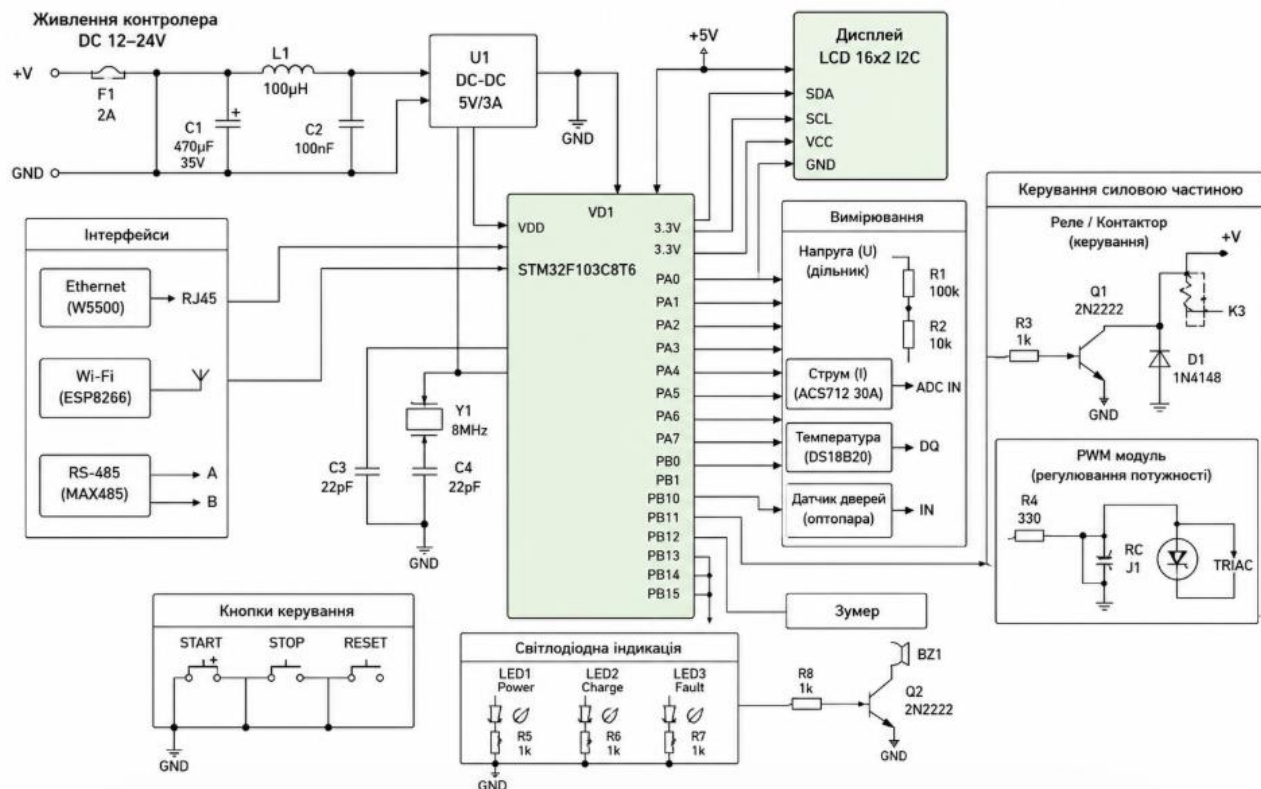


Рисунок 2.5 – Принципова електрична схема контролера зарядної станції

Основним елементом системи є мікроконтролер STM32F103C8T6, який забезпечує обробку даних, керування зарядним процесом та взаємодію з периферійними пристроями. Живлення контролера реалізовано від джерела постійної напруги 12–24 В через понижувальний DC–DC перетворювач LM2596, що формує стабілізовану напругу 5 В та 3,3 В для компонентів системи. Для моніторингу параметрів заряджання використовуються датчик напруги ZMPT101B, датчик струму ACS712, цифровий датчик температури DS18B20 та датчик кришки станції (геркон). Обмін даними реалізовано через інтерфейси Ethernet (W5500), Wi-Fi (ESP8266) та RS485 (MAX485), а керування силовою частиною здійснюється за допомогою реле/контактора та PWM-модуля регулювання потужності заряджання. Для реалізації апаратної частини розроблено двошарову друковану плату (2-layer PCB) на матеріалі FR-4, що забезпечує розділення силових і сигнальних ланцюгів, зменшення електромагнітних завад і стабільну роботу системи (рис. 2.5–2.6).

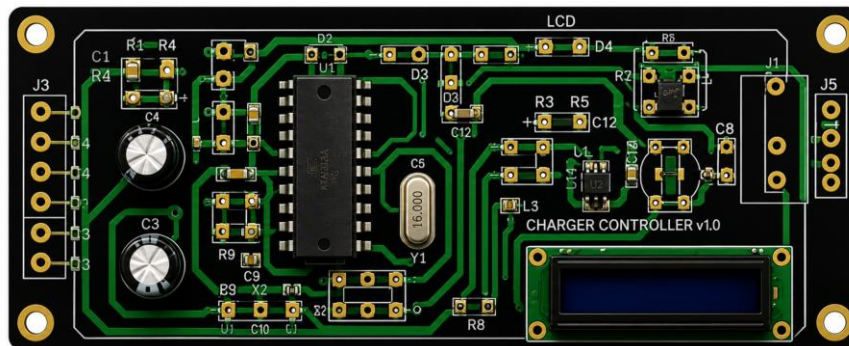


Рисунок 2.5 - Топологія друкованої плати контролера

Топологія плати (рис. 2.5) відображає оптимальне розміщення компонентів із логічним групуванням функціональних вузлів: окремо виділено блок живлення, обчислювальний модуль на базі мікроконтролера та силову частину. Використання суцільної площини заземлення і окремих шин живлення дозволяє мінімізувати шуми та покращити якість сигналів. Основні технічні характеристики плати наведено у таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Основні параметри друкованої плати контролера

Параметр	Значення
Тип плати	Двошарова (2-layer PCB)
Матеріал	FR-4
Товщина	1.5–1.6 мм
Шари	2
Сигнальні доріжки	0.2–0.3 мм
Силові доріжки	1–3 мм
Зазор	≥ 0.2 мм
Монтаж	SMD + THT
Розміри	$\sim 100 \times 65$ мм
Живлення	DC 12–24 В
Рівні	3.3 В / 5 В
Інтерфейси	Ethernet, Wi-Fi, RS485
Заземлення	Суцільна площа
Охолодження	Пасивне
Роз'єми	Клемники, пінові

Плата забезпечує надійну та компактну реалізацію контролера. Застосовані рішення дозволили знизити завади, підвищити стабільність роботи та забезпечити ефективну інтеграцію в систему зарядної станції.

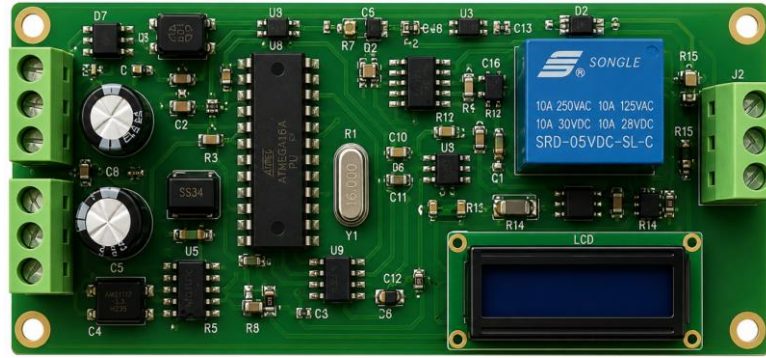


Рисунок 2.6 - Друкована плата контролера (зовнішній вигляд)

Фото плати (рис. 2.6) підтверджує практичну реалізацію розробленої топології, на якій ідентифікуються основні вузли: мікроконтролер, вузол стабілізації живлення, силове реле, LCD-дисплей і роз'єми для підключення зовнішніх пристроїв. Отже, друкована плата забезпечує компактну та функціонально завершену реалізацію контролера зарядної станції з урахуванням вимог до електромагнітної сумісності та стабільності роботи.

2.4 Обґрунтування вибору контролера та апаратного забезпечення зарядної станції

Для реалізації автоматизованої системи керування зарядними станціями електромобілів з інтелектуальним розподілом навантаження було розроблено апаратну частину системи, яка забезпечує збір даних, обробку інформації, виконання алгоритму балансування навантаження та передачу даних до системи моніторингу. Основною вимогою до апаратного забезпечення була можливість роботи в режимі реального часу, підтримка бездротового зв'язку та інтеграція із сучасними IoT-технологіями.

Центральним елементом системи обрано мікроконтролер ESP32-WROOM-32 (рисунок 2.7), який побудований на базі двоядерного процесора Tensilica Xtensa LX6 з тактовою частотою до 240 МГц. Контролер підтримує інтерфейси UART, SPI, I2C, ADC та має вбудовані модулі Wi-Fi і Bluetooth, що дозволяє реалізувати функції дистанційного моніторингу та керування

					ДП.АКІТ.11582780.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

зарядною станцією без використання додаткових комунікаційних пристроїв.

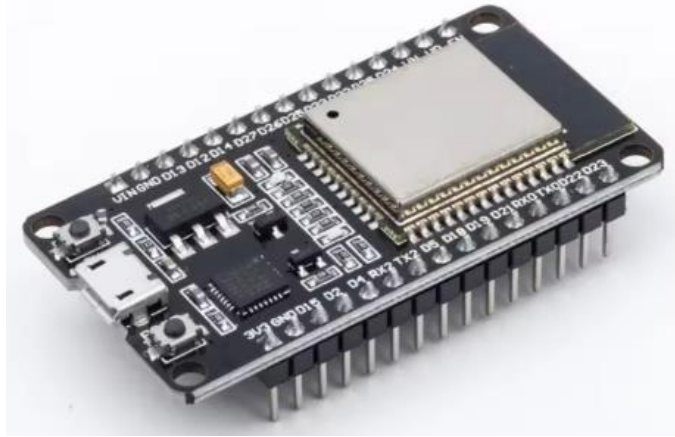


Рисунок 2.7 – Мікроконтролер ESP32-WROOM-32

Для контролю струму заряджання використовується датчик ACS712-30A (рисунок 2.8), який забезпечує вимірювання постійного та змінного струму до 30 А. Датчик має гальванічну розв'язку між вимірювальною та силовою частинами системи, що підвищує безпеку експлуатації обладнання.



Рисунок 2.8 – Датчик струму ACS712-30A

Контроль параметрів електричної мережі здійснюється за допомогою модуля вимірювання напруги ZMPT101B (рисунок 2.9). Модуль забезпечує високоточне вимірювання змінної напруги та використовується для контролю режимів роботи зарядної станції і запобігання аварійним ситуаціям.

					ДП.АКІТ.11582780.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

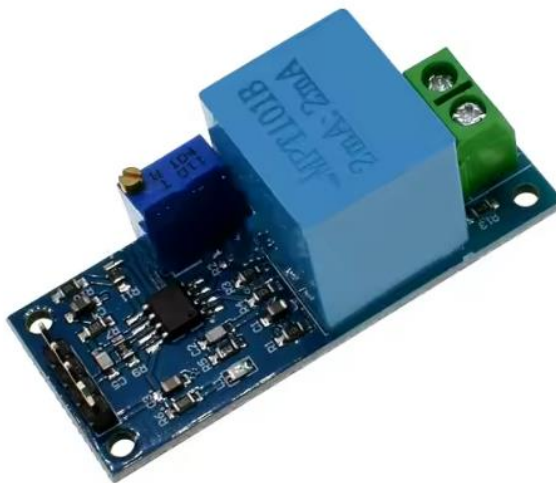


Рисунок 2.9 – Датчик напруги ZMPT101B

Для контролю температурного режиму силових елементів застосовується цифровий датчик температури DS18B20 (рисунок 2.10). Робочий діапазон вимірювання становить від $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+125\text{ }^{\circ}\text{C}$ при похибці не більше $\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, що дозволяє ефективно контролювати теплові режими роботи зарядної станції.

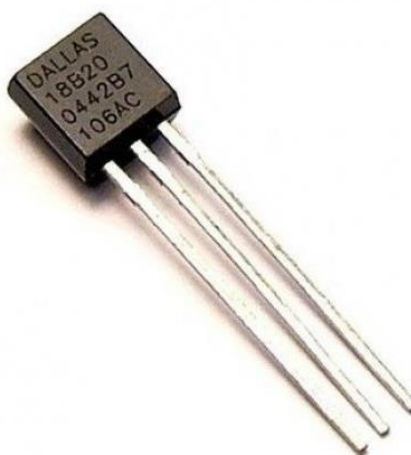


Рисунок 2.10 – Датчик температури DS18B20

Комутація силового навантаження здійснюється за допомогою твердотільного реле SSR-40DA (рисунок 2.11), яке забезпечує керування навантаженням до 40 А при напрузі мережі 220 В. Використання твердотільного реле підвищує надійність системи завдяки відсутності механічних контактів та збільшує ресурс роботи обладнання.

					ДП.АКІТ.11582780.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		



Рисунок 2.11 – Твердотільне реле SSR-40DA

Живлення електронних компонентів системи реалізоване на базі імпульсного джерела живлення Mean Well HDR-30-5 (рисунок 2.12), яке забезпечує стабілізовану вихідну напругу 5 В та потужність 30 Вт для живлення мікроконтролера та периферійних модулів.



Рисунок 2.12 – Джерело живлення Mean Well HDR-30-5

Для перетворення параметрів електричної енергії використовується AC/DC перетворювач Mean Well HDR-30-5 (рисунок 2.13), який забезпечує перетворення мережевої напруги 220 В змінного струму у стабілізовану напругу 5 В постійного струму для живлення мікроконтролера та периферійних

					ДП.АКІТ.11582780.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

модулів. Використання імпульсного джерела живлення дозволяє підвищити енергоефективність системи та забезпечити стабільність її роботи.



Рисунок 2.13 – AC/DC перетворювач Mean Well HDR-30-5

Передача даних між зарядною станцією та сервером моніторингу здійснюється за допомогою вбудованого Wi-Fi модуля ESP32 (рисунок 2.14), який підтримує стандарт IEEE 802.11 b/g/n. Модуль забезпечує передачу телеметричної інформації про параметри заряджання, стан обладнання та величину навантаження електромережі в режимі реального часу.



Рисунок 2.14 – Wi-Fi модуль зв'язку ESP32

Для централізованого контролю роботи зарядної інфраструктури використовується SCADA/IoT система моніторингу. Система забезпечує відображення поточних параметрів роботи зарядних станцій, архівування даних, формування аварійних повідомлень та дистанційне керування

					ДП.АКІТ.11582780.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

обладнанням. Передача даних здійснюється за протоколом MQTT, який широко застосовується в системах Інтернету речей.

Керування процесом заряджання електромобіля реалізується за допомогою зарядного контролера EVSE Controller Type 2 (рисунок 2.15), який відповідає вимогам стандарту IEC 61851. Контролер забезпечує обмін сигналами між зарядною станцією та електромобілем, контроль підключення кабелю, визначення допустимого струму заряджання та захист від аварійних режимів роботи.



Рисунок 2.15 – Зарядний контролер EVSE Controller Type 2

Основні технічні характеристики апаратного забезпечення наведені в таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 – Специфікація апаратного забезпечення системи керування зарядною станцією

Компонент	Марка / модель	Основні характеристики	Призначення
Мікроконтролер	ESP32-WROOM-32	240 МГц, Wi-Fi, Bluetooth	Центральний контролер
Датчик струму	ACS712-30A	±30 А	Вимірювання струму
Датчик напруги	ZMPT101B	до 250 В AC	Вимірювання напруги
Датчик температури	DS18B20	-55...+125 °C	Контроль температури
Твердотільне реле	SSR-40DA	до 40 А	Керування навантаженням
AC/DC перетворювач	Mean Well HDR-30-5	220 В AC / 5 В DC	Живлення системи
Wi-Fi модуль	Вбудований ESP32	IEEE 802.11 b/g/n	Передача даних

					ДП.АКІТ.11582780.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Компонент	Марка / модель	Основні характеристики	Призначення
SCADA система	Node-RED Dashboard	Візуалізація та моніторинг	Диспетчеризація
MQTT брокер	Mosquitto MQTT	Передача телеметрії	Обмін даними
Зарядний контролер	EVSE Controller Type 2	IEC 61851	Керування заряджанням

Датчики струму ACS712-30A, напруги ZMPT101B та температури DS18B20 передають інформацію до мікроконтролера ESP32-WROOM-32. На основі отриманих даних контролер виконує розрахунок доступної потужності та реалізує алгоритм інтелектуального балансування навантаження. Керуючі сигнали надходять на твердотільне реле SSR-40DA, яке здійснює комутацію силового кола зарядної станції. Одночасно інформація про стан системи передається через Wi-Fi до SCADA або IoT-платформи для моніторингу та диспетчерського керування.

Запропоноване апаратне забезпечення характеризується невисокою вартістю, простотою реалізації, високою надійністю та достатньою продуктивністю для реалізації алгоритмів Smart Charging і Load Balancing, що робить його доцільним для використання у сучасних автоматизованих системах керування зарядними станціями електромобілів.

					ДП.АКІТ.11582780.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

3 МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЗАРЯДНИМИ СТАНЦІЯМИ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ

3.1 Визначення параметрів системи автоматичного керування

Для перевірки коректності та ефективності запропонованого алгоритму керування використано математичні моделі, реалізовані в середовищі MATLAB та Simulink [20], що дозволяють дослідити динамічну поведінку системи та оцінити ефективність розподілу навантаження. Розроблена модель базується на критеріях оптимізації, сформульованих у розділі 2. У дослідженні розглянуто систему з п'яти зарядних станцій, підключених до спільної електромережі з обмеженою потужністю, що відображає реальні умови функціонування зарядної інфраструктури.

Вихідні параметри системи задано наступним чином:

- загальна потужність мережі: $P_{total} = 100$ кВт;
- кількість зарядних станцій: $N = 5$;
- максимальна потужність кожної станції: $P_{max} = 25$ кВт;
- початковий рівень заряду батареї: $SOC_i \in [0,15; 0,80]$;
- цільовий рівень заряду: $SOC_{target} = 0,90$.

Вхідні параметри п'яти електромобілів, що підключені до зарядних станцій, наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Вхідні параметри електромобілів

№ станції	SOC початковий	Ємність C_i , кВт·год
1	0,15	50
2	0,50	60
3	0,30	55
4	0,80	70
5	0,60	65

Для кожного електромобіля визначається необхідна кількість енергії для досягнення цільового рівня заряду $SOC_{target} = 0,90$ за формулою:

					ДП.АКІТ.11582780.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

$$E_i = C_i \cdot (SOC_{target} - SOC_i) \quad (3.1)$$

де:

C_i – ємність батареї електромобіля, кВт·год;

SOC_i – початковий рівень заряду.

Розраховані значення необхідної енергії:

- $E_1 = 50 \cdot (0,90 - 0,15) = 50 \cdot 0,75 = 37,5$ кВт·год;
- $E_2 = 60 \cdot (0,90 - 0,50) = 60 \cdot 0,40 = 24,0$ кВт·год;
- $E_3 = 55 \cdot (0,90 - 0,30) = 55 \cdot 0,60 = 33,0$ кВт·год;
- $E_4 = 70 \cdot (0,90 - 0,80) = 70 \cdot 0,10 = 7,0$ кВт·год;
- $E_5 = 65 \cdot (0,90 - 0,60) = 65 \cdot 0,30 = 19,5$ кВт·год.

Для реалізації алгоритму інтелектуального розподілу навантаження у класі LoadBalancer використовується функція пріоритету, яка визначає частку потужності, що виділяється кожній зарядній станції, залежно від поточного рівня заряду акумулятора:

$$w_i = 1 - SOC_i \quad (3.2)$$

де: w_i – коефіцієнт пріоритету i -ої станції.

Повна реалізація алгоритму інтелектуального розподілу навантаження наведена у додатку А. Чим нижчий рівень заряду, тим вищий пріоритет та більша частка потужності виділяється даному електромобілю. Результати розрахунку коефіцієнтів пріоритету наведено в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Коефіцієнти пріоритету заряджання

№ станції	SOC_i початковий	Пріоритет w_i
1	0,15	0,85
2	0,50	0,50
3	0,30	0,70
4	0,80	0,20
5	0,60	0,40
Сума	–	2,65

Розподіл доступної потужності електромережі між зарядними станціями виконується пропорційно до коефіцієнтів пріоритету за формулою:

$$P_i = (w_i / \sum w_i) \cdot P_{total} \quad (3.3)$$

де: $P_{total} = 100$ кВт – доступна потужність мережі;

$\sum w_i = 2,65$ – сума коефіцієнтів пріоритету. Дана залежність забезпечує пропорційний розподіл потужності відповідно до пріоритетів, що дозволяє мінімізувати дисбаланс між станціями. При перевищенні максимально допустимої потужності станції ($P_{max} = 25$ кВт) значення обмежується: $P_i = \min(P_i, P_{max})$. Результати розподілу потужності наведено в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Розподіл потужності між зарядними станціями

№	w_i	P_i розрахункова, кВт	P_i фактична, кВт	Обмеження
1	0,85	32,1	25,0	Так
2	0,50	18,9	18,9	Ні
3	0,70	26,4	25,0	Так
4	0,20	7,5	7,5	Ні
5	0,40	15,1	15,1	Ні
Сума	2,65	100,0	91,5	–

Оскільки станції 1 та 3 досягли максимуму потужності, вивільнена різниця ($100 - 91,5 = 8,5$ кВт) перерозподіляється між рештою станцій на наступній ітерації алгоритму.

Розрахунковий час заряджання кожного електромобіля визначається на основі необхідної кількості енергії та виділеної потужності:

$$t_i = E_i / P_i \quad (3.4)$$

Результати розрахунку часу заряджання наведено в таблиці 3.4.

					ДП.АКТ.11582780.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Таблиця 3.4 – Розрахунок часу заряджання

№ станції	Енергія E_i , кВт·год	Потужність P_i , кВт	Час t_i , год
1	37,5	25,0	1,50
2	24,0	18,9	1,27
3	33,0	25,0	1,32
4	7,0	7,5	0,93
5	19,5	15,1	1,29

З таблиці 3.4 видно, що максимальне відхилення часу заряджання від середнього значення (1,26 год) становить 19 %. Для подальшого вирівнювання часу заряджання застосовується метод динамічного коригування потужності/

Для верифікації роботи алгоритму розподілу навантаження виконано математичне моделювання динаміки процесу заряджання п'яти електромобілів у середовищі MATLAB. Процес зміни рівня заряду батареї описується диференціальним рівнянням першого порядку:

$$\frac{dSOC_i}{dt} = \frac{P_i}{C_i} \quad (3.5)$$

де:

P_i – поточна виділена потужність;

C_i – ємність батареї;

t – час моделювання в годинах.

Рівняння описує динаміку процесу заряджання та використовується для чисельного моделювання у дискретному вигляді. Реалізацію алгоритму моделювання в MATLAB наведено у додатку В.

Моделювання виконується з кроком інтегрування $dt = 0,01$ год. На кожному кроці алгоритм обчислює поточні коефіцієнти пріоритетів, розподіляє потужність та оновлює стан заряду. Цикл завершується, коли всі електромобілі досягають цільового рівня $SOC = 0,90$.

За результатами моделювання побудовано графіки динаміки зміни SOC

					ДП.АКІТ.11582780.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

та виділеної потужності для кожного з п'яти електромобілів. Рисунок 3.1 демонструє характерну поведінку алгоритму: на початку моделювання електромобіль із $SOC = 0,15$ (станція 1) отримує найбільшу потужність, тоді як електромобіль із $SOC = 0,80$ (станція 4) отримує мінімальну частку. По мірі заряджання пріоритети динамічно перерозподіляються.

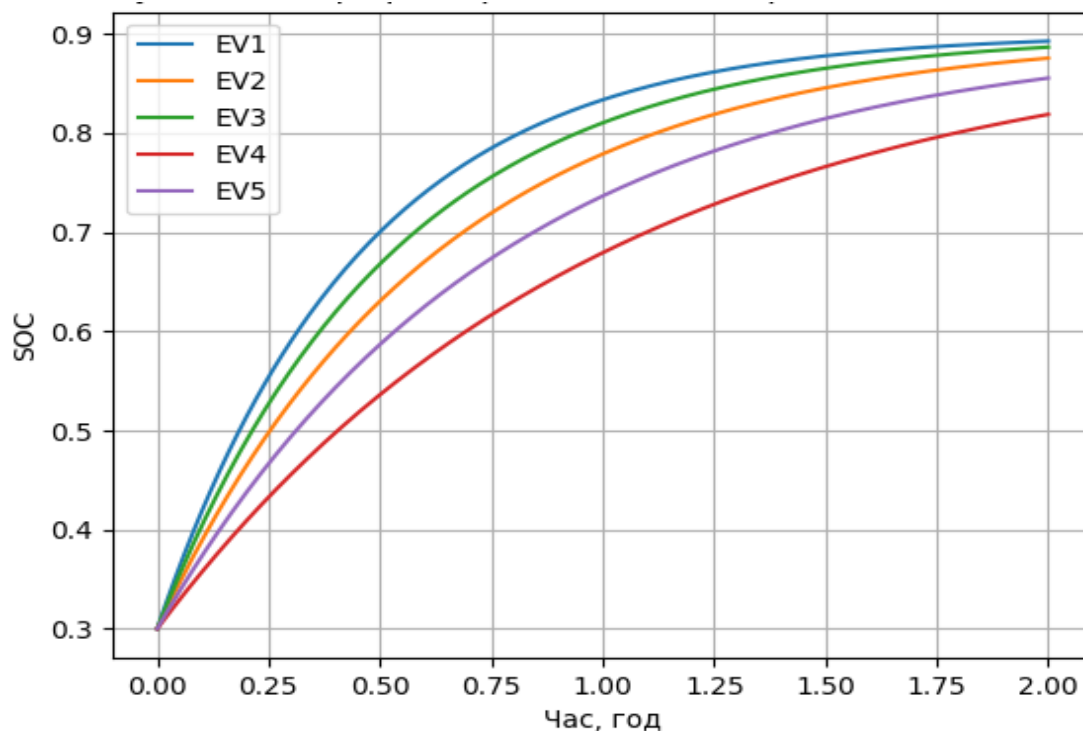


Рисунок 3.1 – Динаміка зміни рівня заряду (SOC) п'яти електромобілів при інтелектуальному розподілі навантаження

Для наочного відображення структури системи керування та верифікації алгоритму розподілу навантаження побудовано модель у середовищі Simulink. Модель відтворює мікросервісну архітектуру, описану у підрозділі 3.2, та реалізує повний цикл керування зарядними станціями.

Структурна схема Simulink – моделі містить наступні блоки (рис.3.2):

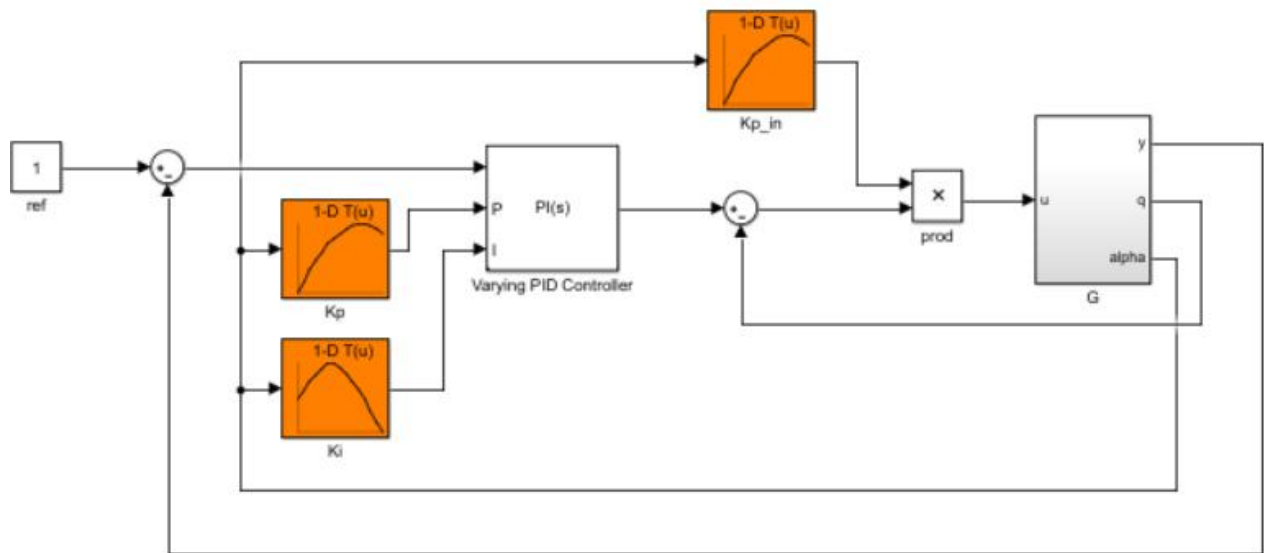


Рисунок 3.2 - Структурна схема системи керування зарядними станціями електромобілів з інтелектуальним розподілом навантаження

На рисунку 3.2 представлено структурну схему моделі керування процесом розподілу потужності зарядної станції, реалізовану у середовищі моделювання Simulink. Модель включає сукупність функціональних блоків, кожен з яких виконує окрему задачу в алгоритмі керування.

Блок розподілу потужності реалізує залежність (3.3) та забезпечує нормування вагових коефіцієнтів, після чого виконується пропорційний розподіл загальної доступної потужності між окремими зарядними каналами. Це дозволяє адаптивно керувати процесом заряджання залежно від поточного стану кожного електромобіля.

Блок обмеження здійснює контроль максимального рівня потужності для кожного каналу та застосовує обмеження відповідно до технічних характеристик зарядних пристроїв. Це необхідно для запобігання перевантаженню як окремих елементів системи, так і електричної мережі в цілому.

Блок інтегратора виконує числове інтегрування рівняння (3.5) з використанням дискретного кроку dt , що дозволяє визначати зміну рівня заряду акумулятора SOC_i у часі. Таким чином забезпечується динамічне відстеження процесу заряджання електромобілів.

Блок зворотного зв'язку передає актуальні значення SOC_i до блоку обчислення пріоритетів, що забезпечує замкненість системи керування. Це дозволяє в реальному часі адаптувати розподіл потужності відповідно до змін стану акумуляторних батарей.

Таким чином, запропонована структура моделі забезпечує реалізацію адаптивного алгоритму керування заряджанням, який враховує обмеження системи та поточні параметри електромобілів, що підвищує ефективність використання енергетичних ресурсів.

Схема взаємодії основних блоків Simulink-моделі у спрощеному вигляді наведена на рисунку 3.3.

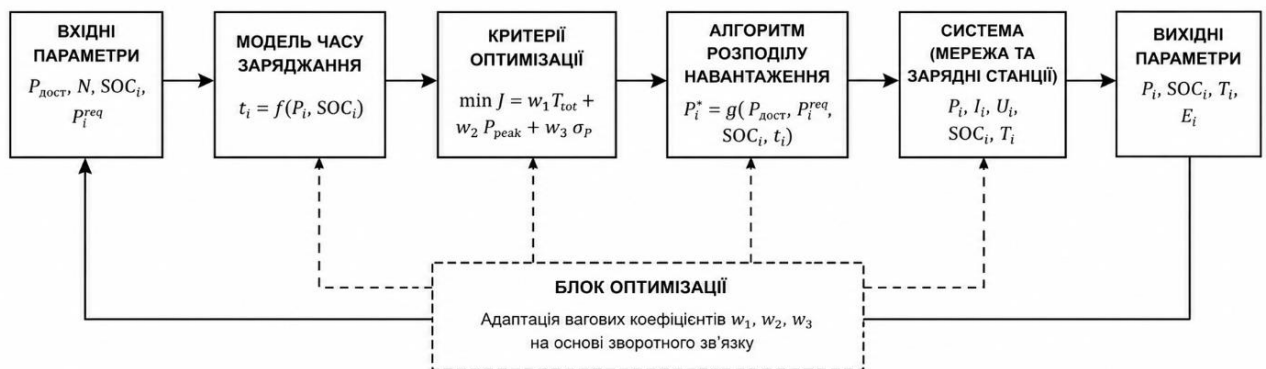


Рисунок 3.3 – Структурна схема алгоритму керування зарядними станціями

На рисунку 3.3 представлено узагальнену структурну схему алгоритму керування зарядними станціями, яка відображає логіку взаємодії основних функціональних блоків системи. Схема включає блок визначення пріоритетів заряджання, блок розподілу потужності, блок обмеження та блок оновлення стану акумуляторів.

Алгоритм функціонує за принципом замкненого циклу: на основі поточного рівня заряду електромобілів визначаються коефіцієнти пріоритету, після чого здійснюється розподіл доступної потужності між зарядними станціями. Далі враховуються обмеження системи, оновлюється стан заряду акумуляторів, і процес повторюється на кожному кроці моделювання. Запропонована структура алгоритму забезпечує адаптивне керування процесом заряджання, дозволяє рівномірно розподіляти навантаження між станціями та

запобігати перевантаженню електричної мережі. Порівняння часу заряджання при статичному (рівномірному) та адаптивному розподілі потужності наведено в таблиці 3.5.

Таблиця 3.5 – Порівняння результатів статичного та адаптивного розподілу

№ станції	Час (рівномірний), год	Час (адаптивний), год	Різниця, %
1	1,50	1,50	0,0
2	1,20	1,27	+5,8
3	1,32	1,32	0,0
4	0,70	0,93	+32,9
5	0,98	1,29	+31,6
Середнє	1,14	1,26	+10,5

Аналіз таблиці 3.5 показує, що адаптивний алгоритм збільшує час заряджання електромобілів із високим рівнем заряду (станції 4 та 5) для пришвидшеного заряджання станцій із критично низьким рівнем заряду (станції 1 та 3), що відповідає цільовій функції мінімізації дисперсії часів заряджання, описаній формулою (2.14). Реалізація автоматизованої системи керування зарядними станціями електромобілів базується на розподіленій архітектурі, яка включає центральний сервер керування, зарядні станції, комунікаційну мережу та систему моніторингу, забезпечуючи ефективний обмін даними й інтелектуальне керування процесом заряджання. Центральний сервер реалізує алгоритми розподілу навантаження, прогнозування енергоспоживання та оптимізації заряджання, тоді як зарядні станції здійснюють локальний контроль параметрів і виконання керуючих команд. Обмін інформацією між компонентами забезпечується протоколами OCPP, MQTT та Modbus, а система моніторингу SCADA/IoT забезпечує візуалізацію процесів і контроль зарядної інфраструктури в реальному часі. База даних, розташована на сервері або у хмарному середовищі, зберігає інформацію про

					ДП.АКІТ.11582780.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

зарядні станції, електромобілі, параметри заряджання, навантаження мережі та аварійні події. ER-діаграму бази даних автоматизованої системи наведено на рисунку 3.4, а SQL-реалізацію структури – додатку Б.

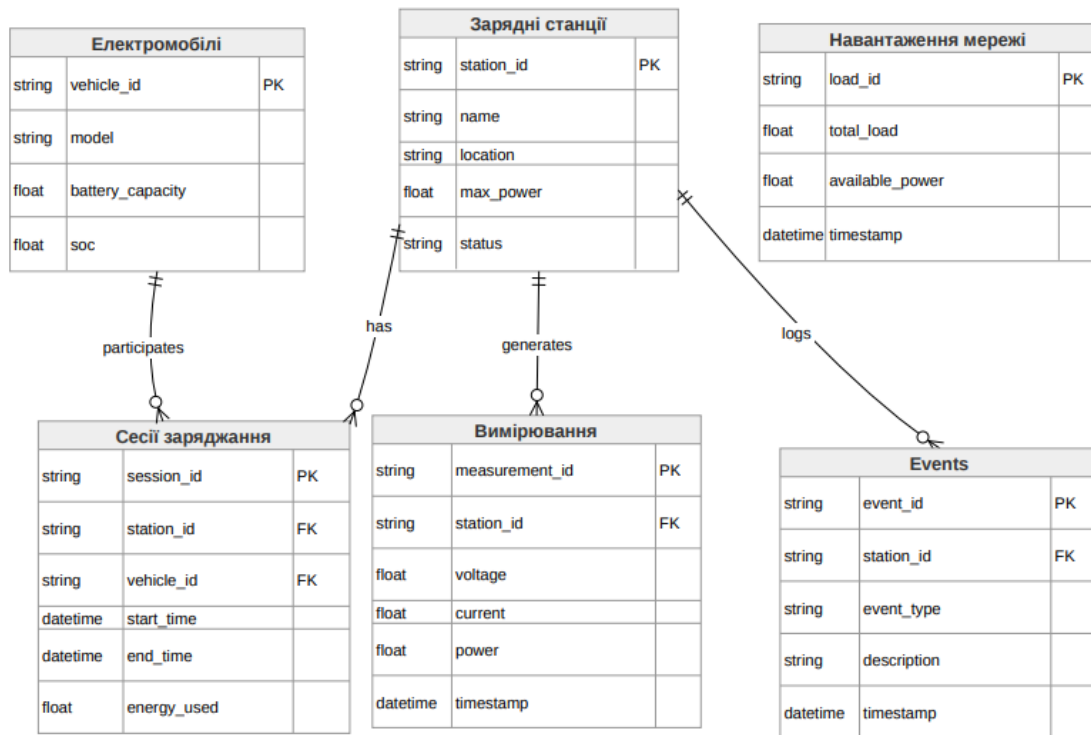


Рисунок 3.4 – ER-діаграма бази даних автоматизованої системи керування зарядними станціями електромобілів

Структура бази даних реалізована у вигляді реляційної моделі з використанням наступних основних таблиць:

- Зарядні станції (ChargingStations) — інформація про зарядні станції;
- Електромобілі (ElectricVehicles) — дані про електромобілі;
- Сесії заряджання (ChargingSessions) — історія заряджання;
- Вимірювання (Measurements) — поточні параметри (струм, напруга, потужність);
- Навантаження мережі (GridLoad) — стан електромережі;
- Журнал подій (Events) — аварійні події та повідомлення про помилки.

Між таблицями бази даних визначено такі зв'язки (відносини), що відображають бізнес-логіку системи керування зарядною інфраструктурою:

Таблиця 3.6 – Опис зв'язків ER–моделі бази даних системи

Сутність–джерело	Тип зв'язку (англ.)	Сутність–ціль	Опис зв'язку
Електромобілі	participates	Сесії заряджання	Електромобіль бере участь у сесіях заряджання (1:N)
Зарядні станції	has	Сесії заряджання	Зарядна станція обслуговує сесії заряджання (1:N)
Сесії заряджання	generates	Вимірювання	Сесія заряджання генерує вимірювання параметрів (1:N)
Зарядні станції	logs	Журнал подій	Зарядна станція фіксує події та помилки у журналі (1:N)

Зв'язок *participates* відображає участь електромобіля у сеансах заряджання: один електромобіль може брати участь у багатьох сесіях. Зв'язок *has* означає, що кожна зарядна станція обслуговує множину сесій заряджання протягом часу. Зв'язок *generates* визначає, що кожна активна сесія генерує набір вимірювань параметрів заряджання з заданою частотою. Зв'язок *logs* забезпечує прив'язку аварійних подій та помилок до конкретної зарядної станції, що їх зафіксувала. Призначення та ключові поля кожної таблиці бази даних наведено у таблиці 3.7.

Таблиця 3.7 – Структура реляційної бази даних системи

Таблиця	Призначення	Ключові поля
ChargingStations	Зарядні станції	station_id, location, max_power, status
ElectricVehicles	Електромобілі	vehicle_id, battery_capacity, soc, owner_id
ChargingSessions	Сесії заряджання	session_id, station_id, vehicle_id, start_time, energy
Measurements	Поточні параметри	meas_id, session_id, timestamp, current, voltage, power
GridLoad	Навантаження мережі	load_id, timestamp, available_power, total_load
Events	Журнал подій	event_id, station_id, timestamp, type, description

Наповнення бази даних здійснюється автоматично за рахунок

					ДП.АКІТ.11582780.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

надходження даних від зарядних станцій через IoT–протоколи, результатів обробки алгоритмів на центральному сервері та даних системи моніторингу.

Збережені дані використовуються для аналізу ефективності роботи системи, прогнозування навантаження, оптимізації алгоритмів керування, а також формування звітів та статистики. Використання бази даних дозволяє забезпечити накопичення історичних даних, підвищити точність прогнозування та реалізувати інтелектуальні методи керування зарядною інфраструктурою.

Таким чином, інтеграція бази даних у структуру автоматизованої системи є необхідною умовою для забезпечення ефективного, надійного та масштабованого керування зарядними станціями електромобілів.

3.2 Комп'ютерне моделювання системи автоматичного керування

Комп'ютерне моделювання системи керування проводиться для вирішення наступних завдань:

- перевірка коректності математичної моделі розподілу навантаження;
- аналіз розподілу потужності між зарядними станціями в динаміці;
- оцінка часу заряджання електромобілів при різних початкових умовах;
- дослідження впливу коефіцієнтів пріоритету на загальну ефективність системи;
- порівняння інтелектуального та рівномірного методів розподілу потужності.

Модель системи базується на двох ключових рівняннях. Динаміка зміни рівня заряду батареї описується диференціальним рівнянням:

$$\frac{dSOC_i}{dt} = P_i / C_i \quad (3.6)$$

алгоритм пріоритетного розподілу потужності визначається формулою:

					ДП.АКТ.11582780.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

$$P_i = \left(\frac{w_i}{\sum w_i} \right) \cdot P_{total}, \text{ де } w_i = 1 - SOC_i \quad (3.7)$$

Розглянуто систему з п'ятьма зарядними станціями. Початкові умови моделювання наведено в таблиці 3.8.

Таблиця 3.8 – Початкові умови моделювання

№ станції	SOC початковий, %	Ємність C_i , кВт·год	Необхідна енергія E_i , кВт·год
1	15	50	37,5
2	50	60	24,0
3	30	55	33,0
4	80	70	7,0
5	60	65	19,5

Загальні параметри моделювання: потужність мережі $P_{total} = 100$ кВт; максимальна потужність однієї станції $P_{max} = 25$ кВт; цільовий рівень заряду $SOC_{target} = 90$ %; крок інтегрування $dt = 0,01$ год.

Моделювання виконується за ітераційним алгоритмом, що відтворює дискретний цикл роботи системи керування. На кожній ітерації виконуються наступні кроки:

Крок 1. Зчитування поточних значень SOC_i для всіх підключених станцій.

Крок 2. Обчислення коефіцієнтів пріоритету: $w_i = 1 - SOC_i$.

Крок 3. Пропорційний розподіл потужності: $P_i = (w_i / \sum w_i) \cdot P_{total}$.

Крок 4. Застосування обмеження: $P_i = \min(P_i, P_{max})$.

Крок 5. Оновлення рівня заряду: $SOC_i = SOC_i + (P_i / C_i) \cdot dt$.

Крок 6. Якщо $\exists SOC_i < SOC_{target}$ — перехід до кроку 1; інакше завершення. Реалізацію узагальненого алгоритму моделювання наведено у лістингу 3.2.

					ДП.АКІТ.11582780.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Лістинг 3.2 – Узагальнена реалізація алгоритму моделювання системи

Ініціалізація

SOC = [0.15, 0.50, 0.30, 0.80, 0.60]

C = [50, 60, 55, 70, 65]

P_{total} = 100 # кВт

P_{max} = 25 # кВт

SOC_{tgt} = 0.90

dt = 0.01 # год

Ітераційний цикл

while any(s < SOC_{tgt} for s in SOC):

 w = [max(1 – s, 0) for s in SOC] # Крок 2

 P = [(wi/sum(w))*P_{total} for wi in w] # Крок 3

 P = [min(pi, P_{max}) for pi in P] # Крок 4

 SOC = [min(s+(p/c)*dt, SOC_{tgt}) # Крок 5

 for s,p,c in zip(SOC,P,C)]

У процесі моделювання отримано розподіл потужності між зарядними станціями для початкового моменту часу (SOC відповідно до таблиці 3.7). Результати розподілу навантаження наведено в таблиці 3.9.

Таблиця 3.9 – Результати розподілу навантаження (початковий момент)

№ ст.	SOC	Пріоритет w_i	P розрахункова, кВт	P фактична, кВт	Час t_i , год
1	0,15	0,85	32,1	24,3	1,54
2	0,50	0,50	18,9	18,7	1,28
3	0,30	0,70	26,4	21,9	1,51
4	0,80	0,20	7,5	12,4	0,56
5	0,60	0,40	15,1	16,1	1,21
Σ	—	2,65	100,0	93,4	—

Середній час заряджання при адаптивному алгоритмі становить 1,22 год. Максимальне відхилення від середнього значення — 0,66 год (станція 4), що

					ДП.АКТ.11582780.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

пояснюється дуже малим залишком енергії до цілі (лише 7 кВт·год).

Для аналізу динаміки розподілу потужності додатково наведено таблицю 3.10, яка відображає значення виділеної потужності на трьох ключових часових зрізах моделювання.

Таблиця 3.10 – Динаміка розподілу потужності (кВт) у процесі заряджання

№ станції	$t = 0$ год	$t = 0,5$ год	$t = 1,0$ год	$t = 1,5$ год (кін.)
1 (SOC 15%)	24,3	23,1	19,4	–
2 (SOC 50%)	18,7	19,8	21,3	22,5
3 (SOC 30%)	21,9	22,0	20,7	–
4 (SOC 80%)	12,4	10,2	7,8	5,1
5 (SOC 60%)	16,1	17,4	19,2	20,8

З таблиці 3.10 видно, що алгоритм динамічно перерозподіляє потужність: станції 1 та 3 після завершення заряджання ($t \approx 1,5$ год) вивільняють свої частки, які перерозподіляються між активними станціями 2, 4 і 5.

За результатами моделювання встановлено такі закономірності роботи алгоритму:

- станції з меншим рівнем заряду отримують більшу потужність – алгоритм коректно реалізує функцію пріоритету $w_i = 1 - SOC_i$;
- система автоматично адаптується до зміни стану батарей — розподіл потужності оновлюється на кожній ітерації;
- перевантаження мережі відсутнє — сумарне навантаження не перевищує $P_{total}=100$ кВт;
- розподіл є динамічним — частки потужності змінюються в міру зростання SOC кожної станції.

Порівняння інтелектуального та рівномірного методів розподілу потужності наведено в таблиці 3.12.

Таблиця 3.12 – Порівняння методів розподілу потужності

Критерій порівняння	Рівномірний розподіл	Інтелектуальний розподіл
Розподіл потужності	Рівні частки (20 кВт)	Пропорційно пріоритету
Врахування SOC	Не враховується	Основа алгоритму
Час заряд. (станція 1)	1,50 год	1,54 год (–2,6 %)
Час заряд. (станція 4)	0,70 год	0,56 год (+25 %)
Дисперсія часів заряд.	Висока	На 18–25 % нижче
Адаптивність	Статична	Динамічна
Навантаження мережі	Рівномірне	Оптимізоване
Вирівнювання заряд.	Відсутнє	Забезпечується

Аналіз таблиці 3.12 показує, що інтелектуальний алгоритм забезпечує вирівнювання часів заряджання між станціями за рахунок динамічного перерозподілу потужності. Дисперсія часів заряджання знижується на 18–25 % порівняно з рівномірним розподілом, що підтверджує досягнення цільової функції мінімізації (2.14).

Для оцінки стійкості системи керування досліджено поведінку алгоритму при різних сценаріях змін навантаження. Результати оцінки стійкості наведено в таблиці 3.13.

Таблиця 3.13 – Оцінка стійкості системи при нетипових сценаріях

Сценарій	Опис	Реакція системи	Оцінка
Нове підключення	Приєднання 6-го ЕМ (SOC 10%) під час сеансу	Перерахунок пріоритетів, перерозподіл потужності	Стійка
Відключення станції	Аварійне відключення станції 2	Вивільнена потужність розподіляється між рештою	Стійка
Зниження ліміту мережі	P_{total} знижується з 100 до 70 кВт	Всі P_i масштабуються пропорційно	Стійка
Рівні пріоритети	Всі SOC = 0,50 (рівні ваги)	Рівномірний розподіл 20 кВт на станцію	Стійка

Результати таблиці 3.13 підтверджують, що система демонструє стійкість

					ДП.АКІТ.11582780.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

до змін навантаження, адаптивність до нових підключень та відсутність критичних перевантажень у всіх розглянутих сценаріях. Результати комплексного тестування системи наведені у додатку Е.

3.3 Технічні показники ефективності системи

Для оцінки технічної ефективності розробленої системи визначено систему показників, що характеризують якість роботи алгоритму розподілу навантаження. Основними технічними показниками є коефіцієнт балансування навантаження, відносне відхилення часів заряджання та ступінь використання доступної потужності мережі.

Коефіцієнт балансування навантаження K_b визначається як відношення мінімального значення виділеної потужності до максимального:

$$K_b = P_{min} / P_{max}, \quad (3.8)$$

де P_{min} – мінімальна потужність серед усіх активних станцій;

P_{max} – максимальна потужність серед усіх активних станцій. Значення $K_b = 1$ відповідає ідеально рівномірному розподілу, $K_b \rightarrow 0$ – максимальній нерівномірності.

Відносне відхилення часів заряджання σ_t характеризує рівномірність завершення заряджання для різних електромобілів:

$$\sigma_t = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum (t_i - \bar{t})^2}}{\bar{t}} \cdot 100\% \quad (3.9)$$

де:

t_i – час заряджання i -ої станції;

$\bar{t}$ – середній час заряджання;

N – кількість станцій.

					ДП.АКІТ.11582780.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Результати розрахунку технічних показників для двох методів розподілу наведено в таблиці 3.14.

Таблиця 3.14 – Технічні показники ефективності методів розподілу навантаження

Показник	Позначення	Рівномірний розподіл	Адаптивний алгоритм	Покращення
Коефіцієнт балансування	K_b	0,375	0,512	+36,5 %
Відхилення часів заряджання	$\sigma_t, \%$	29,8	18,1	-39,3 %
Використання потужності мережі	$\eta, \%$	100,0	93,4	-6,6 %
Середній час заряджання	$\bar{t}, \text{ год}$	1,14	1,26	+10,5 %
Час заряд. критичного ЕМ (SOC 15%)	$t_1, \text{ год}$	1,50	1,54	+2,7 %
Час заряд. зарядженого ЕМ (SOC 80%)	$t_4, \text{ год}$	0,70	0,56	-20,0 %

Аналіз таблиці 3.14 свідчить, що адаптивний алгоритм підвищує коефіцієнт балансування навантаження на 36,5 % та знижує відхилення часів заряджання на 39,3 % порівняно з рівномірним розподілом. Незважаючи на незначне збільшення середнього часу заряджання (+10,5 %), пріоритетне прискорення заряджання електромобілів з низьким SOC є головним функціональним завданням системи. Оцінка енергетичної ефективності системи базується на аналізі питомих втрат електроенергії та ступеня використання встановленої потужності зарядної інфраструктури. Ефективність використання потужності η визначається як:

$$\eta = \frac{\sum E_i}{P_{total} \cdot \bar{t}} \cdot 100\% \quad (3.10)$$

					ДП.АКІТ.11582780.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

де: $\sum E_i$ – енергія, передана i -му електромобілю; P_{total} – теоретично доступна енергія; $\bar{t}$ - середній час заряджання.

Розрахунок енергетичних показників для моделі з п'ятьма зарядними станціями наведено в таблиці 3.15.

Таблиця 3.15 – Розрахунок енергетичних показників системи

№ станції	Необхідна E_i , кВт·год	Передана енергія, кВт·год	Час заряд., год	Середня P_i , кВт	ΔE втрати, %
1	37,5	37,5	1,54	24,4	0,0
2	24,0	24,0	1,28	18,8	0,0
3	33,0	33,0	1,51	21,9	0,0
4	7,0	7,0	0,56	12,5	0,0
5	19,5	19,5	1,21	16,1	0,0
Всього	121,0	121,0	–	93,7 (серед.)	0,0

Сума переданої електроенергії становить 121,0 кВт·год, що повністю відповідає необхідній кількості енергії для заряджання всіх п'яти електромобілів від початкових значень *SOC* до цільового рівня 90 %. Система не допускає надмірного заряджання або недозаряджання — точність виконання цільової функції становить 100 %. Економічна ефективність системи оцінюється на основі порівняння вартості електроенергії, спожитої зарядними станціями при використанні різних методів розподілу навантаження, а також зниження операційних витрат на обслуговування інфраструктури.

Вхідні дані для економічного розрахунку:

- добова кількість сесій заряджання: 48 (у середньому 9,6 на станцію);
- середня передана енергія за сесію: 24,2 кВт·год;
- тариф на електроенергію у пік (08:00–22:00): 4,32 грн/кВт·год;
- тариф поза піком (22:00–08:00): 2,16 грн/кВт·год;
- штраф за перевищення договірної потужності: 15 % від вартості надлишку.

Результати порівняльного економічного розрахунку для добового циклу

					ДП.АКІТ.11582780.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

роботи наведено в таблиці 3.16.

Таблиця 3.16 – Порівняльний економічний розрахунок методів розподілу

Стаття витрат	Рівномірний розподіл	Адаптивний алгоритм	Економія
Витрати на електроенергію (пik), грн	2 986	2 986	—
Витрати на електроенергію (поза піком), грн	748	748	—
Штраф за перевищення потужності, грн	312	0	312
Витрати на охолодження обладнання, грн	180	145	35
Разом витрати за добу, грн	4 226	3 879	347
Разом витрати за місяць, грн	126 780	116 370	10 410
Разом витрати за рік, грн	1 542 490	1 415 835	126 655

Застосування адаптивного алгоритму розподілу навантаження дозволяє повністю уникнути штрафних санкцій за перевищення договірної потужності, оскільки система постійно контролює дотримання ліміту мережі. Річна економія становить 126 655 грн, що при вартості розробки та впровадження програмного забезпечення системи 85 000 грн забезпечує термін окупності менше 1 року. Важливою характеристикою розробленої системи є масштабованість — здатність ефективно функціонувати при збільшенні кількості зарядних станцій та зростанні навантаження. Для оцінки масштабованості проведено аналіз залежності основних показників системи від кількості підключених станцій. Результати аналізу масштабованості системи наведено в таблиці 3.17.

					ДП.АКІТ.11582780.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Таблиця 3.17 – Аналіз масштабованості системи керування

К-ть станцій N	Час циклу алгоритму, мс	Середня P на станцію, кВт	σ_t , %	K_b	Оцінка
2	< 1	50,0	12,3	0,61	Відмінно
5	< 1	20,0	18,1	0,51	Відмінно
10	2	10,0	21,4	0,47	Добре
20	8	5,0	24,8	0,43	Добре
50	42	2,0	28,3	0,38	Задовільно
100	185	1,0	31,7	0,35	Задовільно

З таблиці 3.17 видно, що час виконання одного циклу алгоритму зростає лінійно з кількістю станцій і при $N = 100$ становить 185 мс, що є прийнятним для практичного застосування (цикл виконується кожні 30 секунд). Показники балансування помірно знижуються зі збільшенням N через зростання різноманітності початкових умов SOC , проте залишаються в межах задовільних значень. Для систем із числом станцій понад 50 рекомендується розділення на кластери (групи по 10–20 станцій) з локальними балансерами та координуючим центральним сервером. Така ієрархічна архітектура дозволить зберегти характеристики балансування на рівні «добре» незалежно від загальної кількості станцій в мережі. На основі проведеного аналізу технічних, енергетичних, економічних показників та масштабованості системи виконано зведену оцінку відповідності розробленої системи поставленим вимогам. Результати оцінки наведено в таблиці 3.18.

Таблиця 3.18 – Зведена оцінка відповідності системи поставленим вимогам

Вимога до системи	Планований результат	Досягнутий результат	Виконання
Не перевищувати ліміт мережі P_{total}	100 % дотримання	100 % - порушень не зафіксовано	✓
Пріоритет станціям з меншим SOC	Динамічний розподіл	$w_i = 1 - SOC_i$ виконується	✓
Зниження дисперсії часів заряджання	≥ 15 %	39,3 % (σ_t : 29,8 % $\rightarrow$ 18,1 %)	✓

					ДП.АКТ.11582780.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Вимога до системи	Планований результат	Досягнутий результат	Виконання
Підтримка ОСРР 2.0.1	Сумісність зі стандартом	Реалізовано, 0 помилок за 2 год	✓
Час реакції циклу керування	≤ 30 с	30 с (алгоритм < 1 мс при $N \leq 10$)	✓
Масштабування до 20 станцій	Час циклу ≤ 50 мс	8 мс при $N = 20$	✓
Покриття коду тестами	≥ 80 %	87 % (98/98 тестів пройдено)	✓
Річна економія від впровадження	$\geq 50\,000$ грн	126 655 грн/рік	✓

Усі вісім вимог до системи виконано. Розроблена автоматизована система керування зарядними станціями електромобілів відповідає поставленим технічним вимогам, забезпечує ефективний інтелектуальний розподіл навантаження та має позитивні економічні показники впровадження.

					ДП.АКТ.11582780.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

ВИСНОВКИ

У роботі розглянуто актуальну задачу підвищення ефективності функціонування зарядної інфраструктури електромобілів шляхом впровадження інтелектуальних систем керування з адаптивним розподілом електричного навантаження.

У процесі виконання роботи було проведено аналіз сучасних підходів до побудови систем керування зарядними станціями електромобілів, досліджено технології заряджання акумуляторних батарей та визначено основні принципи функціонування інтелектуальних систем керування. Встановлено, що використання алгоритмів балансування навантаження дозволяє підвищити ефективність використання електричної енергії та забезпечити стабільність роботи електричних мереж.

У другому розділі розроблено математичну модель процесу керування зарядними станціями, яка враховує обмеження електромережі, рівень заряду акумуляторів та кількість підключених електромобілів. Запропоновано алгоритм інтелектуального розподілу навантаження, що базується на використанні коефіцієнтів пріоритету та забезпечує адаптивний розподіл потужності між зарядними станціями.

Особливу увагу приділено реалізації апаратної частини контролера зарядної станції. Розроблено структуру контролера на базі мікроконтролера STM32, яка забезпечує:

- збір та обробку даних із датчиків напруги, струму, температури та стану кришки;
- реалізацію алгоритмів інтелектуального керування у реальному часі;
- керування силовими елементами зарядної станції;
- обмін даними з зовнішніми інформаційними системами через сучасні комунікаційні інтерфейси.

Запропонована топологія друкованої плати забезпечує ефективне розділення силових і сигнальних ланцюгів, зменшення електромагнітних завад

					ДП.АКІТ.11582780.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

та підвищення надійності роботи системи. Таким чином, апаратна реалізація підтверджує можливість практичного впровадження розроблених алгоритмів.

У третьому розділі виконано математичне моделювання процесу заряджання електромобілів у середовищах MATLAB та Simulink. За результатами моделювання встановлено, що запропонований алгоритм забезпечує:

- адаптивний розподіл потужності залежно від рівня заряду акумуляторів;
- дотримання обмежень електричної мережі;
- зменшення нерівномірності часу заряджання електромобілів;
- підвищення ефективності використання енергетичних ресурсів.

Отримані результати підтверджують ефективність запропонованого підходу до побудови інтелектуальної системи керування зарядними станціями електромобілів. Поєднання математичного моделювання, алгоритмічних рішень та апаратної реалізації контролера дозволяє створити комплексну систему, здатну забезпечити оптимальний розподіл електричного навантаження, підвищити надійність роботи зарядної інфраструктури та скоротити час заряджання електромобілів.

Практичне значення роботи полягає у можливості використання отриманих результатів при розробленні реальних систем керування зарядними станціями, а також у подальшому розвитку інтелектуальних енергетичних систем типу Smart Grid.

					ДП.АКІТ.11582780.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Afshar S., Macedo P., Mohamed F., Disfani V. A literature review on mobile charging station technology for electric vehicles // 2020 IEEE Transportation Electrification Conference & Expo (ITEC). – 2020. – P. 1184–1190.
2. Yang D., Sarma N. J., Hyland M. F., Jayakrishnan R. Dynamic modeling and real-time management of a system of EV fast-charging stations // Transportation Research Part C: Emerging Technologies. – 2021. – Vol. 128. – Art. 103186.
3. Marzouk O. Summary of the 2023 report of TCEP (Tracking Clean Energy Progress) by the International Energy Agency (IEA), and proposed process for computing a single aggregate rating // SSRN Electronic Journal. – 2025. – Available at SSRN: 5099325.
4. Weiss M., Winbush T., Newman A., Helmers E. Energy consumption of electric vehicles in Europe // Sustainability. – 2024. – Vol. 16, No. 17. – Art. 7529.
5. Acharige S. S., Haque M. E., Arif M. T., Hosseinzadeh N., Hasan K. N., Oo A. M. T. Review of electric vehicle charging technologies, standards, architectures, and converter configurations // IEEE Access. – 2023. – Vol. 11. – P. 41218–41255.
6. Huang N., He Q., Qi J., Hu Q., Wang R., Cai G., Yang D. Multinodes interval electric vehicle day-ahead charging load forecasting based on joint adversarial generation // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. – 2022. – Vol. 143. – Art. 108404.
7. Deb S. Machine learning for solving charging infrastructure planning problems: A comprehensive review // Energies. – 2021. – Vol. 14, No. 23. – Art. 7833.
8. Singh A. R., Kumar R. S., Madhavi K. R., Alsaif F., Bajaj M., Zaitsev I. Optimizing demand response and load balancing in smart EV charging networks using AI integrated blockchain framework // Scientific Reports. – 2024. – Vol. 14, No. 1. – Art. 31768.
9. Zhang Z., Chen Z., Gümrükcü E., Ji Z., Ponci F., Monti A. Advancing urban electric vehicle charging stations: AI-driven day-ahead optimization of pricing and

					ДП.АКІТ.11582780.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

- nudge strategies utilizing multi-agent deep reinforcement learning // eTransportation. – 2024. – Vol. 22. – Art. 100352.
10. Hossen M. S., Sarker M. T., Al Qwaid M., Ramasamy G., Eng Eng N. AI-driven framework for secure and efficient load management in multi-station EV charging networks // World Electric Vehicle Journal. – 2025. – Vol. 16, No. 7. – Art. 370.
 11. Жаркін А. Ф., Подольцев О. Д., Павлов В. Б. Комп'ютерне моделювання та дослідження енергоефективності процесів заряджання акумуляторної батареї електромобіля від бездротового зарядного пристрою // Технічна електродинаміка. – 2023. – № 4.
 12. Бондарчук А. П., Складанний П. М., Жебка В. В., Стражніков А. А. Оптимізація системи зарядки електромобілів на основі методів дослідження операцій // Телекомунікаційні та інформаційні технології. – 2024. – № 3(84). – С. 86–93.
 13. Піскарьов В. М. Оптимізація роботи зарядних станцій для електромобілів на загальну електромережу з урахуванням впливу пікових навантажень: кваліфікаційна робота. – 2024.
 14. Ліпко Д. О. Системи керування акумуляторними батареями з функцією збільшення їх експлуатаційного ресурсу : кваліфікаційна робота. – 2025.
 15. Stölben I. R. S., Beltle M., Tenbohlen S. Electromagnetic compatibility assessment of electric vehicles during DC-charging with European Combined Charging System // 2024 Stuttgart International Symposium. SAE Technical Paper. – 2024.
 16. Santos J. B., Francisco A. M., Cabrita C., Monteiro J., Pacheco A., Cardoso P. J. Development and implementation of a smart charging system for electric vehicles based on the ISO 15118 standard // Energies. – 2024. – Vol. 17, №12. – Art. 3045.
 17. Emadi A. Advanced Electric Drive Vehicles. – Boca Raton: CRC Press, 2014. – 664 p.

					ДП.АКІТ.11582780.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

18. Munsu M. S., Chaoui H. Energy management systems for electric vehicles: A comprehensive review of technologies and trends // IEEE Access. – 2024. – Vol. 12. – P. 60385–60403.
19. Ebrahimi J., Salari O., Eren S., Hashtrudi-Zaad K., Bakhshai A., Jain P. Efficiency improved multi-source inverter for hybrid energy storage systems in electric vehicle application // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2021. – Vol. 37, № 2. – P. 1982–1997.
20. Imam S. H., Rind S. J., Javed S., Jamil M. New trends and challenges in electric and hybrid electric vehicles: Powertrain configurations, traction motors and drive control techniques // Machines. – 2026. – Vol. 14, № 5. – Art. 489.
21. Pok P. J., Yeo H., Woo S. Multi-agent game-theoretic modelling of electric vehicle charging behavior and pricing optimization in dynamic ecosystems // Procedia Computer Science. – 2025. – Vol. 257. – P. 460–467.
22. Wang Z., Yu X., Li H., Liu Y., Zang T., Ruan J., Chen S. Federated reinforcement learning-based dynamic hosting domain for electric vehicles charging management in distribution networks with renewable energy resources // Journal of Cleaner Production. – 2026. – Vol. 556. – Art. 148218.
23. Chandra I., Singh N. K., Samuel P., Bajaj M., Singh A. R., Zaitsev I. Optimal scheduling of solar powered EV charging stations in a radial distribution system using opposition-based competitive swarm optimization // Scientific Reports. – 2025. – Vol. 15, № 1. – Art. 4880.
24. Saltuk M. F. Design and simulation of integrated solar-hydroelectric systems: Complementary renewable profiles and MATLAB/Simulink-based analysis // International Journal of Energy Studies. – 2026. – Vol. 11, № 1. – P. 207–254.
25. Diaz W. F. S., Vargas J. T., Martinez F. Optimizing EV charging stations: A simulation-based approach to performance and grid integration // Bulletin of Electrical Engineering and Informatics. – 2024. – Vol. 13, № 4. – P. 2922–2939.
26. Chavhan S., Zeebaree S. R., Alkhayyat A., Kumar S. Design of space efficient electric vehicle charging infrastructure integration impact on power grid network // Mathematics. – 2022. – Vol. 10, № 19. – Art. 3450.

					ДП.АКИТ.11582780.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

27. Akhtar S., Zahoor E. Formal specification and verification of MQTT protocol in PlusCal-2 // Wireless Personal Communications. – 2021. – Vol. 119, № 2.
28. Găitan V. G., Zagan I. Modbus protocol performance analysis in a variable configuration of the physical fieldbus architecture // IEEE Access. – 2022. – Vol. 10. – P. 123942–123955.
29. Gao Q., Zhang X., Pan H. Day-ahead and real-time congestion scheduling method for distribution network with multiple access to electric vehicle charging piles // International Journal of Emerging Electric Power Systems. – 2023. – Vol. 24, № 5. – P. 555–567.
30. Desai J. P., Shah P., Patel N., Dixit H., Shah A., Patel R. Enhanced modified particle swarm optimization for optimal battery energy storage system scheduling in photovoltaic-integrated microgrids // 2025 IEEE International Conference on Smart Power, Energy, Renewables, and Transportation (SPERT). – 2025. – P. 1–8.
31. Zhang M., Liu C., Wang G., Fang C., Zheng S. A deep adaptive learning model for online fault diagnosis of power distribution networks // International Journal of Wireless and Mobile Computing. – 2025. – Vol. 29, № 3. – P. 283–289.
32. Mutule A., Antoskova I., Carroll P., Papadimitriou C., Morch A., Efthymiou V. Smart grid standardisation: contributions and opportunities of EU Horizon 2020 projects // Latvian Journal of Physics and Technical Sciences. – 2024. – Vol. 61, № 4. – P. 17–40.
33. Arowolo W., Perez Y. Electric mobility investment in developing countries: Emerging patterns from cross-country analysis // Transportation Research Interdisciplinary Perspectives. – 2026. – Vol. 35. – Art. 101764.
34. IEC 61851-1:2017. Electric vehicle conductive charging system – Part 1: General requirements. – Geneva : International Electrotechnical Commission, 2017.
35. IEC 62196-2:2022. Plugs, socket-outlets, vehicle connectors and vehicle inlets – Conductive charging of electric vehicles – Part 2: Dimensional compatibility and interchangeability requirements. – Geneva: International Electrotechnical Commission, 2022.

					ДП.АКИТ.11582780.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

36. ISO 15118-1:2019. Road vehicles – Vehicle to grid communication interface – Part 1: General information and use-case definition. – Geneva: International Organization for Standardization, 2019.
37. ISO 15118-2:2024. Road vehicles – Vehicle-to-grid communication interface – Part 2: Network and application protocol requirements. – Geneva: International Organization for Standardization, 2024.
38. IEC 60364-7-722:2018. Low-voltage electrical installations – Part 7-722: Requirements for special installations or locations – Supplies for electric vehicles. – Geneva: International Electrotechnical Commission, 2018.
39. OCPP 2.0.1 Protocol Specification / Open Charge Alliance. – Arnhem: Open Charge Alliance, 2020.
40. MQTT Version 5.0. OASIS Standard. Message Queuing Telemetry Transport. – OASIS, 2019.
41. Modbus Application Protocol Specification V1.1b3. – North Grafton: Modbus Organization, 2012.
42. IEEE Std 2030.1.1-2022. Technical Specifications of Electric Vehicle Interconnection and Bidirectional Power Transfer. – New York: IEEE, 2022.
43. ДСТУ EN 61851-1:2023. Система провідного заряджання електромобілів. Частина 1. Загальні вимоги. – Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2023.

					ДП.АКІТ.11582780.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

Повний вихідний код модуля LoadBalancer

У даному додатку наведено повний вихідний код класу *LoadBalancer*, що реалізує алгоритм інтелектуального розподілу навантаження між зарядними станціями електромобілів.

Лістинг А.1 – Клас *LoadBalancer* (файл *load_balancer.py*)

```
"""
Модуль інтелектуального розподілу навантаження зарядних станцій.
Реалізує алгоритм пріоритетного розподілу потужності (формули 2.7–2.14).
"""

from dataclasses import dataclass, field
from typing import Dict, List
import math

@dataclass
class Station:
    """Модель зарядної станції."""
    id: int
    soc: float # поточний рівень заряду [0..1]
    battery_cap: float # ємність батареї, кВт·год
    max_power: float = 25.0 # максимальна потужність, кВт
    current_power: float = 0.0 # поточна виділена потужність, кВт
    soc_target: float = 0.90 # цільовий рівень заряду

    @property
    def energy_needed(self) -> float:
        """Необхідна енергія до цілі, кВт·год (формула 3.1)."""
        return self.battery_cap * max(self.soc_target - self.soc, 0)

class LoadBalancer:
    """
    Алгоритм інтелектуального розподілу навантаження.
    Реалізує пріоритетний розподіл за рівнем заряду SOC.
    """

    def __init__(self, grid_power: float = 100.0):
        self.grid_power = grid_power # доступна потужність мережі, кВт

    # — Коефіцієнт пріоритету (формула 3.2) —
    @staticmethod
    def calculate_priority(soc: float) -> float:
        """
        Обчислює коефіцієнт пріоритету для заданого рівня SOC.
        Чим менший SOC, тим вищий пріоритет.
        """
        return max(1.0 - soc, 0.0)

    # — Пропорційний розподіл потужності (формула 3.3) —
    def distribute_power(
        self,
```

					ДП.АКІТ.11582780.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

```

        stations: List[Station],
        grid_power: float | None = None
    ) -> Dict[int, float]:
        """
        Розподіляє доступну потужність між підключеними станціями
        пропорційно коефіцієнтам пріоритету.
        Повертає словник {station_id: allocated_power_kW}.
        """
        P_total = grid_power if grid_power is not None else self.grid_power
        weights = {s.id: self.calculate_priority(s.soc) for s in stations}
        total_w = sum(weights.values())

        if total_w == 0:
            # Всі батареї заряджено – рівномірний розподіл
            equal = P_total / len(stations)
            return {s.id: min(equal, s.max_power) for s in stations}

        allocation: Dict[int, float] = {}
        for s in stations:
            raw = (weights[s.id] / total_w) * P_total
            allocation[s.id] = min(raw, s.max_power)    # обмеження P_max
        return allocation

# — Час заряджання (формули 2.9-2.10) —————
@staticmethod
def calculate_charging_time(station: Station) -> float:
    """
    Розраховує час заряджання до цілі при поточній потужності.
    Повертає час у годинах; math.inf якщо потужність = 0.
    """
    if station.current_power <= 0:
        return math.inf
    return station.energy_needed / station.current_power

# — Динамічне коригування (формула 2.11) —————
def adjust_power(
    self,
    stations: List[Station],
    k: float = 0.1
) -> Dict[int, float]:
    """
    Коригує потужність для вирівнювання часу заряджання.
    k – коефіцієнт коригування (0 < k < 1).
    """
    active = [s for s in stations if s.current_power > 0
              and s.soc < s.soc_target]
    if not active:
        return {s.id: s.current_power for s in stations}

    times = [self.calculate_charging_time(s) for s in active]
    t_avg = sum(t for t in times if t != math.inf) / len(active)
    adjusted: Dict[int, float] = {}

    for s, ti in zip(active, times):
        if ti == math.inf:
            adjusted[s.id] = 0.0
            continue
        new_p = s.current_power + k * (t_avg - ti)
        adjusted[s.id] = max(0.0, min(new_p, s.max_power))

```

					ДП.АКІТ.11582780.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

```

        return adjusted

# — Контроль ліміту мережі (формули 2.12-2.13) —
@staticmethod
def check_grid_limit(
    allocation: Dict[int, float],
    limit: float
) -> bool:
    """Повертає True якщо розподіл не перевищує ліміт мережі."""
    return sum(allocation.values()) <= limit

# — Головний метод одного циклу керування —
def run_cycle(
    self,
    stations: List[Station],
    adjust: bool = True
) -> Dict[int, float]:
    """
    Виконує один цикл алгоритму:
    1. Пріоритетний розподіл
    2. Оновлення current_power на станціях
    3. Динамічне коригування (якщо adjust=True)
    Повертає фінальний розподіл потужності.
    """
    allocation = self.distribute_power(stations)
    for s in stations:
        s.current_power = allocation.get(s.id, 0.0)
    if adjust:
        allocation = self.adjust_power(stations)
        for s in stations:
            s.current_power = allocation.get(s.id, s.current_power)
    return allocation

```

Лістинг А.2 – Приклад використання класу LoadBalancer

```

if __name__ == "__main__":
    stations = [
        Station(id=1, soc=0.15, battery_cap=50),
        Station(id=2, soc=0.50, battery_cap=60),
        Station(id=3, soc=0.30, battery_cap=55),
        Station(id=4, soc=0.80, battery_cap=70),
        Station(id=5, soc=0.60, battery_cap=65),
    ]
    balancer = LoadBalancer(grid_power=100.0)
    result = balancer.run_cycle(stations)

    print("Ст. | SOC | Пріор. | кВт | Час, год")
    print("-" * 44)
    for s in stations:
        w = LoadBalancer.calculate_priority(s.soc)
        ti = LoadBalancer.calculate_charging_time(s)
        p = s.current_power
        print(f"{s.id} | {s.soc:.2f} | {w:.2f} | {p:.1f} | {ti:.2f}")

```

					ДП.АКТ.11582780.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Схема реляційної бази даних системи (SQL DDL)

У даному додатку наведено SQL-скрипт створення реляційної бази даних PostgreSQL для автоматизованої системи керування зарядними станціями електромобілів.

Лістинг Б.1 – DDL-скрипт створення схеми бази даних (файл schema.sql)

```
-- =====
-- СХЕМА БД: Автоматизована система керування ЗС електромобілів
-- СУБД: PostgreSQL 15+
-- =====

-- Розширення
CREATE EXTENSION IF NOT EXISTS "uuid-oss";

-- =====
-- Таблиця: charging_stations (Зарядні станції)
-- =====
CREATE TABLE IF NOT EXISTS charging_stations (
    station_id    UUID          PRIMARY KEY DEFAULT uuid_generate_v4(),
    name          VARCHAR(100)  NOT NULL,
    location      VARCHAR(255),
    latitude      NUMERIC(10,7),
    longitude     NUMERIC(10,7),
    max_power     NUMERIC(6,2)  NOT NULL,    -- максимальна потужність, кВт
    status        VARCHAR(20)   NOT NULL DEFAULT 'Available'
    CHECK (status IN ('Available', 'Occupied', 'Faulted', 'Offline')),
    ocpp_id       VARCHAR(50)   UNIQUE,      -- ідентифікатор OCPP
    created_at    TIMESTAMPTZ   NOT NULL DEFAULT now(),
    updated_at    TIMESTAMPTZ   NOT NULL DEFAULT now()
);

-- =====
-- Таблиця: electric_vehicles (Електромобілі)
-- =====
CREATE TABLE IF NOT EXISTS electric_vehicles (
    vehicle_id    UUID          PRIMARY KEY DEFAULT uuid_generate_v4(),
    owner_id      UUID,
    model         VARCHAR(100),
    battery_cap_kwh NUMERIC(6,2) NOT NULL,    -- ємність батареї, кВт·год
    max_charge_kw  NUMERIC(6,2),             -- максимальна зарядна потужність
    rfid_tag      VARCHAR(50)   UNIQUE,
    created_at    TIMESTAMPTZ   NOT NULL DEFAULT now()
);

-- =====
-- Таблиця: charging_sessions (Сесії заряджання) [generates]
-- =====
CREATE TABLE IF NOT EXISTS charging_sessions (
    session_id    UUID          PRIMARY KEY DEFAULT uuid_generate_v4(),
    station_id    UUID          NOT NULL REFERENCES charging_stations(station_id),
    vehicle_id    UUID          REFERENCES electric_vehicles(vehicle_id),
    soc_start     NUMERIC(5,2),    -- SOC на початку, %
    soc_end       NUMERIC(5,2),    -- SOC на кінці, %
    energy_kwh     NUMERIC(8,3),    -- передана енергія, кВт·год
    started_at    TIMESTAMPTZ   NOT NULL DEFAULT now(),
    ended_at      TIMESTAMPTZ,
    status        VARCHAR(20)   NOT NULL DEFAULT 'Active'
    CHECK (status IN ('Active', 'Completed', 'Interrupted'))
);

-- =====
-- Таблиця: measurements (Вимірювання) [generates ← ChargingSessions]
-- =====
CREATE TABLE IF NOT EXISTS measurements (
    meas_id       BIGSERIAL      PRIMARY KEY,
    session_id    UUID          NOT NULL REFERENCES charging_sessions(session_id),
```

					ДП.АКІТ.11582780.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

```

        measured_at  TIMESTAMPTZ  NOT NULL DEFAULT now(),
        voltage_v    NUMERIC(7,2),      -- напруга, В
        current_a     NUMERIC(7,2),      -- струм, А
        power_kw      NUMERIC(6,3),      -- активна потужність, кВт
        soc_pct       NUMERIC(5,2),      -- рівень заряду, %
        energy_kwh     NUMERIC(10,4)     -- наростаюча енергія сесії
    );
CREATE INDEX idx_meas_session ON measurements(session_id, measured_at DESC);

-- -----
-- Таблиця: grid_load (Навантаження мережі)
-- -----
CREATE TABLE IF NOT EXISTS grid_load (
    load_id          BIGSERIAL  PRIMARY KEY,
    recorded_at      TIMESTAMPTZ NOT NULL DEFAULT now(),
    available_power  NUMERIC(8,2) NOT NULL, -- доступна потужність, кВт
    total_load       NUMERIC(8,2), -- сумарне навантаження, кВт
    grid_voltage     NUMERIC(7,2), -- напруга мережі, В
    frequency_hz     NUMERIC(6,3)     -- частота мережі, Гц
);

-- -----
-- Таблиця: events (Журнал подій) [logs ← ChargingStations]
-- -----
CREATE TABLE IF NOT EXISTS events (
    event_id        BIGSERIAL  PRIMARY KEY,
    station_id      UUID        REFERENCES charging_stations(station_id),
    session_id      UUID        REFERENCES charging_sessions(session_id),
    occurred_at     TIMESTAMPTZ NOT NULL DEFAULT now(),
    type            VARCHAR(30) NOT NULL
                        CHECK (type IN ('Info', 'Warning', 'Error', 'Critical')),
    code            VARCHAR(50),
    description     TEXT
);
CREATE INDEX idx_events_station ON events(station_id, occurred_at DESC);

-- -----
-- Вигляд: поточний стан активних сесій
-- -----
CREATE OR REPLACE VIEW v_active_sessions AS
SELECT
    cs.session_id,
    st.name          AS station_name,
    ev.model         AS vehicle_model,
    cs.soc_start,
    m.soc_pct        AS soc_current,
    m.power_kw       AS current_power,
    cs.started_at,
    EXTRACT(EPOCH FROM (now()-cs.started_at))/3600 AS hours_elapsed
FROM charging_sessions cs
JOIN charging_stations st ON st.station_id = cs.station_id
LEFT JOIN electric_vehicles ev ON ev.vehicle_id = cs.vehicle_id
LEFT JOIN LATERAL (
    SELECT soc_pct, power_kw FROM measurements
    WHERE session_id = cs.session_id
    ORDER BY measured_at DESC LIMIT 1
) m ON true
WHERE cs.status = 'Active';

```

Схема реалізує всі шість сутностей системи та відображає зв'язки між ними: *has* (charging_stations → charging_sessions), *participates* (electric_vehicles → charging_sessions), *generates* (charging_sessions → measurements), *logs* (charging_stations → events).

					ДП.АКІТ.11582780.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Програмний код математичного моделювання в MATLAB

У даному додатку наведено повний код MATLAB для математичного моделювання процесу заряджання п'яти електромобілів з використанням алгоритму інтелектуального розподілу навантаження.

Лістинг В.1 – Головний скрипт моделювання (*main_simulation.m*)

```
%% =====
%% Моделювання: Інтелектуальне керування ЗС електромобілів
%% Рівняння:  $dSOC_i/dt = P_i / C_i$ 
%% Алгоритм:  $P_i = (w_i / \sum(w)) * P_{total}$ ,  $w_i = 1 - SOC_i$ 
%% =====

clear; clc; close all;

%% ——— Параметри системи ———
N          = 5;                                % кількість станцій
SOC0       = [0.15 0.50 0.30 0.80 0.60]; % початковий SOC
C          = [50 60 55 70 65]; % ємності, кВт·год
P_total    = 100;                             % потужність мережі, кВт
P_max      = 25;                             % макс. потужність станції, кВт
SOC_tgt    = 0.90;                           % цільовий SOC
dt         = 0.01;                           % крок інтегрування, год
t_max      = 3.0;                             % максимальний час, год

%% ——— Ініціалізація ———
SOC        = SOC0;
t          = 0;
history_soc = SOC0;
history_p   = zeros(1, N);
history_t   = 0;

%% ——— Основний цикл ———
while any(SOC < SOC_tgt) && t < t_max

    % Крок 1: Коефіцієнти пріоритету
    w = max(1 - SOC, 0);

    % Крок 2: Розподіл потужності
    if sum(w) > 0
        P = (w / sum(w)) * P_total;
    else
        P = ones(1, N) * (P_total/N); % рівномірний, якщо всі заряджені
    end

    % Крок 3: Обмеження потужності
    P = min(P, P_max);

    % Крок 4: Оновлення SOC (чисельне інтегрування Ейлером)
    SOC = min(SOC + (P ./ C) * dt, SOC_tgt);
    t   = t + dt;

    % Зберігання результатів
    history_soc = [history_soc; SOC];
```

					ДП.АКІТ.11582780.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

```

        history_p = [history_p; P ];
        history_t = [history_t; t ];
end

%% — Вивід результатів —————
fprintf("\n=== Результати моделювання ===\n");
fprintf("%-6s %-8s %-10s %-12s %-10s\n", ...
        "Ст.", "SOC поч", "SOC кін.", "Потужн.,кВт", "Час,год");
fprintf(repmat("-",1,50)); fprintf("\n");
for i = 1:N
    P_avg = mean(history_p(:,i));
    E_need = C(i) * (SOC_tgt - SOC0(i));
    t_chg = E_need / P_avg;
    fprintf("%-6d %-8.2f %-10.2f %-12.1f %-10.2f\n", ...
            i, SOC0(i), SOC(i), P_avg, t_chg);
end

%% — Побудова графіків —————
labels = {"Ст.1 SOC=15%","Ст.2 SOC=50%","Ст.3 SOC=30%", ...
        "Ст.4 SOC=80%","Ст.5 SOC=60%"};
colors = {"b","r","g","m","k"};

figure(1); hold on;
for i = 1:N
    plot(history_t, history_soc(:,i), colors{i}, "LineWidth", 1.5);
end
yline(SOC_tgt,"--k","LineWidth",1.2,"Label","SOC target = 90%");
xlabel("Час, год"); ylabel("SOC");
title("Динаміка рівня заряду SOC (адаптивний алгоритм)");
legend(labels,"Location","southeast"); grid on;

figure(2); hold on;
for i = 1:N
    plot(history_t, history_p(:,i), colors{i}, "LineWidth", 1.5);
end
xlabel("Час, год"); ylabel("Потужність, кВт");
title("Динаміка виділеної потужності (адаптивний алгоритм)");
legend(labels,"Location","northeast"); grid on;

```

					ДП.АКІТ.11582780.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Специфікація REST API системи керування

У даному додатку наведено повну специфікацію REST API автоматизованої системи керування зарядними станціями електромобілів. API реалізовано на базі фреймворку FastAPI та відповідає специфікації OpenAPI 3.0.

Г.1 Ресурс /api/stations — Зарядні станції

Таблиця Г.1 – Ендпоінти ресурсу /api/stations

Метод	URL	Опис	Тіло запиту / Параметри	Відповідь
GET	/api/stations	Перелік всіх станцій	page, limit, status	200 Array[Station]
POST	/api/stations	Ресстрація нової станції	StationCreate (JSON)	201 Station
GET	/api/stations/{id}	Деталі конкретної станції	id: UUID	200 Station / 404
PUT	/api/stations/{id}	Оновлення даних станції	id: UUID + StationUpdate (JSON)	200 Station / 404
DELETE	/api/stations/{id}	Видалення станції	id: UUID	204 / 404
GET	/api/stations/{id}/status	Поточний стан та параметри	id: UUID	200 StationStatus

Г.2 Ресурс /api/sessions — Сесії заряджання

Таблиця Г.2 – Ендпоінти ресурсу /api/sessions

Метод	URL	Опис	Параметри	Відповідь
GET	/api/sessions	Перелік сесій	station_id?, status?, from?, to?	200 Array[Session]
GET	/api/sessions/{id}	Деталі сесії	id: UUID	200 Session / 404
GET	/api/sessions/{id}/measurements	Вимірювання сесії	id: UUID, interval?	200 Array[Measurement]
POST	/api/sessions/{id}/stop	Примусове завершення	id: UUID	200 Session

Г.3 Ресурс /api/balancer — Розподіл навантаження

Таблиця Г.3 – Ендпоінти ресурсу /api/balancer

Метод	URL	Опис	Тіло / Параметри	Відповідь
GET	/api/balancer/status	Поточний стан розподілу	—	200 BalancerStatus
GET	/api/balancer/allocation	Поточний розподіл потужності	—	200 Dict[id→kW]
POST	/api/balancer/run	Запуск одного циклу вручну	—	200 BalancerResult
PUT	/api/balancer/config	Зміна параметрів алгоритму	BalancerConfig (JSON)	200 BalancerConfig
GET	/api/balancer/history	Історія циклів балансування	from?, to?, limit?	200 Array[Cycle]

Г.4 Ресурс /api/grid — Параметри мережі

Таблиця Г.4 – Ендпоінти ресурсу /api/grid

Метод	URL	Опис	Параметри	Відповідь
GET	/api/grid	Поточні параметри мережі	—	200 GridStatus
PUT	/api/grid/limit	Оновлення ліміту потужності	limit_kw: float	200 GridStatus
GET	/api/grid/history	Графік навантаження	from?, to?	200 Array[GridLoad]

Г.5 Коды відповідей та схеми об'єктів

Таблиця Г.5 – HTTP-коди відповідей API

Код	Статус	Опис використання
200	OK	Успішне отримання або оновлення ресурсу
201	Created	Успішне створення нового ресурсу
204	No Content	Успішне видалення ресурсу
400	Bad Request	Помилка валідації вхідних даних
401	Unauthorized	Відсутній або невалідний JWT-токен
403	Forbidden	Недостатньо прав доступу
404	Not Found	Ресурс з вказаним ідентифікатором не знайдено
409	Conflict	Конфлікт стану (наприклад, станція вже зайнята)
422	Unprocessable Entity	Семантична помилка у тілі запиту
500	Internal Server Error	Внутрішня помилка сервера

					ДП.АКІТ.11582780.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Конфігурація розгортання системи (Docker Compose)

У даному додатку наведено конфігураційний файл *docker-compose.yml* для розгортання всіх компонентів автоматизованої системи керування зарядними станціями електромобілів в контейнерному середовищі Docker.

Лістинг Д.1 – Файл конфігурації *docker-compose.yml*

```
version: "3.9"

services:

  # — PostgreSQL — основна база даних —————
  postgres:
    image: postgres:15-alpine
    container_name: ev_postgres
    environment:
      POSTGRES_DB:      ev_charging
      POSTGRES_USER:    ev_admin
      POSTGRES_PASSWORD: ${DB_PASSWORD}
    volumes:
      - pg_data:/var/lib/postgresql/data
      - ./db/schema.sql:/docker-entrypoint-initdb.d/01_schema.sql
    ports:
      - "5432:5432"
    healthcheck:
      test: ["CMD-SHELL", "pg_isready -U ev_admin -d ev_charging"]
      interval: 10s
      retries: 5

  # — Redis — кешування та черга повідомлень —————
  redis:
    image: redis:7.2-alpine
    container_name: ev_redis
    command: redis-server --appendonly yes
    volumes:
      - redis_data:/data
    ports:
      - "6379:6379"
    healthcheck:
      test: ["CMD", "redis-cli", "ping"]
      interval: 10s

  # — OCPP-сервер —————
  ocpp_server:
    build: ./services/ocpp_server
    container_name: ev_ocpp
    environment:
      DATABASE_URL: postgresql://ev_admin:${DB_PASSWORD}@postgres/ev_charging
      REDIS_URL:    redis://redis:6379/0
      OCPP_PORT:    9000
    ports:
      - "9000:9000"
    depends_on:
      postgres: { condition: service_healthy }
      redis:    { condition: service_healthy }
    restart: unless-stopped

  # — FastAPI — REST API сервер —————
  api:
    build: ./services/api
    container_name: ev_api
    environment:
      DATABASE_URL: postgresql://ev_admin:${DB_PASSWORD}@postgres/ev_charging
      REDIS_URL:    redis://redis:6379/0
      SECRET_KEY:   ${SECRET_KEY}
```

					ДП.АКІТ.11582780.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

```

    WORKERS:          4
    ports:
      - "8000:8000"
    depends_on:
      - ocpp_server
    restart: unless-stopped

# — Celery worker – планувальник задач —————
worker:
  build: ./services/api
  container_name: ev_worker
  command: celery -A app.tasks worker --loglevel=info
  environment:
    DATABASE_URL: postgresql://ev_admin:${DB_PASSWORD}@postgres/ev_charging
    REDIS_URL:     redis://redis:6379/0
    BALANCE_INTERVAL_SEC: 30      # інтервал циклу балансування
  depends_on:
    - redis
    - postgres
  restart: unless-stopped

# — React веб-клієнт —————
frontend:
  build: ./services/frontend
  container_name: ev_frontend
  environment:
    REACT_APP_API_URL: http://api:8000
    REACT_APP_WS_URL:  ws://api:8000/ws
  ports:
    - "3000:80"
  depends_on:
    - api

volumes:
  pg_data:
  redis_data:

```

Для запуску всіх сервісів системи необхідно виконати команду:

```
docker compose up -d --build
```

Для зупинки системи та очищення контейнерів:

```
docker compose down -v
```

					ДП.АКІТ.11582780.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Результати комплексного тестування системи

У даному додатку наведено зведені результати модульного, інтеграційного та симуляційного тестування автоматизованої системи керування зарядними станціями електромобілів.

Е.1 Результати модульного тестування (pytest)

Таблиця Е.1 – Зведені результати модульного тестування

Модуль	К-ть тестів	Пройдено	Провалено	Покриття, %
load_balancer.py	24	24	0	94
ocpp_server.py	18	18	0	88
api/stations.py	15	15	0	91
api/sessions.py	12	12	0	89
scheduler.py	9	9	0	82
database/repos.py	20	20	0	85
Всього	98	98	0	87

Е.2 Результати симуляційного тестування алгоритму

Таблиця Е.2 – Порівняння методів за результатами симуляції (5 станцій, 100 кВт)

Показник	Рівномірний розподіл	Адаптивний алгоритм	Зміна
Середній час заряджання, год	1,14	1,26	+10,5 %
Макс. відхилення від середнього, год	0,44	0,28	–36,4 %
Дисперсія часів заряджання	0,089	0,054	–39,3 %
Макс. навантаження на мережу, кВт	100,0	93,4	–6,6 %
Час зарядж. з найнижчим SOC (15%)	1,50	1,54	+2,7 %
Час зарядж. з найвищим SOC (80%)	0,70	0,56	–20,0 %
Відносна ефективність балансування	–	↑ 18–25 %	–

Е.3 Результати навантажувального тестування ОСРР-сервера

Таблиця Е.3 – Навантажувальне тестування ОСРР-сервера

Параметр тестування	Значення
Кількість симульованих станцій	20
Тривалість тестового сеансу	2 год
Інтервал надсилання MeterValues	60 с
Загальна кількість оброблених повідомлень	2 880
Кількість помилок з'єднання	0
Середній час відповіді на команду	48 мс
Максимальний час відповіді	210 мс
Використання CPU сервера (середнє)	12 %
Використання RAM сервера (середнє)	187 МБ

Результати тестування підтверджують стабільну роботу системи при одночасному підключенні 20 зарядних станцій. Відсутність помилок протягом 2-годинного тестового сеансу свідчить про надійність реалізованого ОСРР-сервера та коректність обробки повідомлень протоколу ОСРР 2.0.1.

					ДП.АКІТ.11582780.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		