

Центральноукраїнський національний технічний університет
Факультет будівництва, транспорту та енергетики
Кафедра “Електротехнічні системи та енергетичний менеджмент”

“ Дopusчено до захисту ”
Зав. кафедрою ЕТС та ЕМ
канд. техн. наук., професор
_____Петро ПЛЕШКОВ
“ ____ ” _____2025р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
за другим (магістерським) рівнем вищої
освіти
на тему
“ Дослідження зарядної інфраструктури
електромобілів та режимів її роботи ”

Виконав здобувач вищої освіти
2 курсу магістратури, групи ЕЕ-24М
ОПП «Електротехнічні системи
електроспоживання»
спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»
_____Михайло РАТЬКОВ
« ____ » _____2025 р.

Керівник роботи
канд. техн. наук, доцент
_____Валентин СОЛДАТЕНКО
« ____ » _____2025 р.

Рецензент _____

м. Кропивницький

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва, транспорту та енергетики

Кафедра електротехнічних систем та енергетичного менеджменту

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Галузь знань 14 «Електрична інженерія»

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітньо-професійна програма «Електротехнічні системи електроспоживання»

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри ЕТС та ЕМ

канд. техн. наук, професор

Петро ПЛЄШКОВ.

«___» _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗА ДРУГИМ (МАГІСТЕРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

Ратькова Михайла Андрійовича

(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема роботи (проекту) *Дослідження зарядної інфраструктури електромобілів та режимів її роботи*

Research on electric vehicle charging infrastructure and its operating modes

2. Керівник роботи (проекту) *Солдатенко Валентин Петрович, канд. техн. наук., доц.*

(прізвище, ім'я, по-батькові, науковий ступінь, вчене звання)

3. Строк подання студентом роботи до захисту *01.12.2025*

4. Мета та завдання випускної кваліфікаційної роботи (проекту) *Метою роботи є підвищення ефективності та надійності функціонування зарядної інфраструктури електромобілів шляхом розробки адаптивної системи керування режимами роботи на основі нечіткої логіки, що забезпечить оптимальний розподіл потужності в умовах мережесвих обмежень. Завдання роботи: провести комплексний аналіз зарядної інфраструктури та методів керування її режимами її роботи; розробити математичні моделі та синтезувати адаптивну систему керування зарядною інфраструктурою; провести порівняльне імітаційне моделювання роботи адаптивної системи керування зарядною інфраструктурою; розробити заходи з охорони праці та безпеки життєдіяльності при експлуатації інтелектуальних зарядних комплексів.*

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
<i>Охорона праці</i>	<i>к.т.н, доц. Савеленко І.В.</i>		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів випускної кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
<i>1</i>	<i>Вступ</i>	<i>10.10.2025 р.</i>	
<i>2</i>	<i>Комплексний аналіз зарядної інфраструктури та методів керування її режимами її роботи</i>	<i>20.10.2025 р.</i>	
<i>3</i>	<i>Розробка математичних моделей та синтез адаптивної системи керування зарядною інфраструктурою</i>	<i>03.11.2025 р.</i>	
<i>4</i>	<i>Імітаційне моделювання роботи адаптивної системи керування зарядною інфраструктурою</i>	<i>17.11.2025 р.</i>	
<i>5</i>	<i>Охорона праці та безпека життєдіяльності при експлуатації інтелектуальних зарядних комплексів</i>	<i>24.11.2025 р.</i>	
<i>6</i>	<i>Загальні висновки</i>	<i>25.11.2025 р.</i>	
<i>7</i>	<i>Оформлення пояснювальної записки КР</i>	<i>27.11.2025 р.</i>	
<i>8</i>	<i>Оформлення презентаційної частини КР</i>	<i>28.11.2025 р.</i>	

Дата видачі завдання: « ____ » _____ 2025 р.

Підпис керівника _____ Валентин СОЛДАТЕНКО

Завдання прийнято до виконання: « ____ » _____ 2025 р.

Підпис здобувача _____ Михайло РАТЬКОВ

АНОТАЦІЯ

Ратьков М.А. Дослідження зарядної інфраструктури електромобілів та режимів її роботи.

Спеціальність 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». – ОПП «Електротехнічні системи електроспоживання». – Центральноукраїнський національний технічний університет. – м. Кропивницький, 2025р.

Робота присвячена вирішенню актуальної науково-прикладної задачі підвищення ефективності функціонування зарядної інфраструктури електромобілів шляхом впровадження адаптивних режимів роботи в умовах обмеженого електропостачання.

У роботі проведено аналіз впливу некерованого заряджання на розподільчі електричні мережі та виявлено проблеми перевантаження силового обладнання і погіршення якості електроенергії. Обґрунтовано неефективність традиційних детермінованих алгоритмів керування.

Розроблено метод адаптивного керування зарядною станцією на основі апарату нечіткої логіки (Fuzzy Logic). Ключовою особливістю методу є використання Індексу Пріоритету Заряджання, який дозволяє визначати пріоритетність обслуговування електромобілів залежно від їхнього рівня заряду, необхідної енергії, часу паркування та поточного тарифу.

Для дослідження запропонованого методу створено імітаційну модель електротехнічного комплексу в середовищі Matlab Simulink. Результати моделювання підтвердили, що розроблена система дозволяє уникнути перевантаження трансформаторної підстанції, знизити пікове споживання на 20% та збільшити пропускну здатність зарядної станції на 12,6% порівняно з існуючими аналогами. Також розглянуто питання охорони праці та безпеки експлуатації інтелектуальних зарядних комплексів.

Ключові слова: електромобіль, зарядна станція, нечітка логіка, керування навантаженням, енергоефективність, якість електроенергії.

THE SUMMARY

Ratkov MA. Research on electric vehicle charging infrastructure and its operating modes

Specialty 141 – "Electric power, electrical engineering and electromechanics". – "Electrical power consumption systems". – Central Ukrainian National Technical University. – Kropyvnytskyi, 2025

The work is devoted to solving the current scientific and applied problem of increasing the efficiency of the charging infrastructure of electric vehicles by implementing adaptive operating modes in conditions of limited power supply.

The work analyzes the impact of uncontrolled charging on distribution electrical networks and identifies problems of overloading power equipment and deterioration of electricity quality. The inefficiency of traditional deterministic control algorithms is substantiated.

A method for adaptive charging station control based on Fuzzy Logic has been developed. The key feature of the method is the use of the Charging Priority Index, which allows determining the priority of electric vehicle servicing depending on their charge level, required energy, parking time, and current tariff.

To study the proposed method, a simulation model of the electrical complex was created in the Matlab Simulink environment. The simulation results confirmed that the developed system allows avoiding overloading of the transformer substation, reducing peak consumption by 20% and increasing the charging station throughput by 12,6% compared to existing analogues. The issues of occupational health and safety of operation of intelligent charging complexes were also considered.

Key words: electric vehicle, charging station, fuzzy logic, load management, energy efficiency, power quality.

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ	4
ЗМІСТ	6
ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ	9
ВСТУП	11
РОЗДІЛ 1 КОМПЛЕКСНИЙ АНАЛІЗ ЗАРЯДНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ ТА МЕТОДІВ КЕРУВАННЯ ЇЇ РЕЖИМАМИ ЇЇ РОБОТИ	14
1.1 Тенденції розширення парку електричних транспортних засобів у національному та світовому вимірах	14
1.2 Схемотехнічні рішення та логіка керування зарядною станцією	16
1.3 Системно-технічні вимоги та нормативні критерії функціонування зарядної інфраструктури.....	18
1.4 Концепція побудови систем адаптивного керування зарядною інфраструктурою.....	20
1.5 Аналіз детермінованих алгоритмів керування зарядними сесіями в умовах лімітованої потужності.....	22
1.5.1 Алгоритмічна реалізація стратегії пріоритету черги (First-Come-First- Served).....	22
1.5.2 Алгоритмічні стратегії диспетчеризації на основі розв'язання задач глобальної оптимізації	24
1.5.3 Децентралізовані стратегії керування на основі економічних стимулів (Time-of-Use)	26
1.6 Аналіз впливу зарядних навантажень на режими роботи та параметри якості електроенергії розподільчих мереж.....	28
1.6.1 Асиметрія напруг та струмів у низьковольтних мережах.	29
1.6.2 Генерація вищих гармонік та спотворення синусоїдальності.	30
1.7 Нормативно-правові та технічні аспекти приєднання зарядної інфраструктури до електричних мереж.....	32

Висновки до розділу 1	34
РОЗДІЛ 2 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ТА СИНТЕЗ АДАПТИВНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЗАРЯДНОЮ ІНФРАСТРУКТУРОЮ	36
2.1 Математичне моделювання електроенергетичних процесів взаємодії зарядної станції та електромобіля	36
2.1.1 Еквівалентна схема заміщення та рівняння стану акумуляторної батареї.....	36
2.1.2 Алгоритмічна реалізація стандартного профілю заряду CC/CV.....	38
2.2 Концептуальні засади запропонованого підходу на базі нечіткої логіки....	39
2.3 Синтез нечіткого контролера для розрахунку Індексу пріоритетності заряджання.....	41
2.4 Побудова архітектури нечіткої системи виведення.....	43
2.5 Математична формалізація функцій належності та обґрунтування бази терм-множин.....	45
2.6 Параметричний синтез нечіткої моделі на прикладі Nissan Leaf.....	46
2.7 Формування бази правил та аналіз поверхні керування	48
2.8 Реалізація етапу дефазифікації та отримання керуючого впливу.....	53
2.9 Формалізація задачі глобальної оптимізації розподілу потужності.....	54
Висновки до розділу 2.....	56
РОЗДІЛ 3 ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ АДАПТИВНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЗАРЯДНОЮ ІНФРАСТРУКТУРОЮ	58
3.1 Архітектура та топологія моделі розподільчої мережі в середовищі Matlab Simulink	58
3.1.1 Моделювання джерела живлення та вузла трансформації.....	59
3.1.2 Моделювання базового навантаження об'єкта (Base Load).....	60
3.1.3 Реалізація моделі інтелектуальної зарядної станції (Smart Charging Station).....	61
3.1.4 Програмна реалізація алгоритмів керування в MATLAB.....	63
3.2 Формування сценарію імітаційного експерименту та характеристика тестової вибірки електромобілів.....	64

3.2.1 Параметри вхідного потоку заявок.....	64
3.2.2 Статистичний аналіз складності сценарію.....	65
3.3 Порівняльний аналіз енергетичної ефективності стратегій керування	66
3.3.1 Аналіз добових графіків електричного навантаження.....	67
3.3.2 Аналіз динаміки зміни стану заряду (SOC) акумуляторних батарей.....	70
3.3.3 Кількісна оцінка якості обслуговування (Quality of Service).....	72
3.3.4 Оцінка надійності роботи розподільчої мережі.....	73
3.3.5 Аналіз енергетичної ефективності та пропускної здатності.....	74
Висновки до розділу 3.....	75
РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ЗАРЯДНИХ КОМПЛЕКСІВ	77
4.1 Аналіз потенційних небезпек та шкідливих виробничих факторів при обслуговуванні зарядної інфраструктури.....	77
4.2 Інженерно-технічні заходи забезпечення електробезпеки	78
4.3 Заходи пожежної профілактики та реагування на аварійні ситуації.....	79
Висновки до розділу 4.....	81
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	82
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	84

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

- AC – Alternating Current (Змінний струм)
- BEV – Battery Electric Vehicle (Електромобіль на акумуляторних джерелах)
- BMS – Battery Management System (Система керування батареєю)
- CC/CV – Constant Current / Constant Voltage (Метод заряду «Постійний струм / Постійна напруга»)
- DC – Direct Current (Постійний струм)
- DSM – Demand Side Management (Керування попитом на електроенергію)
- EV – Electric Vehicle (Електричний транспортний засіб)
- EVSE – Electric Vehicle Supply Equipment (Обладнання для живлення електромобілів)
- FCFS – First-Come-First-Served (Дисципліна черги «Перший прийшов – перший обслуговується»)
- FLC – Fuzzy Logic Controller (Контролер на основі нечіткої логіки)
- IEC – International Electrotechnical Commission (Міжнародна електротехнічна комісія)
- OCPP – Open Charge Point Protocol (Відкритий протокол обміну даними зарядних станцій)
- PCC – Point of Common Coupling (Точка загального приєднання до мережі)
- PHEV – Plug-in Hybrid Electric Vehicle (Гібридний автомобіль з можливістю зарядки)
- SoC – State of Charge (Рівень заряду акумулятора, %)
- SoH – State of Health (Рівень залишкового ресурсу акумулятора, %)
- THD – Total Harmonic Distortion (Сумарний коефіцієнт гармонічних спотворень)
- ToU – Time-of-Use (Тарифікація залежно від часу доби)
- V2G – Vehicle-to-Grid (Технологія двонаправленої передачі енергії «Автомобіль-Мережа»)

АКБ – Акумуляторна батарея
ІПЗ – Індекс пріоритету заряджання
ДВЗ – Двигун внутрішнього згоряння
ЕЗС – Електрична зарядна станція
ЕМ – Електромобіль
ККД – Коефіцієнт корисної дії
НН – Низька напруга (мережі 0,4 кВ)
ОСР – Оператор системи розподілу (обленерго)
ПЗВ – Пристрій захисного відключення
ПЗП – Пристрій захисту від імпульсних перенапруг
ПУЕ – Правила улаштування електроустановок
РП – Робочий проект
СН – Середня напруга (мережі 6–35 кВ)
ТЕО – Техніко-економічне обґрунтування
ФН – Функція належності (в теорії нечіткої логіки)
ШІМ – Широтно-імпульсна модуляція (PWM)

ВСТУП

Актуальність теми. Трансформація транспортного сектора, спрямована скорочення викидів парникових газів та зменшення залежності від викопного палива, зумовила стрімке зростання парку електромобілів у світі, в тому числі і в Україні. За останніми даними, кількість реєстрацій електричних транспортних засобів в Україні перевищила 100 тис. одиниць, демонструючи один із найвищих темпів приросту в Європі. Однак розвиток зарядної інфраструктури та, що важливіше, модернізація розподільчих електричних мереж, значно відстають від продажів таких авто.

Масове та неконтрольоване підключення потужних зарядних станцій (Fast Chargers) до існуючих мереж низької напруги (0,4 кВ) створює низку критичних технічних проблем. Традиційний підхід «Connect & Forget» («Підключи і забудь»), який не передбачає активного керування споживанням, призводить до локальних перевантажень трансформаторних підстанцій, виникнення несиметрії напруг та генерації вищих гармонік струму, що прискорює деградацію силового обладнання. Ситуація ускладнюється в умовах дефіциту генеруючих потужностей та нестабільності енергосистеми України, коли дотримання лімітів споживання стає питанням енергетичної безпеки.

Існуючі методи керування, такі як жорстке обмеження потужності або прості таймери за часом використання (Time-of-Use), є недостатньо ефективними. Вони або дискримінують користувачів, блокуючи доступ до зарядки, або провокують вторинні пікові навантаження («ефект відскоку»). Тому виникає гостра необхідність у розробці адаптивних режимів роботи та інтелектуальних систем керування (Smart Charging), здатних у реальному часі знаходити баланс між обмеженими можливостями мережі та потребами власників електромобілів. Тому питання дослідження зарядної інфраструктури та розробка методів оптимізації режимів її роботи в умовах

обмеженого електропостачання, є своєчасною та актуальною.

Мета і задачі дослідження. *Метою роботи* є підвищення ефективності та надійності функціонування зарядної інфраструктури електромобілів шляхом розробки адаптивної системи керування режимами роботи на основі нечіткої логіки, що забезпечить оптимальний розподіл потужності в умовах мережевих обмежень.

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

- провести комплексний аналіз зарядної інфраструктури та методів керування її режимами її роботи;
- розробити математичні моделі та синтезувати адаптивну систему керування зарядною інфраструктурою;
- провести порівняльне імітаційне моделювання роботи адаптивної системи керування зарядною інфраструктурою;
- розробити імітаційну модель системи електропостачання із зарядною станцією в середовищі Matlab Simulink;
- розробити заходи з охорони праці.

Об'єкт дослідження – процеси перетворення та розподілу електричної енергії в системах зарядної інфраструктури електромобілів.

Предмет дослідження – методи та алгоритми адаптивного керування режимами роботи зарядних станцій в умовах стохастичного навантаження та обмеженої потужності.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених задач у роботі використано комплексний підхід: методи системного аналізу для дослідження стану проблеми та класифікації режимів роботи; теорія електричних кіл для побудови еквівалентних схем; теорія нечітких множин (Fuzzy Logic) для синтезу інтелектуального контролера та обробки невизначеності вхідних даних; методи математичного моделювання для реалізації комп'ютерної моделі в середовищі **Matlab Simulink**.

Наукова цінність роботи полягає у наступному:

- удосконалено метод керування зарядною станцією шляхом введення

дворівневої системи на базі нечіткої логіки, яка, на відміну від існуючих, використовує інтегральний показник «Індекс Пріоритету Заряджання» (ІПЗ), що дозволяє формалізувати процес прийняття рішень в умов невизначеності та забезпечити пріоритетне обслуговування критичних споживачів;

Практична цінність роботи полягає у наступному:

- розроблено та протестовано алгоритм керування, який дозволяє уникнути перевантаження трансформаторного обладнання та знизити споживання електроенергії в години пік на 20%;

- запропонований метод дозволяє збільшити пропускну здатність існуючої зарядної інфраструктури на 12% без необхідності дороговартісної заміни силового обладнання, що має прямий економічний;

- створена імітаційна модель у Matlab Simulink може бути використана для проектування нових зарядних хабів та налаштування параметрів їх роботи.

Структура роботи: кваліфікаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, переліку посилань. Повний обсяг роботи складає 86 сторінок. Основна частина викладена на 74 сторінках друкованого тексту, містить 32 рисунки та 9 таблиць. Список використаних джерел містить 25 джерела та викладений на 3 сторінках.

РОЗДІЛ 1

КОМПЛЕКСНИЙ АНАЛІЗ ЗАРЯДНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ ТА МЕТОДІВ КЕРУВАННЯ ЇЇ РЕЖИМАМИ ЇЇ РОБОТИ

1.1 Тенденції розширення парку електричних транспортних засобів у національному та світовому вимірах

Глобальна трансформація транспортного сектора, що спостерігається протягом останнього десятиліття, характеризується стрімким переходом від двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ) до електричних силових установок. Провідні світові економіки вже закріпили на законодавчому рівні стратегії декарбонізації. Зокрема, держави Європейського Союзу в рамках пакету ініціатив «Fit for 55» задекларували намір припинити реалізацію нових автомобілів на викопному паливі орієнтовно до 2035 року. Аналогічні процеси відбуваються в Азійському регіоні: Китайська Народна Республіка затвердила план, згідно з яким частка транспортних засобів на нових джерелах енергії (NEV) має досягти паритету з традиційними авто (50/50) у структурі продажів до середини наступного десятиліття. У Північній Америці Сполучені Штати встановили цільовий показник електрифікації автопарку на рівні 50% до 2030 року.

Ключовими драйверами такої динаміки виступають не лише екологічні чинники (зменшення вуглецевого сліду та антропогенного навантаження на екосистеми), але й технологічний прогрес у галузі накопичення енергії. Сучасні літій-іонні та літій-залізо-фосфатні акумулятори забезпечують вищу щільність енергії, що дозволяє збільшити запас ходу на одному заряді, нівелюючи так званий «range anxiety» (страх розрядки) у користувачів. Паралельно з цим відбувається еволюція зарядної інфраструктури: впровадження швидкісних станцій постійного струму (DC) дозволяє скоротити час поповнення енергії до прийнятних 20-40 хвилин.

В українських реаліях ринок електромобільності демонструє високу адаптивність навіть в умовах нестабільності. За результатами 2022 року, попри загальні економічні виклики, імпорт електричних транспортних засобів (BEV) продемонстрував приріст на рівні 28%, досягнувши позначки у 11 700 одиниць. Важливим фактором, що стимулював попит в умовах енергетичного дефіциту, стала можливість використання електрокара як мобільного накопичувача енергії. Технології Vehicle-to-Home (V2H) та Vehicle-to-Load (V2L) набули особливої актуальності. Яскравим прикладом є модель Nissan Leaf, яка завдяки порту CHAdeMO та підтримці стандарту UL 9741 здатна виконувати функцію резервного живлення для домогосподарств, що є критично важливим параметром при дослідженні режимів роботи зарядної інфраструктури.

Ретроспективний аналіз динаміки ринку, відображений на рис. 1.1, підтверджує стійкий висхідний тренд реєстрації електроавтомобілів в Україні. Це вимагає від енергосистеми готовності до експоненційного зростання пікових навантажень у вечірні години, коли більшість користувачів підключають транспорт до мережі.

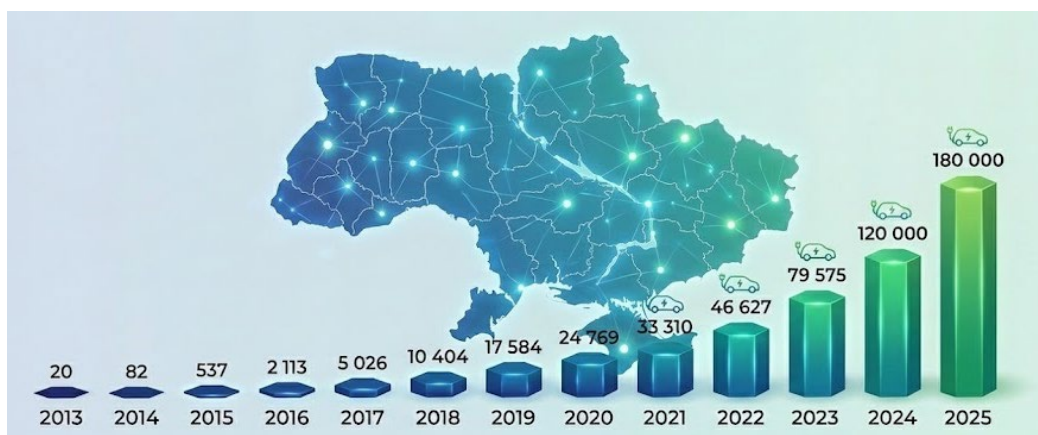


Рис. 1.1. Часова динаміка збільшення кількості реєстрацій EV в Україні

Інтеграція України у світовий контекст електромобільності підтверджується порівняльними даними міжнародних рейтингових агентств. Згідно з оцінкою темпів розгортання інфраструктури та приросту парку

машин, наша держава входить до топ-5 країн із найшвидшою динамікою розвитку галузі. Це створює як можливості для інвестицій, так і технологічні виклики для операторів системи розподілу електроенергії, вирішення яких пропонується у наступних розділах роботи через впровадження адаптивних режимів керування.

1.2 Схемотехнічні рішення та логіка керування зарядною станцією

Об'єктом подальшого розгляду та оптимізації виступає інтелектуальна система керування процесом передачі енергії (Electric Vehicle Supply Equipment – EVSE). Узагальнена структурна схема одного зарядного порта наведена на рис. 1.2. Вона демонструє взаємодію силової частини та логічного контролера.

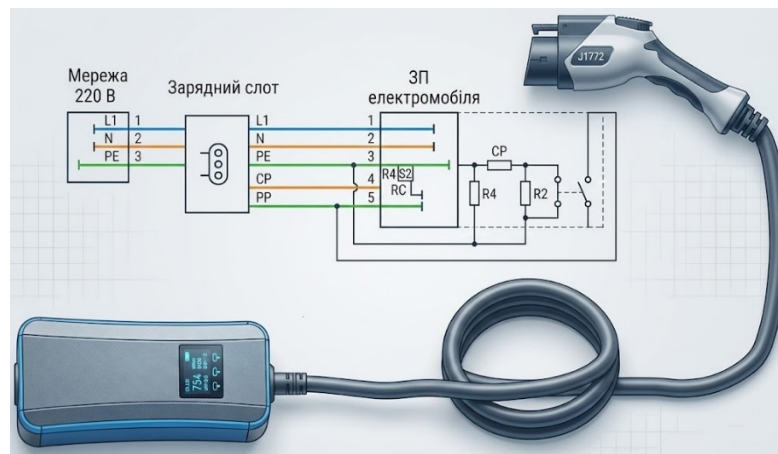


Рис. 1.2. Функціональна блок-схема зарядного модуля

Ключовим елементом системи є контролер заряду (EVSE Controller), який виконує роль посередника між мережею та бортовим зарядним пристроєм (ОБС) електромобіля. Типова компоновка елементів захисту та комутації включає:

- силовий контактор, що фізично замикає коло лише після успішної верифікації підключення;
- диференційний захист (ПЗВ Type B), обов'язковий елемент для

захисту від витоків як змінного, так і постійного струму, що можуть виникати в перетворювачах електромобіля;

- модуль моніторингу енергії: передає дані про споживання на центральний сервер по протоколу OCPP.

Алгоритм керування струмом, що реалізується контролером (схема підключення на рис. 1.3), базується на широтно-імпульсній модуляції (ШІМ) сигналу на лінії Control Pilot.

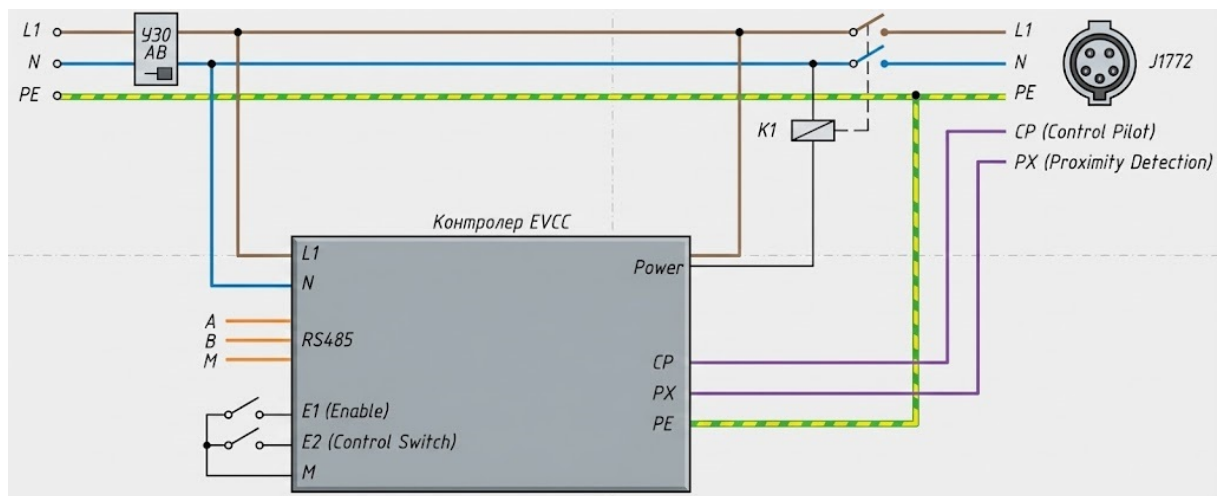


Рис. 1.3. Принципова схема з'єднань контролера EVSE з інтерфейсом автомобіля

Процес узгодження режиму роботи відбувається наступним чином згідно зі стандартом IEC 61851-1 виділяють наступні три стани.

Стан А (очікування). На піні CP присутня постійна напруга +12 В.

Стан В (підключено). При вставленні пістолета, резистивний дільник в автомобілі знижує напругу до +9 В. Відбувається подальше узгодження струму. Контролер подає ШІМ-сигнал частотою 1 кГц. Коефіцієнт заповнення (Duty Cycle) цього сигналу інформує автомобіль про доступну потужність (наприклад, 50% = 30 А). Саме цей параметр доцільно змінювати в пропонуваній адаптивній системі на основі нечіткої логіки.

Стан С (зарядка). Автомобіль готовий прийняти енергію і знижує напругу до +6 В, після чого контролер замикає силові контакти.

Система захисту передбачає автоматичне розмикання кола при втраті заземлення, короткому замиканні або перегріві контактної групи.

1.3 Системно-технічні вимоги та нормативні критерії функціонування зарядної інфраструктури

Проектування та експлуатація сучасних зарядних хабів базується на комплексному підході, що поєднує вимоги електробезпеки, енергоефективності, ергономіки та кіберзахисту. Критичний аналіз нормативної документації дозволяє виділити ключові параметри, які визначають надійність роботи Electric Vehicle Supply Equipment (EVSE) в умовах інтенсивної експлуатації. У рамках даного дослідження вимоги класифіковано за чотирма функціональними групами.

Електромеханічні та конструктивні параметри. Базовою вимогою є забезпечення надійного фізичного з'єднання. Контактна група (SAE J1772 або IEC 62196) повинна витримувати не менше 10 000 циклів з'єднання-роз'єднання без суттєвого зростання перехідного опору.

Розетки Type 2 (Mennekes) повинні мати механічні шторки (Shutter) для захисту від випадкового дотику. Кабельна продукція має зберігати гнучкість при низьких температурах, мати ізоляцію, стійку до ультрафіолету та мастил.

Враховуючи, що більшість ЕЗС встановлюються на вулиці, корпус повинен відповідати ступеню захисту IP54 (захист від пилу та бризок) або IP65. Додатково вводиться вимога до механічної міцності IK08 або IK10 (антивандальний захист), що є критичним для громадських місць. Температурний діапазон експлуатації для України складає від -30°C до $+50^{\circ}\text{C}$.

Для станцій високої потужності (НРС > 150 кВт) обов'язковою є наявність активної системи охолодження кабелів (рідинне охолодження), оскільки пасивного відводу тепла при струмах понад 200 А недостатньо.

Енергетичні показники та електромагнітна сумісність. Оскільки ЕЗС є потужним нелінійним навантаженням, до них висуваються суворі вимоги

щодо якості електроенергії.

В режимі навантаження обладнання повинно забезпечувати стабільну видачу номінальної потужності (Derating curve) без перегріву силових модулів. Станції повинні відповідати стандартам IEC 61000 щодо емісії електромагнітних перешкод. Важливим параметром є коефіцієнт гармонічних спотворень струму (THDi), який не повинен перевищувати 5%, щоб не забруднювати мережу вищими гармоніками. ККД перетворювачів у режимі DC зарядки має становити не менше 95% при повному навантаженні.

Безпека та захист персоналу. Система захисту EVSE є багаторівневою і включає апаратні та програмні засоби.

Диференційний захист. Обов'язкова наявність ПЗВ (RCD) Типу В або Типу А + пристрій виявлення витoku постійного струму (RDC-DD) на рівні 6 мА. Це необхідно для запобігання «осліпленню» захисної автоматики будівлі струмами витoku від батареї електромобіля.

Моніторинг ізоляції (IMD). Для DC станцій без гальванічної розв'язки на виході необхідний постійний контроль опору ізоляції.

Аварійна зупинка. При розриві пілотного сигналу (Control Pilot) або пошкодженні кабелю напруга повинна зніматися з контактів час до 100 мс.

Сучасна зарядна станція – це IoT-пристрій, інтегрований у Smart Grid. Підтримка OCPP (Open Charge Point Protocol) версій 1.6J або 2.0.1 є галузевим стандартом для керування сесіями. Перспективним є впровадження стандарту ISO 15118, який дозволяє реалізувати технологію Plug & Charge (авторизація без карток/додатків, лише через підключення кабелю). Лічильники електроенергії повинні мати сертифікацію MID (Measuring Instruments Directive) для забезпечення комерційної точності розрахунків. Це гарантує прозорість нарахувань кВт·год.. Захист каналів зв'язку (TLS шифрування, VPN) є критичним для запобігання атакам на енергомережу через вразливості зарядних станцій.

Зведені дані щодо основних стандартів, які регламентують роботу ЕЗС, представлено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 Перелік ключових міжнародних стандартів для проектування зарядної інфраструктури

Група стандартів	Позначення	Сфера застосування
Базові вимоги	IEC 61851-1	Загальні вимоги до кондуктивних зарядних систем
Інтерфейси	IEC 62196-1/2/3	Вимоги до вилок, розеток, конекторів та вводів ТЗ
Комунікація	ISO 15118	Протокол високого рівня (V2G, Plug & Charge)
Безпека	IEC 62752	Пристрої захисного відключення (IC-CPD)
ЕМС	IEC 61000-6	Електромагнітна сумісність для промислового середовища

У підсумку можна стверджувати, що існуюча зарядна інфраструктура в Україні розвивається динамічно, проте стикається з викликами уніфікації портів та обмеженої пропускної здатності мереж. Це обґрунтовує доцільність розробки адаптивних режимів керування, які враховуватимуть не лише стан батареї, але й можливості мережі та вимоги стандартів безпеки.

1.4 Концепція побудови систем адаптивного керування зарядною інфраструктурою

Ефективна інтеграція електротранспорту в енергосистему вимагає переходу від пасивного споживання до активної взаємодії з мережею. далі розглядаються фундаментальні принципи побудови систем керування, які базуються на стандартах енергоефективності та технологіях Smart Grid.

Значну роль в реалізації принципів інтелектуального керування навантаження відіграє енергетичний моніторинг. У сучасній науковій літературі та нормативній документації моніторинг інтерпретується як комплексна система перманентного спостереження, аналізу та контролю параметрів об'єкта. Стосовно зарядної інфраструктури, енергетичний моніторинг трансформується з інструменту пасивної реєстрації даних у

ключовий елемент контуру керування, що дозволяє в реальному часі оцінювати стан системи та прогнозувати вектори її зміни.

Інтелектуальний аналіз (Data Mining) масивів даних, отриманих від системи моніторингу, дозволяє вирішити задачу ідентифікації типових профілів навантаження. Формалізація цих процесів є необхідною умовою для переходу до концепції «Smart Charging» (Розумна зарядка).

Масове одночасне підключення електромобілів (EV) створює стохастичне навантаження, яке здатне викликати локальні перевантаження трансформаторного обладнання, особливо у денні та вечірні години пік. Щоб нівелювати цей негативний вплив, організація роботи зарядного хабу повинна базуватися на парадигмі «Активного споживача» (Active Consumer).

У такій моделі цільова функція керування є багатокритеріальною, та включає: оптимізацію енергоспоживання об'єкта з мінімізацією перетоків реактивної потужності та втрат; вирівнювання графіку навантаження, реалізація стратегій «зрізання піків» (Peak Shaving) та «заповнення провалів» (Valley Filling); економічну ефективність, зарядка у періоди дії нічних тарифів.

Основна складність реалізації керованої зарядки полягає у конфлікті інтересів, який вимагає пошуку компромісних рішень. Так інтересом користувача є максимально швидка зарядка (High Power) у зручний час. Інтересом оператора мережі (DSO) є обмеження пікової потужності для збереження стабільності мережі. Також існують технічні обмеження, зокрема договірна потужність приєднання. Перевищення лімітів загрожує штрафними санкціями або повним знеструмленням об'єкта.

Таким чином актуальна задача полягає у розробці системи керування реального часу, яка здатна забезпечити гарантоване заряджання кожного електромобіля, динамічно розподіляючи обмежений ресурс потужності.

Технологічним фундаментом для таких систем виступають рішення Smart Grid, що включають: AMI (Advanced Metering Infrastructure), системи автоматизованого обліку з двостороннім зв'язком; SCADA-системи,

диспетчерське управління та збір даних через захищені канали Internet/VPN; протоколи IoT та використання MQTT або OCPP для передачі команд керування на кінцеві пристрої. Впровадження таких систем дозволяє реалізувати механізми Demand Response (Керування попитом), коли зарядна станція автоматично реагує на команди системного оператора або зміни тарифів, змінюючи уставки струму заряду. Саме здатність системи спостерігати за станом об'єкта (SoC батареї, напруга мережі) та миттєво реагувати на зміни є критичною вимогою, реалізація якої пропонується у цій роботі через використання нечіткої логіки (Fuzzy Logic).

1.5 Аналіз детермінованих алгоритмів керування зарядними сесіями в умовах лімітованої потужності

Однією з найбільш поширених стратегій керування навантаженням в існуючих мережах є застосування детермінованих алгоритмів без елементів прогнозування. Такий підхід базується на жорсткій логіці обмеження споживання при досягненні критичних показників завантаження трансформаторного обладнання.

1.5.1 Алгоритмічна реалізація стратегії пріоритету черги (First-Come-First-Served). Найпростішим методом диспетчеризації зарядних станцій є принцип FCFS (First-Come-First-Served) або FIFO (First-In-First-Out). Суть методу полягає у послідовному наданні доступу до енергетичного ресурсу в порядку хронологічного підключення електромобілів до зарядних портів. Логіка роботи такої системи передбачає безперервний моніторинг сумарної потужності споживання $P_{\Sigma}(t)$. Якщо в момент підключення i -го електромобіля виконується умова $P_{\Sigma} + P_{EV_i} \leq P_{max}$, зарядка дозволяється. В іншому випадку, транспортний засіб ставиться в чергу очікування або отримує відмову в обслуговуванні. У літературі цей підхід розглядається як еталонний завдяки простоті реалізації та відсутності потреби у складних обчислювальних потужностях. Він гарантує, що сумарне навантаження

ніколи не перевищить пропускну здатність мережі, що є критичним для безпеки обладнання.

Проте, з точки зору якості надання послуг (Quality of Service – QoS), цей метод демонструє суттєві недоліки. Він ігнорує такі критичні параметри, як поточний рівень заряду (SoC) батареї; запланований час стоянки (Dwell Time); необхідний обсяг енергії для наступної поїздки.

Це призводить до парадоксальних ситуацій розподілу енергії, відображених на часовій діаграмі (рис. 1.4). Розглянемо сценарій конфлікту двох споживачів. EV1 прибув раніше, має високий залишковий заряд, але планує довгу стоянку. За алгоритмом FCFS він захоплює весь доступний ліміт потужності. EV2 прибув пізніше, має критично низький заряд і обмежений час стоянки. Через блокування потужності першим автомобілем, EV2 змушений очікувати звільнення ресурсу.



Рис. 1.4. Часова діаграма розподілу енергії при некерованому методі (FCFS)

Як видно з графіку, EV2, маючи гостру потребу в енергії, фактично залишається без обслуговування більшу частину часу стоянки, тоді як EV1 споживає енергію, яку міг би отримати пізніше без шкоди для своїх планів. Така нерівномірність розподілу ("дискримінація за часом прибуття") підтверджує неефективність детермінованих методів в умовах дефіциту потужності та обґрунтовує необхідність переходу до інтелектуальних

адаптивних алгоритмів, що є предметом розробки у наступних підрозділах.

1.5.2 Алгоритмічні стратегії диспетчеризації на основі розв'язання задач глобальної оптимізації. Альтернативою простим алгоритмам реагування є застосування централізованих систем керування (Centralized Charging Management Systems – CMS), які розглядають процес заряджання парку електромобілів як задачу математичної оптимізації. Суть підходу полягає у формуванні розкладу зарядних сесій на майбутній період (Time Horizon) таким чином, щоб мінімізувати вартість енергії або пікове навантаження, задовольняючи при цьому технічні обмеження мережі.

Функціональна схема системи керування ЕЗС, що реалізує цей підхід, наведена на рис. 1.5. Вона базується на циклічній взаємодії трьох ключових модулів: модуля збору даних телеметрії, предиктивного аналізатора та оптимізаційного ядра (Solver). На відміну від реактивних методів, така система діє на випередження. Збираючи статистику про поведінку користувачів та параметри мережі, алгоритм намагається передбачити майбутній попит і розподілити потужність так, щоб графік навантаження $P_{\Sigma}(t)$ не виходив за межі дозволеного коридору.

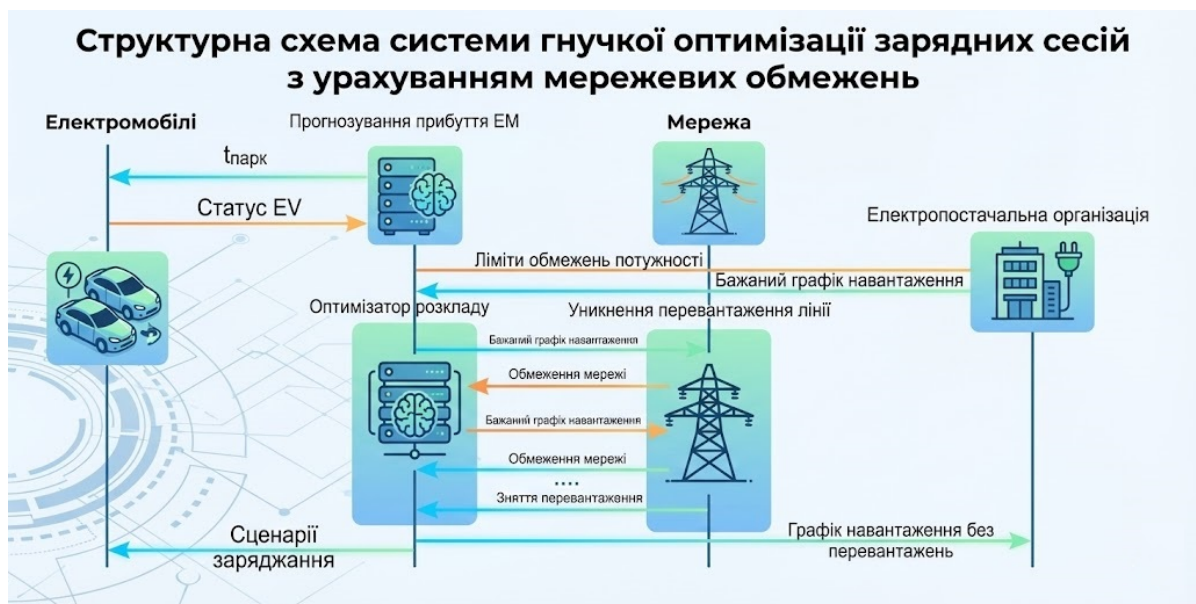


Рис. 1.5. Структурна схема системи гнучкої оптимізації зарядних сесій з урахуванням мережевих обмежень

Ключові функціональні блоки системи включають наступні елементи.

Модуль агрегації даних (Data Acquisition) забезпечує збір даних про профілі поїздок та поточний стан підключених електромобілів.

Предиктивний аналізатор (Forecasting Module) використовує методи машинного навчання або регресійного аналізу для прогнозування часу прибуття нових автомобілів та їхньої потреби в енергії. Це дозволяє сформувати прогнозну криву базового навантаження.

Оптимізаційне ядро (Optimizer) виконує розрахунок індивідуальних графіків зарядки. Математично це зводиться до розв'язання задач лінійного програмування, що використовується для мінімізації вартості зарядки за грошовими витратами або ж квадратичного програмування, що застосовується для мінімізації втрат потужності в мережі (пропорційні I^2).

Інтерфейс взаємодії з DSO забезпечує отримання зовнішніх команд про обмеження потужності або динамічні тарифи.

Ефективність оптимізації критично залежить від повноти та точності вхідних даних. Для кожного i -го електромобіля формується вектор стану S_i , який включає:

t_{arr} (Arrival Time) – час підключення до порту;

t_{dep} (Departure Time) – прогнозований або заявлений час від'їзду;

SoC_{init} – початковий рівень заряду акумуляторної батареї;

E_{req} – необхідна кількість енергії для наступної поїздки;

L_{trip} – пробіг до моменту підключення (для оцінки деградації батареї).

На основі цих даних формується система обмежень. Головна умова полягає в тому, щоб до моменту t_{dep} батарея отримала енергію E_{req} , але сумарна потужність всіх станцій у будь-який момент часу t не перевищувала ліміт трансформатора $P_{max}(t)$:

$$\sum_{i=1}^N P_i(t) \leq P_{max}(t), \quad \forall t \in [t_{start}, t_{end}]$$

Хоча методи глобальної оптимізації дозволяють досягти ідеального розподілу ресурсів теоретично, на практиці вони стикаються з проблемою невизначеності. По-перше, точно передбачити час від'їзду (t_{dep}) вкрай складно: водій може забрати авто раніше запланованого часу, отримавши недозаряджену батарею. По-друге, розв'язання оптимізаційної задачі для великого парку авто вимагає значних обчислювальних ресурсів і часу. Якщо ситуація змінюється (приїхало нове авто), розрахунок повторюється.

Саме цей конфлікт між бажанням мати ідеальний план та неможливістю точно передбачити майбутнє обґрунтовує доцільність використання адаптивних систем реального часу на базі нечіткої логіки (Fuzzy Logic). Такі системи не намагаються скласти ідеальний розклад на добу вперед, а приймають оптимальні рішення "тут і зараз", базуючись на нечітких правилах, що робить їх більш стійкими до випадкових збурень.

1.5.3 Децентралізовані стратегії керування на основі економічних стимулів (Time-of-Use). Альтернативою централізованому керуванню є методи непрямого впливу (Indirect Control), де прийняття рішень делегується кінцевому користувачеві. В основі цього підходу лежить концепція Demand Side Management (DSM) – керування попитом через цінові сигнали.

Метод базується на використанні багатозонних тарифів на електроенергію (Time-of-Use, ToU), де вартість кіловат-години варіюється залежно від часу доби (наприклад, денний та нічний тарифи). Власники електромобілів, діючи як раціональні економічні агенти, прагнуть мінімізувати операційні витрати, плануючи зарядку у періоди меншої ціни.

Математично задача планування для i -го користувача зводиться до пошуку часового вікна τ , яке задовольняє умову:

$$\min C = \int_{t_{start}}^{t_{end}} P(t) \cdot Tariff(t) dt$$

де $P(t)$ – потужність зарядки;

$Tariff(t)$ – функція вартості електроенергії.

Процес розрахунку часових параметрів включає визначення загального

часу підключення ($t_{connect}$) та фактично необхідного часу зарядки (t_{charge}):

$$t_{connect} = t_{dep} - t_{arr}, \quad t_{flex} = t_{connect} - t_{charge}.$$

Параметр t_{flex} характеризує енергетичну гнучкість споживача. Якщо $t_{flex} > 0$, автомобіль може перебувати у стані очікування у години пікового тарифу і активувати зарядку лише при настанні пільгового періоду.

Технічна реалізація цього методу є найпростішою, оскільки не вимагає складних комунікаційних каналів між станцією та диспетчером. Функція "Відкладена зарядка" (Scheduled Charging) вже інтегрована в бортові комп'ютери більшості сучасних електромобілів (Nissan Leaf, Tesla, VW ID.4) або реалізується через побутові розумні розетки.

Незважаючи на економічну привабливість для власника авто, масове використання статичних тарифів ToU створює серйозні ризики для розподільчої мережі. Головним недоліком є відсутність координації між користувачами. Коли тисячі електромобілів запрограмовані на початок зарядки в один і той самий момент (наприклад, о 23:00, коли починає діяти нічний тариф), виникає явище, відоме в теорії керування як "Ефект відскоку" (Rebound Effect) або "Лавинний ефект".

На часовій діаграмі (рис. 1.6) проілюстровано цей процес.

Фаза очікування. З моменту прибуття до 23:00 споживання дорівнює нулю (автомобілі чекають).

Фаза синхронізації. О 23:00 відбувається одночасне включення всіх зарядних пристроїв на повну потужність.

Наслідки. Замість згладжування графіку, мережа отримує новий, ще більш різкий пік навантаження (Super-peak), який може призвести до спрацювання захисної автоматики трансформаторних підстанцій та глибоких просадок напруги.



Рис. 1.6. Формування вторинного піку навантаження ("Rebound Effect") при переході на пільговий тариф

Це доводить, що прості економічні стимули без інтелектуального керування є недостатньо ефективними для великих парків електромобілів. Виникає необхідність у методах, які б автоматично "розмазували" (randomize) початок зарядки у часі. Саме таку задачу здатний вирішити контролер на основі нечіткої логіки, який враховує не лише час доби, але й напругу в мережі, тим самим запобігаючи "лавинному ефекту".

1.6 Аналіз впливу зарядних навантажень на режими роботи та параметри якості електроенергії розподільчих мереж

Інтеграція об'єктів зарядної інфраструктури в існуючу архітектуру системи електропостачання створює низку специфічних викликів для операторів системи розподілу (ОСР). На відміну від традиційних побутових споживачів, зарядні сесії електромобілів характеризуються високою енергоємністю та стохастичним характером, що робить розподільчу мережу "вужьким місцем" енергосистеми.

Аналіз літератури дозволяє стверджувати, що масове некероване підключення електрокарів (Unmanaged Charging) призводить до прискореної

деградації силового обладнання. Ключовими негативними факторами виступають відхилення напруги, перевантаження трансформаторних підстанцій та погіршення показників якості електроенергії (Power Quality), що вимагає детального аналізу для розробки ефективних алгоритмів керування.

1.6.1 Асиметрія напруг та струмів у низьковольтних мережах.

Однією з найбільш гострих проблем при експлуатації комунальних мереж напругою 0,4 кВ є виникнення несиметрії навантаження по фазах. Оскільки переважна більшість приватних зарядних пристроїв (Mode 2 та Mode 3) є однофазними (потужністю 3,7-7,4 кВт), їх випадковий розподіл між фазами А, В і С створює значний дисбаланс, як показано на рис. 1.7.

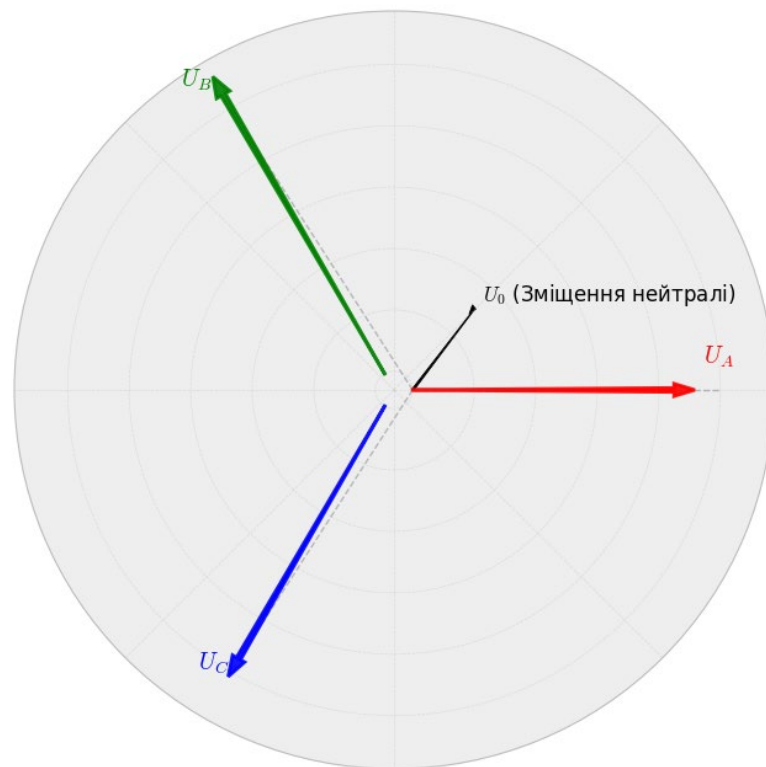


Рис. 1.7. Векторна діаграма напруг при значній несиметрії навантаження

Це явище викликає появу струмів зворотної (I_2) та нульової (I_0) послідовностей. Дослідження методом Монте-Карло демонструють, що навіть при незначному проникненні електромобілів коефіцієнт несиметрії напруги

(K_{2U}) може перевищувати допустимі норми стандарту EN 50160 (2%).

Наслідки асиметрії є критичними для обладнання та виражаються у наступних явищах.

Перевантаження нейтралі. У чотирипровідних мережах геометрична сума струмів не дорівнює нулю, що призводить до протікання значних струмів через нульовий провід. Це викликає його перегрів та підвищує ризик виникнення пожежонебезпечних ситуацій або відгорання "нуля".

Зниження пропускної здатності. Наявність складової зворотної послідовності створює гальмівний момент в асинхронних двигунах споживачів та збільшує втрати активної потужності в лініях електропередач у 6–10 разів порівняно з симетричним режимом.

Зменшення терміну служби трансформаторів. Асиметричне навантаження викликає локальні перегріви активної частини трансформатора, що прискорює старіння паперово-масляної ізоляції за законом Арреніуса (підвищення температури на 6°C скорочує ресурс удвічі).

1.6.2 Генерація вищих гармонік та спотворення синусоїдальності.

Зарядні станції за своєю фізичною природою є нелінійними навантаженнями. Вхідні каскади перетворювачів містять силові ключі (IGBT або MOSFET транзистори) та випрямлячі, що працюють у режимі високочастотної комутації. Це призводить до споживання з мережі несинусоїдального струму та генерації вищих гармонік, що проілюстровано на рис. 1.8.

Рівень спотворень оцінюється коефіцієнтом THD (Total Harmonic Distortion). Для станцій швидкої зарядки (DC Fast Charge), що використовують 6-ти або 12-ти імпульсні схеми випрямлення, характерна наявність канонічних гармонік порядків $n = k \cdot p \pm 1$ (5-та, 7-ма, 11-та, 13-та).

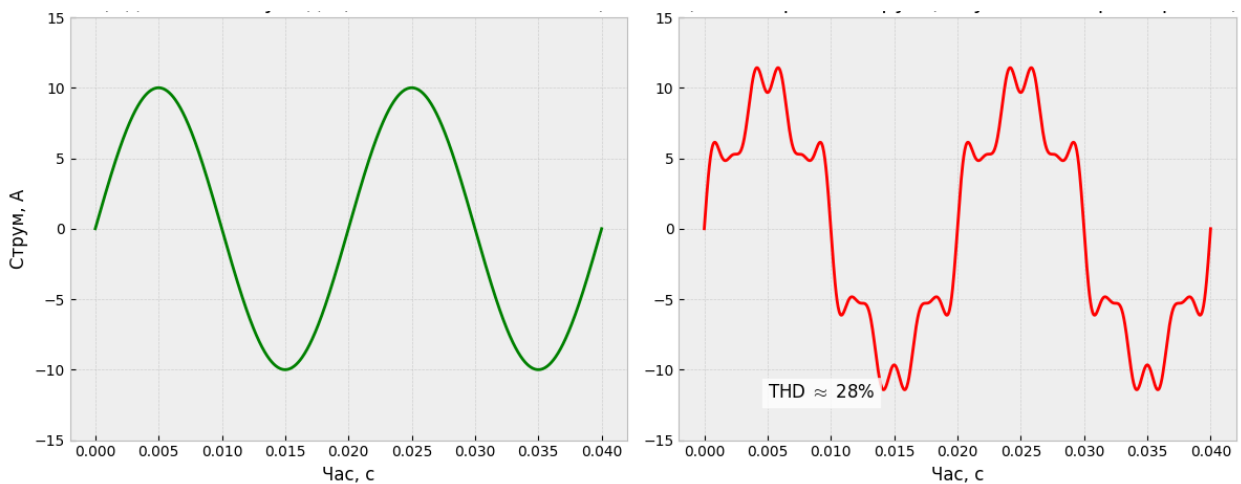
Вплив гармонік на елементи енергосистеми наступний:

- зростання частоти струму призводить до прояву поверхневого ефекту (скін-ефекту) та ефекту близькості, що збільшує активний опір провідників та викликає додаткові втрати потужності ($\Delta P \sim I^2 R$).

- вихрові струми (струми Фуко) в магнітопроводі та обмотках

пропорційні квадрату частоти, що призводить до інтенсивного нагріву. Це змушує знижувати номінальну потужність трансформаторів (Derating) для запобігання аваріям.

- помилкова робота релейного захисту: Сучасні мікропроцесорні та старі електромеханічні реле можуть некоректно інтерпретувати спотворені сигнали, що призводить до хибних спрацювань автоматичних вимикачів та запобіжників, знижуючи надійність електропостачання.



а) ідеальна синусоїда; б) спотворення, викликані роботою імпульсного перетворювача

Рис. 1.8. Осцилограми синусоїдального струму та зі спотвореннями

Окрему загрозу становлять гармоніки, кратні трьом (3-тя, 9-та). У трифазних мережах вони співпадають за фазою і сумуються в нульовому проводі, що може призвести до того, що струм у нейтралі перевищить струм у фазних провідниках навіть при симетричному навантаженні.

Вимоги міжнародного стандарту IEEE 519-2014 жорстко регламентують рівні емісії гармонік у точці загального приєднання (PCC). Проте, при одночасній роботі групи зарядних станцій (Charging Hub), відбувається суперпозиція гармонік, що може призвести до резонансних явищ у мережі, особливо за наявності конденсаторних установок компенсації реактивної потужності.

1.7 Нормативно-правові та технічні аспекти приєднання зарядної інфраструктури до електричних мереж

Процес інтеграції зарядних станцій в енергосистему України регламентується низкою нормативних актів, ключовим з яких є «Кодекс систем розподілу». Оскільки ЕЗС класифікуються як електроустановки підвищеної потужності, їх інсталяція вимагає проходження процедури сертифікації на відповідність національним стандартам безпеки та електромагнітної сумісності.

Згідно з чинними «Правилами приєднання електроустановок до електричних мереж», процедура підключення диференціюється залежно від запитуваної потужності та відстані до точки забезпечення потужності. Для об'єктів зарядної інфраструктури найбільш актуальним є стандартне приєднання, яке поділяється на три ступені:

- перший ступінь: до 16 кВт включно (зазвичай, домашні станції Mode 3 або повільні публічні точки);
- другий ступінь: 16 кВт ... 50 кВт включно (швидкі станції змінного струму або малопотужні DC станції);
- третій ступінь: 50 кВт ... 160 кВт включно (швидкісні хаби постійного струму).

Якщо заявлена потужність перевищує 160 кВт (що характерно для великих зарядних хабів з кількома портами НРС), таке приєднання класифікується як нестандартне і вимагає розробки індивідуального техніко-економічного обґрунтування (ТЕО) з боку оператора системи розподілу.

Отримання Технічних умов (ТУ) є критичним етапом проектування. Електропостачальна організація видає ТУ, виходячи з наявного резерву пропускної здатності трансформаторних підстанцій та ліній електропередач. Важливим аспектом, який безпосередньо стосується теми даного дослідження, є вимога ОСР до автоматичного регулювання потужності.

У години пікових навантажень енергосистеми (ранковий та вечірній

максимуми), ТУ можуть передбачати примусове зниження споживання або повне відключення станції. Це створює передумови для впровадження інтелектуальних систем керування (Smart Charging), які дозволяють уникнути повного відключення шляхом плавного зниження струму зарядки (Load Shedding), що реалізується через алгоритми, які будуть запропоновані у другому розділі роботи.

У випадках, коли об'єкт знаходиться на межі балансової належності, підключення додаткових зарядних портів часто відбувається за рахунок перерозподілу дозволеної потужності існуючого об'єкта, що вимагає впровадження систем динамічного балансування навантаження (Dynamic Load Balancing).

При проектуванні зарядних комплексів доцільно застосовувати стратегію етапного введення в експлуатацію. На початковій стадії рекомендується виконати повний обсяг інженерно-будівельних робіт (прокладання кабельних трас, облаштування фундаментів, заземлення) з урахуванням майбутнього розширення (Phase 2). Це дозволяє мінімізувати капітальні витрати (CAPEX) у майбутньому.

Сучасні мультипортіві станції (Dual/Triple connectors) дозволяють обслуговувати кілька електромобілів одночасно, розподіляючи доступну потужність між ними. Однак, без інтелектуального керування це може призвести до перевищення лімітів вводу. Тому критично важливим є врахування коефіцієнта одночасності та впровадження локальних контролерів черги.

Ефективність роботи зарядної інфраструктури залежить не лише від технічних, а й від організаційних параметрів. Регулювання доступу до зарядних слотів базується на таких принципах:

Пріоритетність функції заряджання. Паркомісце, обладнане EVSE, юридично розглядається як технологічний майданчик для надання послуги зарядки, а не для паркування. Це передбачає впровадження штрафних тарифів (Idle fees) за простою після завершення сесії.

Дискримінаційна нейтральність. Власники публічних (непобутових) ЕЗС зобов'язані забезпечити рівний доступ для всіх користувачів, незалежно від їх членства в клубах чи інших об'єднаннях (принцип роумінгу).

Комерціалізація послуг. Для власників побутових станцій існує правова відмінність між особистим використанням та наданням послуг третім особам. Останнє класифікується як підприємницька діяльність і вимагає відповідного податкового оформлення та використання сертифікованих комерційних лічильників (MID).

Висновки до розділу 1

У першому розділі роботи проведено системний аналіз сучасного стану розвитку електротранспорту, технічних засобів зарядної інфраструктури та існуючих підходів до керування процесами заряджання. За результатами дослідження зроблено наступні висновки.

Встановлено, що стрімка електрифікація транспорту в Україні (приріст парку понад 28% на рік) випереджає темпи модернізації розподільчих мереж. Це створює загрозу перевантаження силового обладнання, особливо у вечірні години пік, коли накладання побутового навантаження та некерованої зарядки призводить до дефіциту потужності.

Аналіз схемотехнічних рішень (EVSE) та нормативної бази (стандарти IEC 61851, ISO 15118) показав, що сучасні станції мають апаратну можливість для реалізації інтелектуального керування (через ШІМ-сигнал на лінії Control Pilot). Проте на практиці більшість систем працює за пасивним сценарієм, ігноруючи стан енергосистеми.

Критичний аналіз детермінованих методів керування виявив їх суттєві недоліки: метод FCFS («Перший прийшов») призводить до дискримінації користувачів, блокуючи доступ до зарядки для тих, хто прибув пізніше, але має критичну потребу в енергії; метод Time-of-Use (Таймери) провокує явище «Ефекту відскоку» (Rebound Effect) – виникнення вторинних, ще

більш небезпечних піків навантаження у момент початку дії пільгового тарифу; централізована оптимізація ускладнена через стохастичність поведінки водіїв та високі вимоги до точності прогнозування.

Обґрунтовано, що зарядна станція як потужне нелінійне навантаження негативно впливає на параметри мережі, викликаючи генерацію вищих гармонік струму та несиметрію напруг у низьковольтних мережах. Це диктує необхідність врахування показників якості електроенергії як обмежень при проектуванні системи керування.

Традиційні підходи до організації зарядної інфраструктури не забезпечують необхідного балансу між комфортом користувачів та надійністю електропостачання. Вирішення цієї проблеми вимагає переходу до адаптивних систем керування реального часу, які здатні приймати гнучкі рішення в умовах невизначеності. Найбільш перспективним інструментом для реалізації такої системи є апарат нечіткої логіки (Fuzzy Logic), розробці якого буде присвячено наступні розділи роботи.

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ТА СИНТЕЗ АДАПТИВНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЗАРЯДНОЮ ІНФРАСТРУКТУРОЮ

2.1 Математичне моделювання електроенергетичних процесів взаємодії зарядної станції та електромобіля

Розробка адаптивного алгоритму керування неможлива без формалізації об'єкта керування. Для коректної роботи нечіткого контролера (Fuzzy Controller) необхідно мати математичну модель, яка описує динаміку зміни параметрів акумуляторної батареї (АКБ) в процесі передачі енергії.

2.1.1 Еквівалентна схема заміщення та рівняння стану акумуляторної батареї. У задачах керування енергопотоками в реальному часі використання складних електрохімічних моделей є недоцільним через високу обчислювальну складність. В роботі батарея електромобіля представлена у вигляді спрощеної електричної схеми заміщення.

Структурна схема силового каналу "Мережа – Зарядний пристрій – Електромобіль" наведена на рис. 2.1.

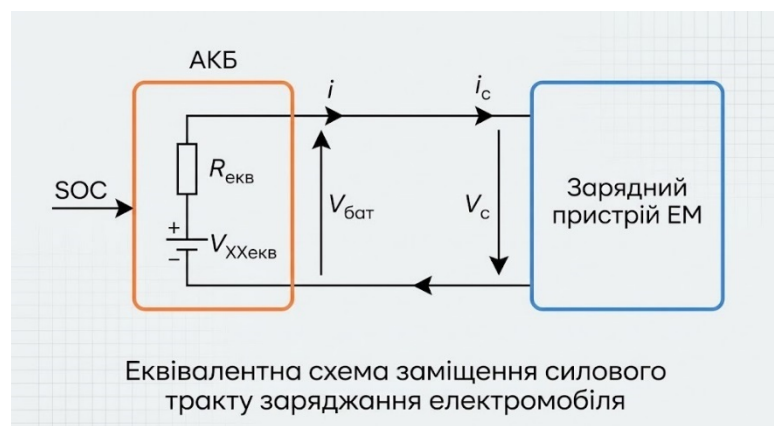


Рис. 2.1. Еквівалентна схема заміщення силового кола зарядання

Математично модель описується системою алгебраїчних рівнянь. Напряга на клеммах акумулятора U_{bat} визначається як сума електрорушійної сили (ЕРС) розімкненого кола E_{OCV} та падіння напруги на внутрішньому еквівалентному опорі R_{int} :

$$U_{bat}(t) = E_{OCV}(SoC) + I(t) \cdot R_{int}$$

де $I(t)$ – миттєве значення зарядного струму.

Варто зазначити, що E_{OCV} є нелінійною функцією від ступеня зарядженості (SoC), а R_{int} залежить від температури та струму, проте в рамках даної моделі ми приймаємо його умовно постійним для спрощення.

Ключовим параметром для системи керування є State of Charge (SoC) – рівень заряду, який визначає здатність батареї приймати енергію. Динаміка зміни SoC у дискретному часі k описується методом підрахунку кулонів:

$$SoC(k+1) = SoC(k) + \frac{\Delta Q(k)}{Q_{nom}} \cdot 100\%$$

де Q_{nom} - номінальна ємність батареї (А·год), а приріст заряду $\Delta Q(k)$ за період дискретизації Δt визначається як:

$$\Delta Q(k) = \int_t^{t+\Delta t} I(\tau) \eta_{bat} d\tau \approx I(k) \cdot \Delta t \cdot \eta_{bat}$$

де η_{bat} - кулонівська ефективність батареї (зазвичай $\approx 0,99$ для Li-ion).

Баланс потужностей у системі описується рівняннями перетворення енергії. Потужність постійного струму, що надходить безпосередньо в хімічне джерело струму (P_{DC}), та активна потужність, що споживається з мережі змінного струму (P_{AC}), пов'язані через ККД перетворювача η_{conv} :

$$P_{DC}(t) = U_{bat}(t) \cdot I(t), \quad P_{AC}(t) = U_{grid} \cdot I_{grid}(t) = \frac{P_{DC}(t)}{\eta_{conv}}$$

З урахуванням попередніх рівнянь можна вивести залежність необхідного струму заряду $I(SoC)$ від доступної потужності мережі, що є основою для алгоритму обмеження навантаження:

$$I(SoC) = \frac{\eta_{conv} \cdot P_{AC}}{E_{OCV}(SoC) + I \cdot R_{int}} \approx \frac{\eta_{conv} \cdot U_{grid} \cdot I_{grid}}{U_{bat}(SoC)}$$

Це рівняння дозволяє контролеру розрахувати, який струм встановити на зарядному пристрої, щоб не перевищити ліміт споживання з мережі.

2.1.2 Алгоритмічна реалізація стандартного профілю заряду CC/CV.

Базовим алгоритмом, який закладено в систему керування будь-якого літій-іонного акумулятора (BMS), є метод CC/CV (Constant Current / Constant Voltage). Розуміння цього профілю є критичним, оскільки він накладає жорсткі обмеження на можливість регулювання потужності. Процес заряду поділяється на дві фази, які проілюстровані на рис. 2.2.

Перша фаза стабілізації струму (Constant Current – CC) – це основний етап, на якому батарея набирає до 70-80% ємності. Зарядний пристрій підтримує стабільний струм I_{const} (наприклад, 32 А), а напруга на клеммах U_{bat} плавно зростає слідом за зростанням ЕРС. Саме на цьому етапі можливе ефективне регулювання навантаження мережі шляхом зміни величини I_{const} .

Друга фаза стабілізації напруги (Constant Voltage – CV) це період коли напруга досягає порогового значення U_{max} (зазвичай 4,2 В на комірку), BMS перемикає режим. Напруга фіксується на рівні U_{max} для запобігання деградації електроліту та перегріву, а струм починає експоненційно спадати.

На цьому етапі можливості регулювання обмежені, оскільки струм визначається фізико-хімічними процесами всередині батареї, а не командою.

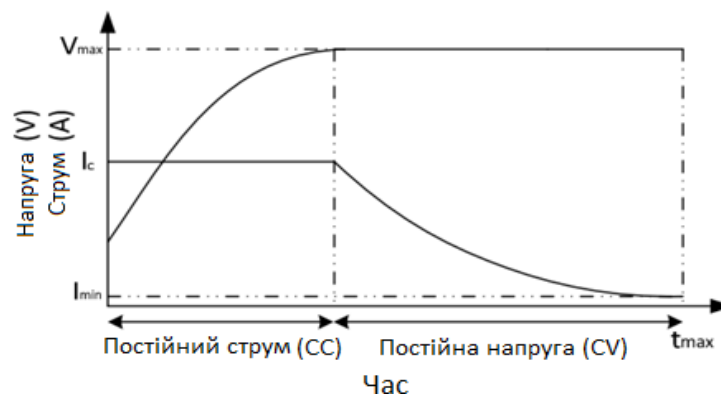


Рис. 2.2. Динаміка зміни струму та напруги у циклі заряду Li-іон акумулятора

Математично перехід між режимами можна описати логічною умовою:

$$I_{charge}(t) = \begin{cases} I_{ref}, & \text{якщо } U_{bat} < U_{max} \quad (\text{Режим CC}) \\ (U_{max} - E_{OCV}(SoC)) / R_{int}, & \text{якщо } U_{bat} \geq U_{max} \quad (\text{Режим CV}) \end{cases}$$

Процес завершується (Terminating condition), коли струм у фазі CV падає нижче мінімального порогу I_{min} (зазвичай 0,05 C).

У запропонованій далі системі нечіткого керування пропонується впливати саме на параметр I_{ref} у фазі CC, адаптуючи його під поточні можливості мережі, тоді як фаза CV розглядатиметься як некероване навантаження.

2.2 Концептуальні засади запропонованого підходу на базі нечіткої логіки

Процес функціонування зарядної інфраструктури характеризується високим рівнем невизначеності: кількість електромобілів (EV), час їхнього прибуття, початковий рівень заряду та тривалість стоянки є стохастичними величинами, що не підлягають чіткому детермінованому опису.

З огляду на це, в якості математичного апарату для розробки системи керування обрано нечітку логіку (Fuzzy Logic). На відміну від класичних методів, цей підхід дозволяє формалізувати експертні знання та приймати ефективні рішення в умовах неповної інформації, оперуючи лінгвістичними змінними (наприклад, «низький заряд», «мало часу»).

Запропонована структура системи керування ЕЗС (рис. 2.3) реалізує дворівневий підхід до розподілу енергетичних ресурсів. Система базується на нечіткій експертній системі, здатна враховувати технічні обмеження розподільчої мережі, інтереси користувачів електромобілів. Робота системи відбувається в реальному часі. Ключовою особливістю методу є введення поняття Індексу Пріоритету Заряджання (ІПЗ) або *Charging Priority Index*.



Рис. 2.3. Структурна схема запропонованої системи керування ЕЗС

Алгоритм керування складається з двох послідовних етапів:

Етап 1 (Локальний рівень / Fuzzy Inference). Для кожного i -го електромобіля індивідуально розраховується пріоритет (ІПЗ) на основі його поточного стану. Вхідними даними для цього розрахунку є: W_{req} (необхідна енергія) – кількість енергії (кВт·год), необхідна для досягнення цільового рівня заряду; SoC (State of Charge) – поточний рівень заряду акумуляторної батареї (%); t_{park} (час паркування) – заявлений або прогнозований час, що залишився до від'їзду.

Етап 2 (Глобальний рівень / Power Allocation). Центральний контролер збирає індекси ІПЗ від усіх активних слотів і розподіляє доступну потужність мережі (P_{grid}^{max}) пропорційно до цих індексів.

Такий підхід забезпечує більш рівномірний розподіл енергії, мінімізує пікові навантаження та гарантує, що автомобілі з критичною потребою в енергії отримають її першочергово, навіть в умовах дефіциту потужності.

2.3 Синтез нечіткого контролера для розрахунку Індексу пріоритетності заряджання

Для реалізації першого етапу керування розроблено нечіткий контролер (Fuzzy Logic Controller – FLC) типу Мамдані. Процес фазифікації передбачає перетворення чітких фізичних величин у лінгвістичні змінні за допомогою функцій належності (Membership Functions).

Вхідна змінна 1. Рівень заряду (SoC). Визначає ступінь "насичення" батареї енергією. Чим нижчий рівень заряду, тим вищий пріоритет обслуговування повинен отримати електромобіль.

Діапазон: 0...100 %. *Терми:* L (Low / Низький): Трапецієподібна функція (0-30%), відповідає критичному стану батареї; M (Medium / Середній): Трикутна функція (25-75%), робочий діапазон; H (High / Високий): Трапецієподібна функція (70-100%). Батарея майже заряджена, пріоритет знижується.

Вхідна змінна 2. Запас часу (T_{rem}). Визначається як відношення часу стоянки до мінімально необхідного часу зарядки ($t_{park} / t_{charge}^{min}$).

Діапазон: 0...9 годин. *Терми:* Short (Мало): користувач поспішає, необхідна максимальна швидкість; Average (Середньо): стандартна стоянка (наприклад, робочий день); Long (Багато): автомобіль залишено на довгий час (нічна зарядка).

Вхідна змінна 3. Ціна електроенергії ($Price$). Враховує поточний тариф для економічної оптимізації. *Терми:* Cheap (Низька / Нічний тариф); Expensive (Висока / Піковий тариф).

Вихідна змінна Index (ІІЗ) є безрозмірною величиною, що визначає пріоритет доступу до енергетичного ресурсу.

Діапазон: 0...1 (де 1 – максимальний пріоритет, 0 – мінімальний).

Терми: VL (Very Low): зарядка може бути відкладена або зупинена; L (Low): фоновий зарядка малим струмом; M (Medium): стандартний режим; H (High): прискорений режим; VH (Very High): критичний режим (Maximum Power).

Наступним етапом необхідно сформуванати базу нечітких правил (Rule Base). Логіка роботи контролера описується набором правил «ЯКЩО – ТО» (IF-THEN). Фрагмент розробленої бази знань наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 Матриця правил нечіткого виведення

№	Якщо SoC	І час (T_{rem})	І ціна ($Price$)	ТО Пріоритет (ППЗ)	Пояснення логіки
1	Low	Short	Any	Very High	Критична ситуація: батарея пуста, часу мало. Ціна ігнорується.
2	Low	Long	Cheap	High	Батарея пуста, є час, тариф вигідний. Заряджаємо інтенсивно.
3	Low	Long	Exp.	Medium	Батарея пуста, є час, але дорого. Знижуємо швидкість.
4	High	Any	Exp.	Very Low	Батарея повна, дорого. Можна відключити або перевести в режим очікування.
5	Medium	Average	Cheap	High	Стандартна ситуація, вигідний тариф.

Наступним етапом відбувається дефазифікація. Для отримання чіткого значення ППЗ на виході контролера використовується метод Центру Тяжіння (Centroid method). Це дозволяє отримати плавну характеристику керування, що є важливим для стабільності роботи силових перетворювачів.

Математично значення індексу (y^*) визначається як:

$$y^* = \frac{\int \mu_C(y) \cdot y \, dy}{\int \mu_C(y) \, dy}$$

де $\mu_C(y)$ – функція належності вихідної змінної після агрегації правил.

Після отримання індексів k_i (де k_i – це розрахований ППЗ) для кожного i -го електромобіля, система розподіляє доступну потужність мережі $P_{grid}(t)$ між активними слотами.

Алгоритм розподілу описується формулою:

$$P_i(t) = P_{grid}(t) \cdot \frac{k_i(t)}{\sum_{j=1}^N k_j(t)}$$

де: $P_i(t)$ – потужність, виділена i -му електромобілю;

$P_{grid}(t)$ – поточна доступна потужність трансформатора (з урахуванням базового навантаження підприємства);

N – загальна кількість підключених електромобілів.

Такий алгоритм гарантує виконання двох умов:

- безпека мережі, сумарне споживання $\sum P_i$ ніколи не перевищить ліміт P_{grid} ;
- справедливість, кожен користувач отримує частку енергії, що відповідає його реальній потребі (ППЗ), а не просто часу прибуття на станцію.

2.4 Побудова архітектури нечіткої системи виведення

Реалізація запропонованого методу керування передбачає інтеграцію нечіткого контролера в контур керування зарядною станцією. Процес прийняття рішень розділено на два ієрархічні рівні: локальний розрахунок пріоритетів та глобальний розподіл потужності.

На першому етапі ініціалізації зарядної сесії відбувається обмін інформацією між електромобілем та зарядною станцією (відповідно до протоколу ISO 15118). Власник або бортова система керування (BMS) передає ключові параметри: t_{park} планована тривалість стоянки; SoC_{target} бажаний кінцевий рівень заряду (за замовчуванням 100%).

На основі цих даних контролер розраховує похідні фізичні величини, необхідні для роботи фазі-системи:

Необхідна енергія (W_{req}):

$$W_{req} = (SoC_{target} - SoC_{curr}) \cdot E_{bat}^{nom}.$$

Необхідна середня потужність:

$$(P_{avg}): P_{avg} = \frac{W_{req}}{t_{park}}.$$

На відміну від стохастичних алгоритмів планування, даний підхід оперує детермінованими даними в реальному часі, що мінімізує

невизначеність на етапі вводу даних.

Ядром системи керування є нечіткий контролер (Fuzzy Controller), структура якого представлена на рис. 2.4. Обробка інформації відбувається у чотири послідовні етапи/

Блок фазифікації (*Fuzzification Interface*) перетворює чіткі числові значення вхідних змінних (W_{req} , P_{avg} , t_{park}) у вектор лінгвістичних змінних за допомогою функцій належності (Membership Functions). Наприклад, час паркування 30 хвилин перетворюється у терм «Мало» (Short) зі ступенем впевненості $\mu = 0,8$.

База правил (*Rule Base*) містить набір експертних правил типу «ЯКЩО-ТО», які описують стратегію керування. Наприклад: «ЯКЩО енергії треба багато І часу мало, ТО пріоритет Дуже Високий».

Блок логічного виведення (*Inference Engine*) здійснює агрегацію правил. Для кожного правила визначається ступінь його виконання (зазвичай через операцію MIN), а потім результати всіх активних правил об'єднуються (через операцію MAX) для формування результуючої нечіткої множини виходу.



Рис. 2.4. Внутрішня структура системи нечіткого виведення

Блок дефазифікації (Defuzzification Interface) перетворює отриману нечітку множину назад у чітке числове значення – Індекс Пріоритету Заряджання (ІПЗ). У даній роботі використовується метод центру тяжіння (Centroid), який забезпечує найбільш плавну характеристику регулювання.

Отриманий на виході блоку дефазифікації Індекс (число від 0 до 1) передається на другий етап алгоритму – блок розподілу потужності, де відбувається фізичне керування струмом зарядки конкретного слоту.

2.5 Математична формалізація функцій належності та обґрунтування бази терм-множин

Ефективність роботи нечіткого контролера (FLC) критично залежить від етапу фазифікації – процесу відображення чітких значень вхідних сигналів у простір лінгвістичних змінних. Цей процес базується на функціях належності (Membership Functions – MF), які визначають ступінь впевненості $\mu(x)$, з якою конкретне фізичне значення належить до того чи іншого нечіткого терму.

У контексті даної роботи нечітка множина \tilde{A} на універсальній множині X визначається як сукупність впорядкованих пар виду:

$$\tilde{A} = \{(x, \mu_A(x)) \mid x \in X\}$$

де $\mu_A : X \rightarrow [0,1]$ – функція належності.

Значення $\mu_A(x) = 1$ вказує на повну належність елемента до множини (ядро), $\mu_A(x) = 0$ – на відсутність належності, а проміжні значення $0 < \mu_A(x) < 1$ характеризують нечіткість граничних умов.

Для дискретної області визначення $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, нечітка множина може бути представлена у вигляді символічного запису, де знак суми позначає об'єднання елементів, а не арифметичне додавання:

$$\tilde{A} = \sum_{i=1}^n \frac{\mu_A(x_i)}{x_i} = \frac{\mu_A(x_1)}{x_1} + \frac{\mu_A(x_2)}{x_2} + \dots + \frac{\mu_A(x_n)}{x_n}$$

Вибір форми функцій належності здійснювався на основі прямих

експертних методів, виходячи з характеру фізичних процесів заряджання. Для опису змінних використано два типи функцій: трикутні (Triangular) та трапецієподібні (Trapezoidal).

Трикутна функція належності (*trimf*) доцільна для опису станів, що мають чітко виражений пік (наприклад, "Середня потужність"). Вона описується виразом:

$$\mu_{trimf}(x; a, b, c) = \max\left(0, \min\left(\frac{x-a}{b-a}, \frac{c-x}{c-b}\right)\right) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x \leq c \\ 0, & x \geq c \end{cases}$$

Трапецієподібна функція належності (*trapmf*) використовується для опису інтервальних значень, де певна властивість зберігається незмінною протягом певного діапазону (наприклад, "Дуже високий заряд"). Її аналітичний вигляд:

$$\mu_{trapmf}(x; a, b, c, d) = \max\left(0, \min\left(\frac{x-a}{b-a}, 1, \frac{d-x}{d-c}\right)\right)$$

де параметри $\{a, b, c, d\}$ визначають абсциси вершин трапеції, формуючи ядро $[b, c]$ та носій (a, d) нечіткої множини.

2.6 Параметричний синтез нечіткої моделі на прикладі Nissan Leaf

Для забезпечення адекватності моделі реальним умовам експлуатації, налаштування діапазонів вхідних змінних виконано на основі технічних характеристик електромобіля Nissan Leaf (ZE0/AZE0), який є найпоширенішим в Україні.

Як базовий об'єкт моделювання обрано батарею номінальною ємністю $E_{bat} = 24$ кВт·год (доступна ємність $\approx 21,4$ кВт·год) та бортовий зарядний пристрій (ОВС) потужністю до 6,6 кВт.

Змінна 1: Необхідна енергія (W_{req}).

Фізичний зміст: Кількість енергії, яку необхідно передати в АКБ для досягнення цільового SoC.

Діапазон: [0 ... 22] кВт·год.

Терм-множина: Складається з 4-х термів (Дуже мала, Мала, Середня, Велика). Параметри функцій наведено в таблиці 2.2. Використання трапецієподібних функцій на краях діапазону дозволяє перекрити граничні стани (повністю розряджена або майже заряджена батарея).

Таблиця 2.2 Параметри налаштування функцій належності

Лінгвістична змінна	Тип функції	Терм (Назва)	Параметри діапазону (Вектор [a, b, c, d])
W_{req} (Енергія), кВт·год	Трапеція	Very Low (Дуже мала)	0...3,5
		Low (Мала)	5...7,5
		Medium (Середня)	10...13
		High (Велика)	16...22
P_{ch} (Потужність), кВт	Трапеція	Low (Низька 3.3 кВт)	2.9...3,6
		High (Висока 6.6 кВт)	6,5...7,2
t_{park} (Час), хв	Трапеція	Very Short	0...75
		Short	122...180
		Medium	240...300
		Long	360...420
		Very Long	460...540
ІІЗ (Індекс), в.о.	Трикутн.	Very Low	0,5
		Low	0,25
		Medium	0,45
		High	0,7
		Very High	1

Змінна 2: Потужність заряджання (P_{ch})

Фізичний зміст: Номінальна потужність бортового чарджера авто.

Діапазон: [0 ... 7.2] кВт.

Особливість: Nissan Leaf комплектується модулями на 3.3 кВт (комплектація S) або 6.6 кВт (SV/SL). Тому функції належності мають чітко

виражені ядра навколо цих значень (рис. 3.8).

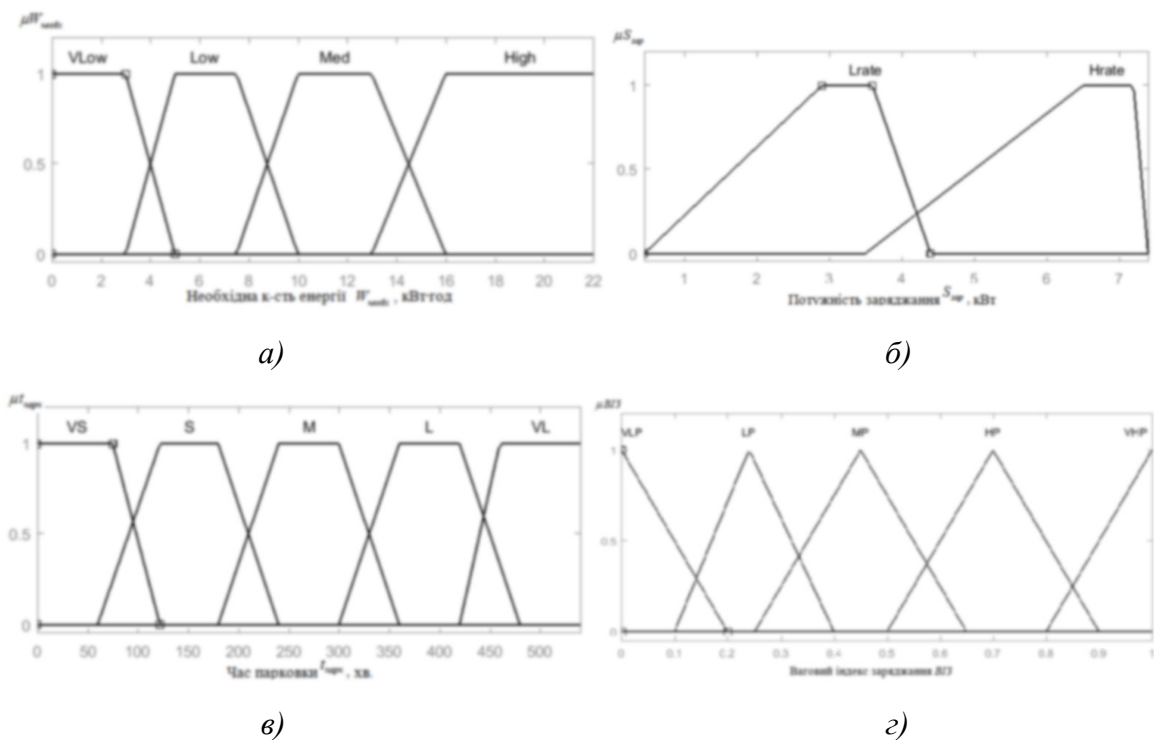
Змінна 3: Час паркування (t_{park})

Фізичний зміст: Час доступності авто для зарядки.

Діапазон: [0 ... 540] хвилин (до 9 годин).

Обґрунтування: Максимальний час 9 годин обрано виходячи з тривалості повного циклу зарядки (Mode 3, 3.5 кВт) у зимовий період, коли швидкість хімічних реакцій сповільнюється.

На рис. 2.5 приведені графіки функцій належності для трьох вхідних та одного вихідного сингалу, які були побудовані за даними табл. 2.2



а) необхідна кількість енергії, б) потужність заряджання, в) час паркування, г) індекс ПЗ

Рис. 2.5. Функції належності вхідних та вихідного сигналів

2.7 Формування бази правил та аналіз поверхні керування

Ядром нечіткого контролера є база знань, яка формується на основі експертного досвіду та результатів експериментальних досліджень. Вона встановлює логічний зв'язок між вектором вхідних параметрів (енергія,

потужність, час) та вихідною змінною (пріоритет заряджання).

Процес прийняття рішень реалізовано за алгоритмом Мамдані (Mamdani inference), який базується на лінгвістичних правилах виду «ЯКЩО – ТО» (IF – THEN). Загальна структура k -го правила має вигляд:

$$R_k : \text{IF } (x_1 \text{ is } A_{1k}) \text{ AND } \dots \text{ AND } (x_n \text{ is } A_{nk}) \text{ THEN } (y \text{ is } B_k)$$

Для агрегації умов (оператор AND) використано мінімум-імплікацію (Min-operator), що забезпечує «відсікання» функції належності вихідної змінної на рівні істинності передумови. Математично ступінь належності вихідного терму $\mu_{v_{IZ}}$ для поточного набору входів визначається як перетин (intersection) вхідних функцій:

$$\mu_{v_{IZ}}(EM_i) = \min(\mu_{w_{req}}(EM_i), \mu_{P_{ch}}(EM_i), \mu_{t_{park}}(EM_i)) \quad (3.11)$$

де $\mu_{w_{req}}, \mu_{P_{ch}}, \mu_{t_{park}}$ – ступені належності конкретних значень вхідних змінних до відповідних термів.

Розроблена база знань містить 40 правил, які покривають весь простір можливих станів системи. Для зручності аналізу правила згруповано у дві матриці залежно від потужності бортового зарядного пристрою (P_{ch}) та занесені до таблиць 2.3 і 2.4.

У таблицях використано такі скорочення для термів пріоритету (ІПЗ):
 ДНП (VL) – Дуже Низький Пріоритет (Index ≈ 0.1);
 НП (L) – Низький Пріоритет (Index ≈ 0.3);
 СП (M) – Середній Пріоритет (Index ≈ 0.5);
 ВП (H) – Високий Пріоритет (Index ≈ 0.7);
 ДВП (VH) – Дуже Високий Пріоритет (Index ≈ 0.9).

Таблиця 2.3 Матриця правил для авто з низькою потужністю зарядки

Необхідна енергія (w_{req}) ↓ / Час (t_{park}) →	Дуже короткий	Короткий	Середній	Довгий	Дуже довгий
Дуже мала	СП (0.5)	СП (0.5)	НП (0.3)	ДНП (0.1)	ДНП (0.1)
Мала	ВП (0.7)	СП (0.5)	СП (0.5)	НП (0.3)	ДНП (0.1)
Середня	ДВП (0.9)	ВП (0.7)	ВП (0.7)	СП (0.5)	НП (0.3)
Велика	ДВП (1.0)	ДВП (0.9)	ВП (0.7)	СП (0.5)	СП (0.5)

Для електромобілів зі слабким зарядним пристроєм (3,3 кВт) пріоритет штучно завищується у зонах "Короткого часу", оскільки фізично обмежена швидкість зарядки вимагає негайного початку процесу, щоб встигнути зарядити батарею.

Таблиця 2.4 Матриця правил для авто з високою потужністю зарядки

Необхідна енергія (W_{req}) ↓ / Час (t_{park}) →	Дуже короткий	Короткий	Середній	Довгий	Дуже довгий
Дуже мала	СП (0.5)	СП (0.5)	НП (0.3)	ДНП (0.1)	ДНП (0.1)
Мала	ВП (0.7)	СП (0.5)	СП (0.5)	НП (0.3)	ДНП (0.1)
Середня	ДВП (0.9)	ВП (0.7)	ВП (0.7)	СП (0.5)	НП (0.3)
Велика	ДВП (0.9)	ДВП (0.9)	ВП (0.7)	СП (0.5)	СП (0.5)

Автомобілі з потужним зарядним модулем (6,6 кВт) мають більшу гнучкість. Навіть при "Середньому" часі паркування їх пріоритет може бути знижений до "Середнього" або "Низького", оскільки вони здатні швидко добрати енергію в кінці стоянки, звільняючи потужність мережі для слабших споживачів.

Для верифікації коректності налаштування бази правил було згенеровано тривимірну поверхню відгуку системи (Control Surface) засобами *Matlab Fuzzy Logic Toolbox*. Аналіз поверхні показує, що залежність вихідної змінної (ІПЗ) від вхідних параметрів є монотонною та логічною:

- при наближенні W_{req} до максимуму (22 кВт·год) та t_{park} до мінімуму, поверхня різко піднімається до значення ІПЗ = 1 (критичний пріоритет);
- при збільшенні часу парковки t_{park} , площина плавно спадає, що свідчить про зниження пріоритету, оскільки система має запас часу для балансування навантаження.

Така конфігурація забезпечує стійкість системи керування та відсутність осциляцій при переході між сусідніми правилами.

Графічною інтерпретацією бази правил є поверхня керування (Control Surface) – тривимірний графік, що відображає залежність виходу від двох

вхідних змінних.

На рис. 2.6 наведено поверхню залежності ІПЗ від *Необхідної енергії* (W_{req}) та *Часу паркування* (t_{park}).

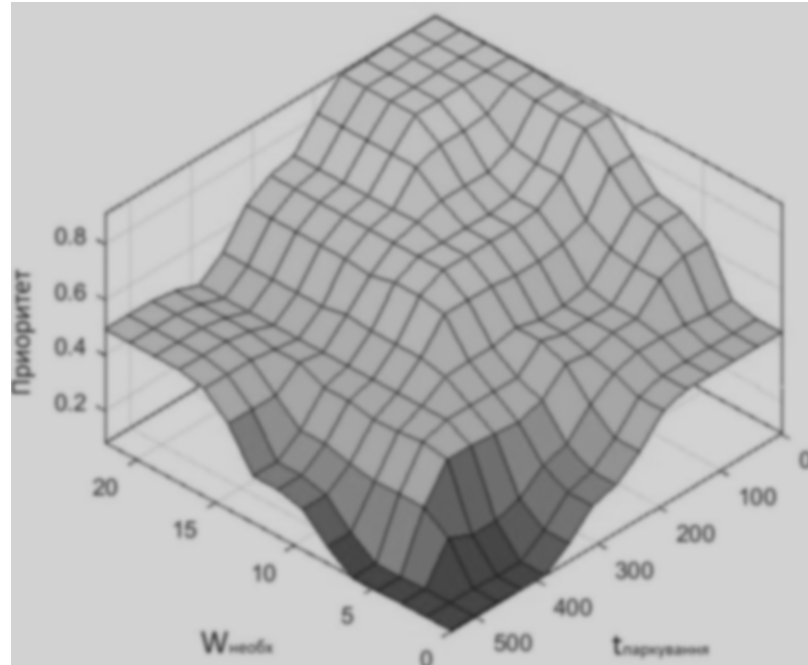


Рис. 2.6. Тривимірна поверхня керування нечіткого контролера: залежність Індексу пріорітетності зарядки від енергії та часу

Аналіз поверхні дозволяє зробити висновки про адекватність налаштування системи.

1. *Зона критичного пріоритету (жовта зона)*. Спостерігається в області, де $W_{req} \rightarrow Max$ (22 кВт·год), а $t_{park} \rightarrow Min$. Тут поверхня сягає значення 1.0. Це логічно: якщо батарея пуста, а часу немає – потрібно віддавати всю доступну потужність.

2. *Зона фонові зарядки (Синя зона)*. Область, де t_{park} великий, а W_{req} мала. ІПЗ знижується до 0.1–0.2. Система "розуміє", що поспішати нікуди, і мінімізує навантаження на мережу.

3. *Плавність переходів*. Поверхня є гладкою, без різких стрибків (discontinuities). Це гарантує стабільність роботи системи керування та відсутність осциляцій потужності при незначних змінах вхідних параметрів.

Використання засобу *Rule Viewer* (рис. 2.7) дозволило провести "ручне трасування" (Traceability) правил та переконатися, що при будь-якій комбінації входів система видає адекватний пріоритет. Наприклад, для точки ($W_{req} = 10$ кВт·год, $t_{park} = 180$ хв) результуючий індекс становить 0,61, що відповідає режиму "Трохи вище середнього".

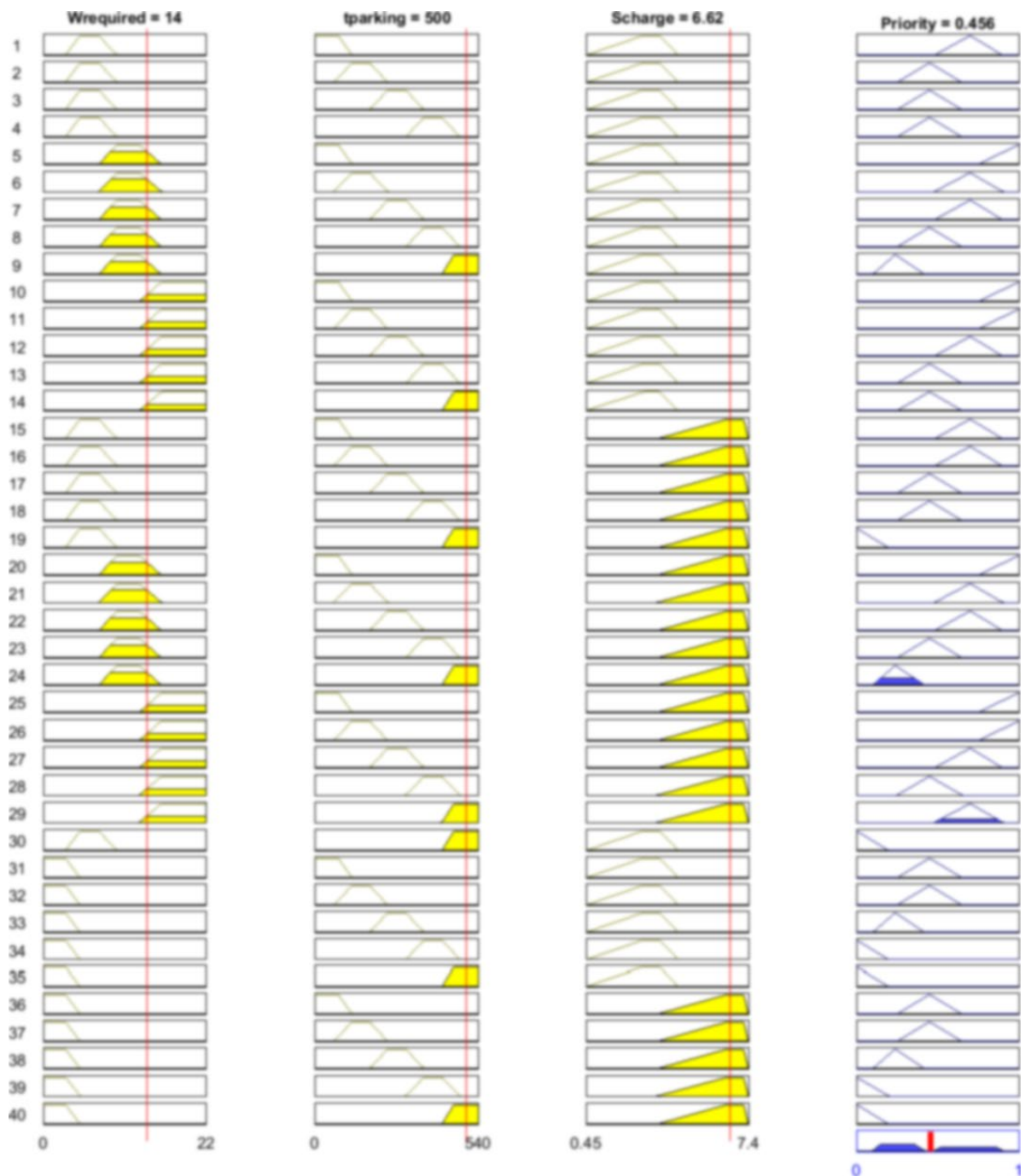


Рис. 2.7 – Інтерфейс перегляду правил (Rule Viewer) у середовищі Matlab

2.8 Реалізація етапу дефазифікації та отримання керуючого впливу

Завершальним етапом циклу нечіткого виведення є процедура дефазифікації (Defuzzification). Її завдання полягає у перетворенні результуючої нечіткої множини виходу (яка є агрегацією усічених функцій належності після спрацювання правил) у єдине чітке числове значення – Індекс Пріоритету Заряджання (ІПЗ).

У сучасній теорії керування існує кілька методів дефазифікації: метод першого максимуму (First-of-Maxima), середнього максимуму (Mean-of-Maxima) та центроїдний метод (Centroid).

Для розроблюваної системи обрано Метод Центру Тяжіння (Center of Gravity – CoG). Вибір цього методу обумовлений його ключовою перевагою – чутливістю до всіх активних правил. На відміну від методів максимуму, які враховують лише "найсильніше" правило, CoG враховує площу всіх фігур, що дозволяє отримати плавну, безперервну характеристику керування. Це критично важливо для стабільної роботи силових перетворювачів, оскільки запобігає різким стрибкам струму при незначній зміні вхідних параметрів.

У загальному вигляді (для неперервного універсуму) координата центру тяжіння плоскої фігури, утвореної функцією належності $\mu_{\Sigma}(y)$, визначається інтегральним виразом:

$$\text{ВІЗ} = \frac{\int_Y y \cdot \mu_{\Sigma}(y) dy}{\int_Y \mu_{\Sigma}(y) dy}$$

де y – змінна виходу (значення індексу на осі абсцис);

$\mu_{\Sigma}(y)$ – об'єднана функція належності після агрегації правил;

Y – область визначення вихідної змінної $[0, 1]$.

Для програмної реалізації на мікроконтролері або у дискретних системах моделювання, інтеграл замінюється сумою за дискретними точками:

$$\text{ВІЗ} \approx \frac{\sum_{i=1}^n y_i \cdot \mu_{\Sigma}(y_i)}{\sum_{i=1}^n \mu_{\Sigma}(y_i)}$$

де n – кількість точок дискретизації вихідної шкали.

Фізичний зміст отриманого значення ІПЗ полягає у визначенні нормованого коефіцієнта пріоритету.

Якщо $\text{ВІЗ} \rightarrow 1$, система ідентифікує потребу електромобіля як критичну.

Якщо $\text{ВІЗ} \rightarrow 0$, потреба є мінімальною, і зарядка може бути переведена в режим очікування.

Отримане чітке значення передається на виконавчий рівень системи для розподілу доступної потужності мережі між активними зарядними слотами.

2.9 Формалізація задачі глобальної оптимізації розподілу потужності

Після того, як нечіткий контролер розрахував індивідуальні пріоритети (ІПЗ) для кожного електромобіля, система переходить до другого етапу – глобального розподілу ресурсів. На цьому рівні задача керування формулюється як задача математичного програмування: необхідно максимізувати сумарну корисність зарядки при суворому дотриманні фізичних та економічних обмежень.

Нехай $x_i(t)$ – бінарна змінна рішення для i -го слоту, де $x_i = 1$ означає дозвіл на зарядку, а $x_i = 0$ – режим очікування. Тоді цільову функцію $F(t)$, яка підлягає максимізації на кожному кроці дискретизації часу, можна записати у вигляді:

$$F(t) = \max \sum_{i=1}^N \text{ВІЗ}_i(t) \cdot x_i(t)$$

де N – загальна кількість підключених електромобілів;

$\text{ІПЗ}_i(t)$ – Індекс Пріоритету Заряджання, отриманий після дефазифікації для i -го авто;

$x_i(t) \in \{0,1\}$ – керуючий вплив.

Фізичний зміст цього виразу полягає в тому, що система намагається "вмістити" в обмежений канал потужності якомога більше автомобілів з найвищим пріоритетом.

Оптимізація виконується за умови виконання ряду нерівностей, що визначають область допустимих рішень.

1. *Баланс потужності (Power Constraint)*. Сумарне навантаження зарядного хабу не повинно призвести до спрацювання ввідного автомату або перевищення договірної потужності:

$$P_{base}(t) + \sum_{i=1}^N \frac{P_{ch,i}(t) \cdot x_i(t)}{\eta_i} \leq P_{grid}^{max}(t)$$

де $P_{base}(t)$ – базове навантаження підприємства (освітлення, вентиляція тощо);

$P_{ch,i}(t)$ – номінальна потужність зарядки i -го авто;

η_i – ККД зарядного пристрою (зменшує споживання з мережі);

P_{grid}^{max} – пропускна здатність трансформатора.

2. *Обмеження режимів мережі (Voltage/Current Constraints)*. Для забезпечення якості електроенергії струм та напруга в точці приєднання (РСС) повинні залишатися в межах, регламентованих стандартом EN 50160:

$$\begin{cases} |I_{total}(t)| \leq I_{nom} \\ 0.9 \cdot U_{nom} \leq U_{psc}(t) \leq 1.1 \cdot U_{nom} \end{cases}$$

Якщо напруга падає нижче $0.9U_{nom}$, система примусово обнуляє змінні x_i для автомобілів з найнижчим ПЗ, навіть якщо є запас по потужності.

3. *Економічні обмеження (Tariff Constraints)*. В умовах українського ринку електроенергії діє тризонна тарифікація. Для мінімізації операційних витрат вводиться коефіцієнт обмеження $k_{price}(t)$:

$$P_{allocated}(t) = k_{price}(t) \cdot P_{nom}, \quad \text{де } k_{price} = \begin{cases} 1.0, & \text{Нічна зона (23:00-07:00)} \\ 0.5, & \text{Напівпікова зона} \\ 0.0, & \text{Пікова зона (08:00-11:00, 20:00-22:00)} \end{cases}$$

Власник станції може налаштувати цей коефіцієнт, забороняючи зарядку в пікові години для авто з низьким пріоритетом.

4. *Логічні граничні умови.* Рішення про зарядку автоматично блокується ($x_i = 0$), якщо виконана одна з умов завершення процесу:

$$x_i(t) = 0, \text{ якщо } \begin{cases} SoC_i(t) \geq SoC_{target} \\ Status_i = \text{Disconnected} \end{cases}$$

Цільова функція враховує всі вище описані умови.

Висновки до розділу 2

У другому розділі роботи здійснено математичне моделювання електроенергетичних процесів та виконано синтез системи керування зарядною інфраструктурою. Отримані результати дозволяють зробити наступні висновки:

Розроблено математичну модель акумуляторної батареї на основі еквівалентної схеми заміщення, яка враховує нелінійну залежність напруги розімкненого кола від ступеня зарядженості (SoC). Описано алгоритмічну реалізацію стандартного профілю заряду CC/CV , що дозволило визначити фазу стабілізації струму (CC) як основний інтервал для ефективного регулювання навантаження.

Запропоновано ієрархічну структуру системи керування, яка поєднує локальний рівень розрахунку пріоритетів та глобальний рівень розподілу потужності. Введено поняття Індексу Пріоритету Заряджання (ІПЗ), який виступає універсальним критерієм для прийняття диспетчерських рішень в умовах невизначеності часу прибуття та енергетичних потреб електромобілів.

Розроблено структуру Fuzzy-контролера типу Мамдані, а саме здійснено фазифікацію входних змінних (W_{req} , P_{ch} , t_{park} , $Price$) з використанням трикутних та трапецієподібних функцій належності, параметри яких адаптовано під характеристики електромобіля класу Nissan Leaf; сформовано базу знань із 40 продукційних правил, яка покриває весь простір станів системи; обґрунтовано вибір методу дефазифікації Центру Тяжіння (CoG), що

забезпечує плавність регулювальної характеристики, необхідну для стабільної роботи силових перетворювачів.

Верифікація налаштувань бази правил за допомогою 3D-поверхні керування підтвердила адекватність логіки контролера: система монотонно підвищує пріоритет (ІПЗ \rightarrow 1) при зростанні дефіциту енергії та зменшенні доступного часу, та знижує його (ІПЗ \rightarrow 0) для фонових режимів зарядки.

Формалізовано задачу глобального розподілу потужності як задачу цілочисельного програмування. Сформульовано цільову функцію максимізації сумарного пріоритету при дотриманні жорстких обмежень: балансу потужності трансформатора, допустимих меж напруги (EN 50160) та тарифних коефіцієнтів.

Розроблена математична модель та алгоритм нечіткого керування створюють теоретичну базу для реалізації адаптивної системи Smart Charging, здатної забезпечити баланс між потребами користувачів та можливостями мережі без необхідності точного довгострокового прогнозування.

РОЗДІЛ 3

ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ АДАПТИВНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЗАРЯДНОЮ ІНФРАСТРУКТУРОЮ

3.1 Архітектура та топологія моделі розподільчої мережі в середовищі Matlab Simulink

Для верифікації розробленого у попередньому розділі методу керування на основі нечіткої логіки (Fuzzy Logic), було розроблено комплексну імітаційну модель у програмному середовищі Matlab Simulink (з використанням бібліотеки *Simscape Electrical*).

Модель відтворює роботу фрагмента розподільчої електромережі 0,4 кВ протягом 24 годин із дискретністю 1 хвилина. Топологія системи (рис. 3.1) реалізована за радіальною схемою і включає три ієрархічні рівні:

Рівень середньої напруги (СН): еквівалент зовнішньої енергосистеми.

Вузол трансформації: силовий трансформатор 10/0,4 кВ.

Рівень низької напруги (НН): шина 0,4 кВ, до якої підключено статичне навантаження (офісний центр) та динамічне навантаження (зарядна станція).

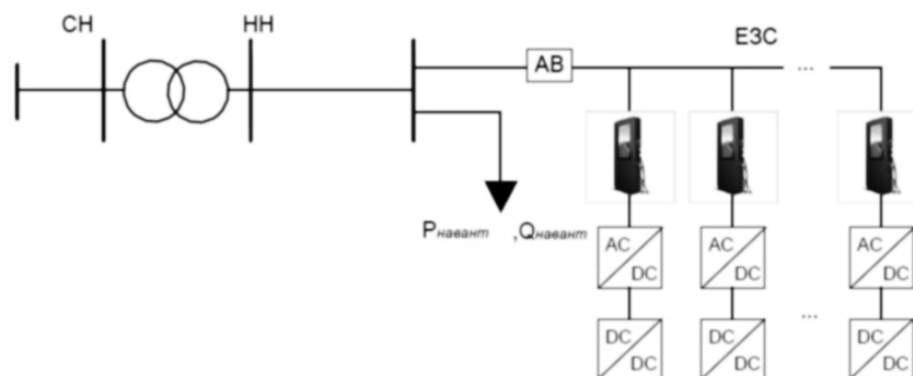


Рис. 3.1. Однолінійна схема приєднання зарядної станції

Загальний вигляд реалізованої Simulink-моделі наведено на рис. 3.2. Блок керування (Control Unit) реалізовано через зворотний зв'язок: він зчитує

параметри режиму (напругу, струм) і видає керуючі сигнали на зарядні слоти.

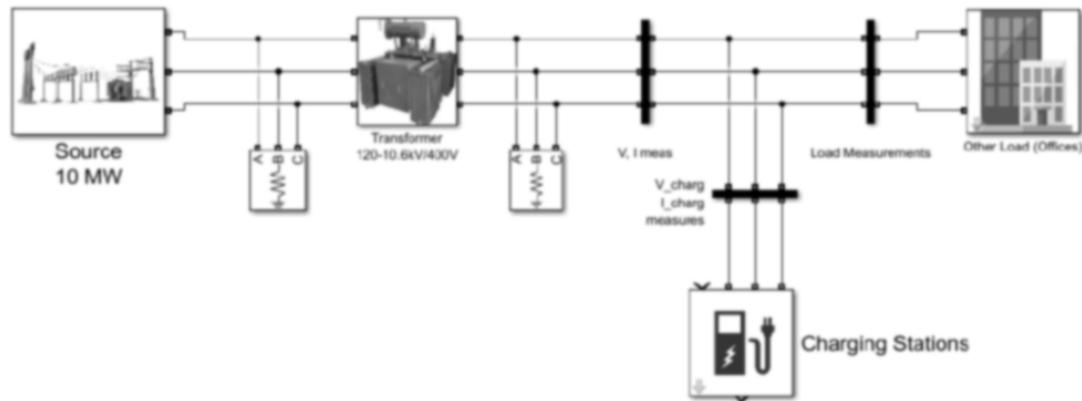


Рис. 3.2. Структурна схема імітаційної моделі електротехнічного комплексу

3.1.1 Моделювання джерела живлення та вузла трансформації.

Зовнішня енергосистема (Grid) змодельована як джерело нескінченної потужності («Infinite Bus»), що дозволяє підтримувати стабільну напругу і частоту на стороні 10 кВ незалежно від процесів у навантаженні.

Для реалізації використано блок Three-Phase Source (або синхронна машина в спрощеному режимі) з наступними параметрами: номінальна напруга: 10 кВ; потужність короткого замикання (Short-circuit level): 10 МВА; частота 50 Гц.

Ключовим елементом, що обмежує пропускну здатність системи, є силовий трансформатор. У моделі використано блок Three-Phase Transformer (Two Windings), параметри якого відповідають серійному трансформатору типу ТМГ-120/10: номінальна потужність (S_{nom}): 120 кВА; коефіцієнт трансформації: 10/0,4 кВ; схема з'єднання обмоток: D/Yn-11 (Трикутник / Зірка з нейтраллю); напруга короткого замикання (u_k): 4,5%.

Саме номінал 120 кВА виступає головним обмеженням (P_{grid}^{max}), яке контролюється нечітким регулятором.

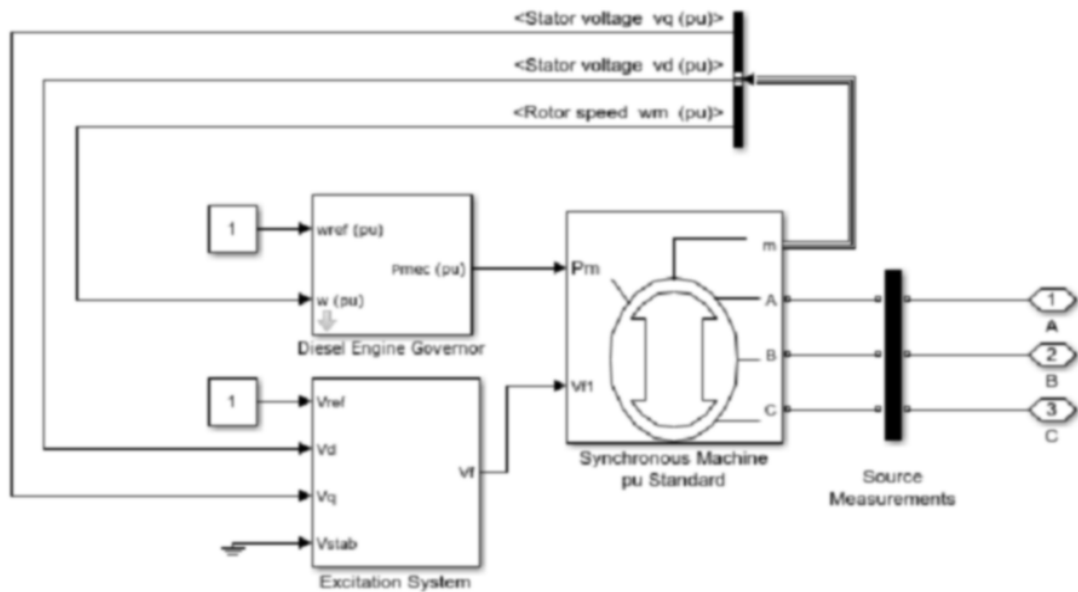


Рис. 3.3. Параметричний блок моделі джерела живлення

Ініціалізація початкових умов симуляції (Load Flow) виконується автоматично за допомогою блоку Powergui, налаштованого у режимі *Phasor Simulation*, що дозволяє значно прискорити розрахунок процесів тривалістю 24 години.

3.1.2 Моделювання базового навантаження об'єкта (Base Load).

Споживач (офісно-виробниче приміщення) представлений у вигляді динамічного навантаження, активна (P) та реактивна (Q) потужність якого змінюються у часі. Для реалізації використано блок Three-Phase Dynamic Load, на вхід якого подається добовий графік навантаження через блок *Lookup Table* (рис. 3.4).

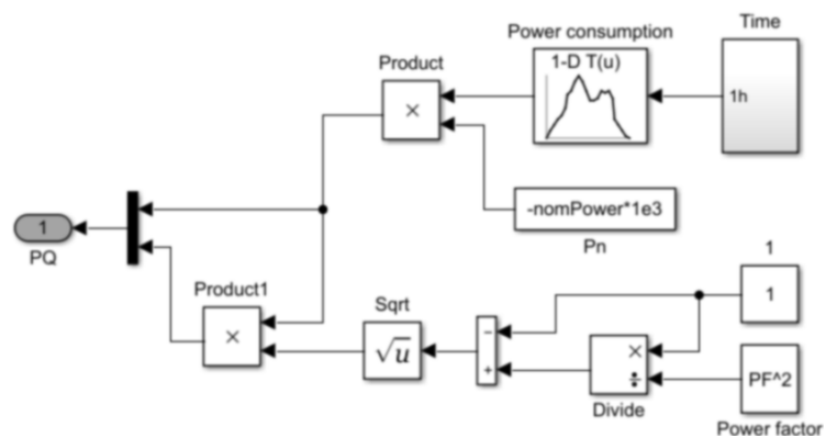


Рис. 3.4 Підсистема формування профілю навантаження споживача

Профіль навантаження (рис. 3.5) сформовано на основі статистичних даних типового офісного центру:

00:00 – 07:00: – нічний мінімум $\approx 10\text{--}15\%$ від піку.

08:00 – 18:00: – робочий день – плато $\approx 80\text{--}100\%$.

18:00 – 23:00: – вечірній спад.

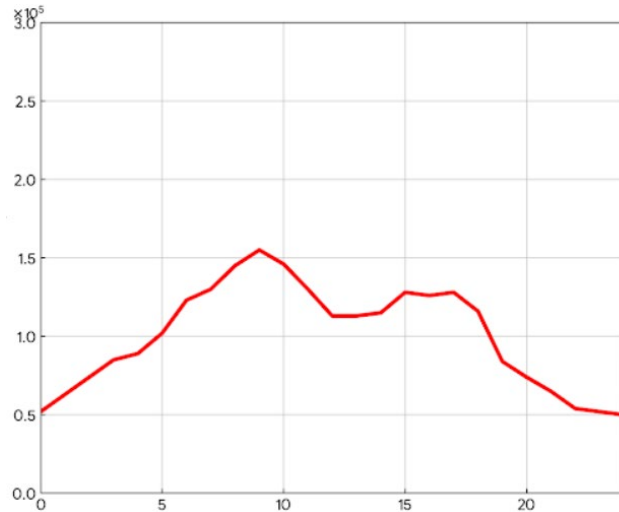


Рис. 3.5. Добовий графік базового навантаження об'єкта (P_{base})

Математично миттєве значення струму навантаження розраховується за законом Ома для змінного струму (рис. 3.6), де імпеданс навантаження $Z(t)$ перераховується на кожному кроці симуляції.

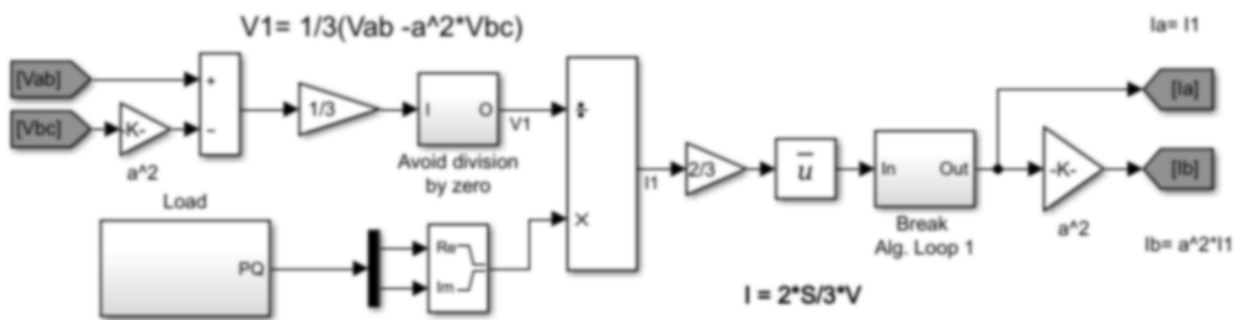


Рис. 3.6. Логіка розрахунку діючих значень (RMS) струму та напруги у вузлі навантаження

3.1.3 Реалізація моделі інтелектуальної зарядної станції (Smart Charging Station). Модель зарядної станції (ЕЗС) є складною підсистемою,

яка об'єднує силову електроніку та логіку керування. Загальна встановлена потужність станції становить 30 кВт, розділених на 6 незалежних слотів (по 5 кВт або конфігурованих динамічно).

Для імітації дій користувача розроблено віртуальну панель керування, реалізовану засобами Simulink Dashboard. Вона дозволяє вводити вхідні дані для кожного слоту: початковий заряд; бажаний заряд; час стоянки.

Кожен зарядний слот моделюється як кероване джерело струму (**Controlled Current Source**), величина струму якого I_{ref} визначається контролером. Схема вимірювання (рис. 3.7) включає датчики напруги та струму, дані з яких надходять на вхід нечіткого регулятора.

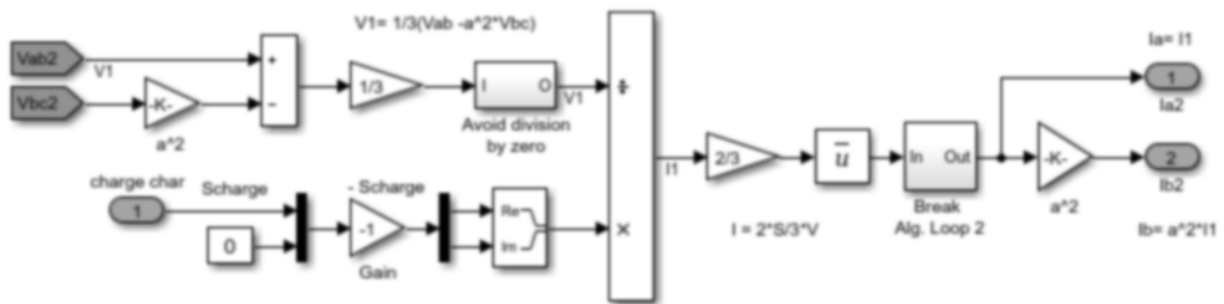


Рис. 3.7. Підсистема вимірювання та розрахунку параметрів режиму ЕЗС

Підключення ЕЗС до мережі 0,4 кВ (рис. 3.8) реалізовано через модель ввідного розподільчого пристрою (ВРП), який містить комутаційні апарати та лічильник електроенергії.

Блок розрахунку потужності (рис. 3.9) реалізує обчислення миттєвої активної (P) та реактивної (Q) потужності за формулами:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) \cdot i(t) dt$$

$$S = U_{RMS} \cdot I_{RMS}$$

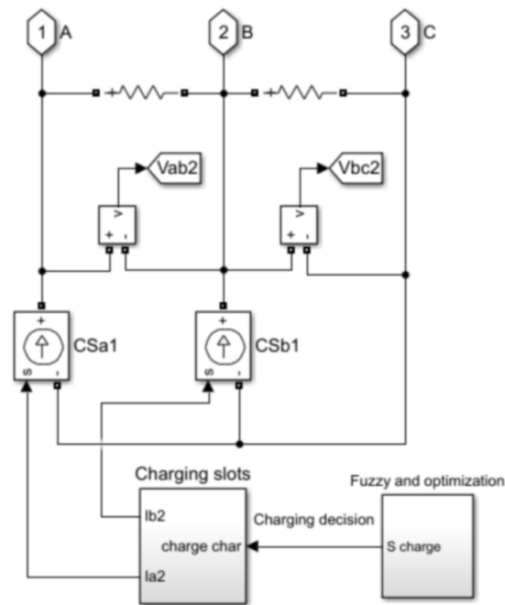


Рис. 3.8 Вузол приєднання зарядної станції до шин низької напруги

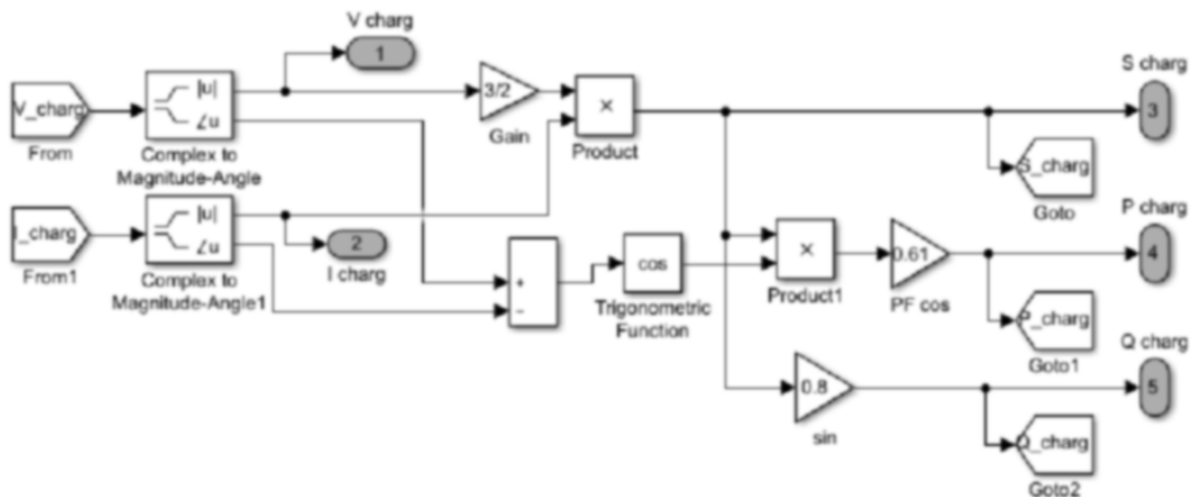


Рис. 3.9. Блок моніторингу енергетичних показників станції

3.1.4 Програмна реалізація алгоритмів керування в MATLAB.

Інтелектуальна складова моделі реалізована за допомогою блоків MATLAB Function, які виконують вбудований програмний код (скрипти) на кожному кроці симуляції. Логіка керування розділена на модулі, описані далі.

Модуль "Connection Manager" відстежує статус слотів (Вільний/Зайнятий). При появі логічної одиниці на вході "Connect"

ініціалізує нову сесію з параметрами SoC_{init} та T_{park} .

Модуль "Pre-Calculation" розраховує необхідну енергію (W_{req}) та передає дані на вхід нечіткого контролера.

Модуль "Fuzzy Inference Engine" викликає файл нечіткої системи (ev_fuzzy_logic.fis), передає йому вхідний вектор і отримує значення ІПЗ.

Модуль "Global Optimizer" отримує доступну потужність трансформатора ($P_{avail} = P_{trans} - P_{base}$) та розподіляє її між авто з найвищим ІПЗ. Формує сигнали дозволу на зарядку (Charge Enable) та уставки струму (I_{ref}).

Така архітектура дозволяє поєднати точність фізичного моделювання електричних процесів (Simscape) з гнучкістю алгоритмічного керування.

3.2 Формування сценарію імітаційного експерименту та характеристика тестової вибірки електромобілів

Для верифікації ефективності запропонованого нечіткого контролера розроблено сценарій добового функціонування зарядної станції в умовах реального об'єкта. Сценарій передбачає обслуговування потоку з 34 електромобілів протягом 24 годин.

3.2.1 Параметри вхідного потоку заявок. Вхідний масив даних (Табл. 3.1) сформовано на основі статистичних спостережень за роботою публічних зарядних хабів. Вибірка є репрезентативною та включає транспортні засоби з різними характеристиками. Опишемо їх.

У виборці представлені моделі як з однофазним інвертором 3,5 кВт (41% вибірки), так і з потужним однофазним модулем 7,2 кВт (59% вибірки).

Початковий стан заряду SoC_{init} варіюється від дуже низького (12,4%) до високого (78,3%), що дозволяє перевірити реакцію системи на різні пріоритети.

Розкид параметру час паркування T_{park} лежить в діапазоні від коротких зупинок (62 хв) до тривалого перебування (410 хв).

Таблиця 3.1. Вихідні дані електромобілів для циклу моделювання

№ EV	Рівень заряду SoC, %		Час парковки, хв	Потужність ОВС, кВт	Розрахункова енергія, кВт·год
	Початковий	Необхідний			
1	23,4	82,1	348	3,5	14,09
2	47,2	72,5	154	3,5	6,07
3	12,8	99,1	328	7,2	20,71
4	22,5	83,4	185	7,2	14,62
5	37,1	63,2	82	7,2	6,26
6	62,3	97,5	153	7,2	8,45
7	31,5	57,8	195	7,2	6,31
8	52,4	77,2	102	7,2	5,95
9	46,7	82,3	312	7,2	8,54
10	75,2	95,4	62	7,2	4,85
11	57,8	83,1	231	7,2	6,07
12	40,5	82,4	293	7,2	10,06
13	76,2	92,8	103	7,2	3,98
14	33,6	72,4	358	7,2	9,31
15	47,5	67,8	72	7,2	4,87
16	27,8	82,6	251	7,2	13,15
17	31,2	67,5	283	3,5	8,71
18	36,4	87,2	157	3,5	12,19
19	68,5	92,4	146	7,2	5,74
20	57,6	97,8	108	7,2	9,65
21	43,8	73,2	311	7,2	7,06
22	60,4	93,5	127	7,2	7,94
23	78,3	98,1	92	3,5	4,75
24	68,9	92,4	123	7,2	5,64
25	53,4	82,7	185	7,2	7,03
26	42,6	83,5	302	3,5	9,82
27	32,8	87,4	298	7,2	13,10
28	25,6	82,8	292	3,5	13,73
29	17,5	93,2	410	7,2	18,17
30	33,4	83,6	341	3,5	12,05
31	23,2	77,5	349	3,5	13,03
32	42,8	73,1	146	3,5	7,27
33	12,4	95,6	329	7,2	19,97
34	27,3	83,8	195	7,2	13,56

Розрахунок енергії виконано для базової ємності батареї 24 кВт·год.

3.2.2 Статистичний аналіз складності сценарію. Для оцінки навантаження на алгоритм керування проведено кластеризацію вхідних даних. На рис. 3.10 наведено розподіл електромобілів у координатах «Необхідна енергія - Доступний час». Аналіз діаграми дозволяє виділити три групи споживачів:

- критичні (Critical), для яких велика потреба в енергії (>15 кВт·год)

при обмеженому часі, тому ці авто отримають найвищий ПЗ;

- стандартні (Normal) із середньою потребою та достатнім часом.

- гнучкі (Flexible), у яких мала потреба (<5 кВт·год) або дуже довгий час стоянки, тому вони і стануть донорами резерву потужності для системи.

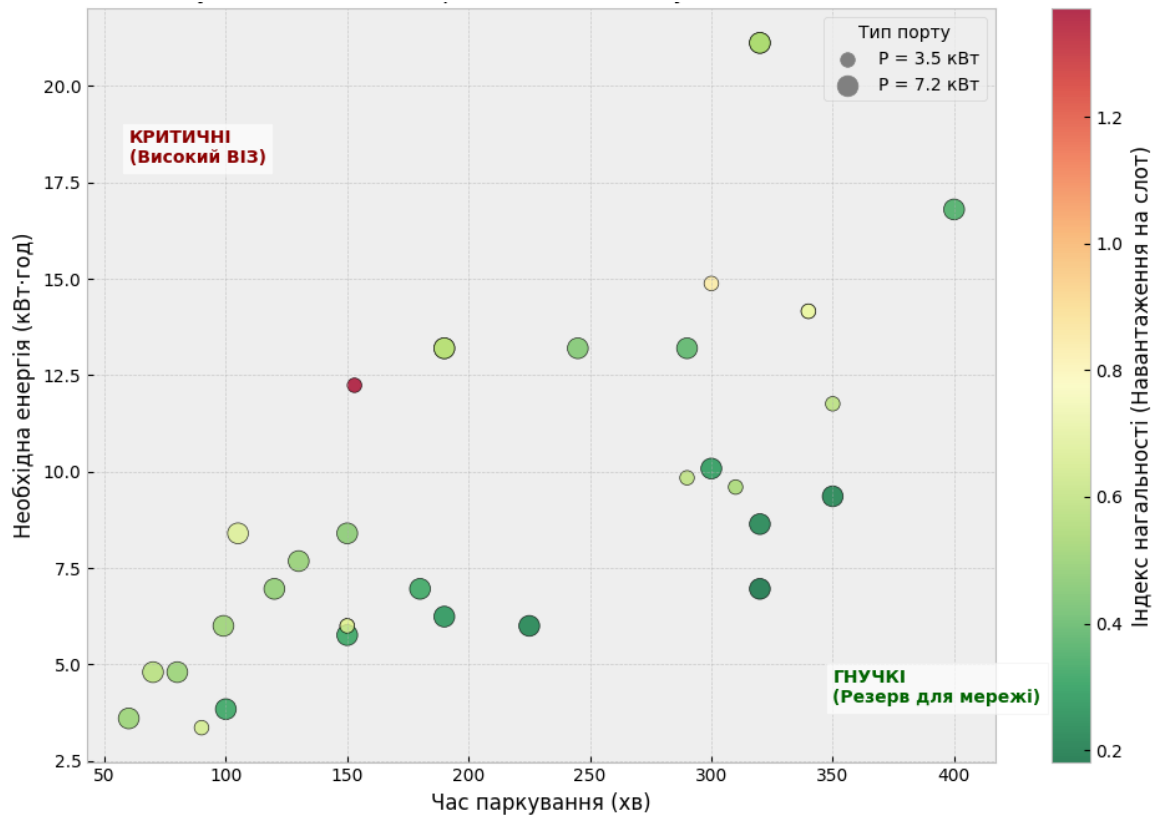


Рис. 3.10. Класифікація зарядної сесії за ступенем нагальності (Scatter Plot)

Така гетерогенність вибірки створює ідеальні умови для тестування нечіткого контролера, оскільки вимагає постійної адаптації коефіцієнтів розподілу потужності.

3.3 Порівняльний аналіз енергетичної ефективності стратегій керування

Заключним етапом дослідження є проведення порівняльного аналізу трьох сценаріїв функціонування зарядної інфраструктури в умовах реального обмеження потужності. Метою цього етапу є кількісна оцінка впливу

обраного алгоритму на добовий графік навантаження підприємства.

В якості граничних умов прийнято:

- ліміт потужності мережі 120 кВт (за величиною номінальної потужності трансформатора ТМГ-120).

- максимальна потужність електростанції 24 кВт (сумарна номінальна потужність 6 слотів).

3.3.1 Аналіз добових графіків електричного навантаження. Для візуалізації впливу зарядних сесій на енергосистему було побудовано добові профілі споживання для трьох досліджуваних стратегій.

Некерована зарядка (Uncontrolled Charging). На рис. 3.11 зображено динаміку попиту при вільному доступі до зарядки. Як видно з графіка, пік споживання електромобілів співпадає з вечірнім максимумом навантаження підприємства. Внаслідок сумарне навантаження досягає критичного значення, перевищуючи номінал трансформатора. Зафіксовано перевищення ліміту на 16%, що є неприпустимим режимом експлуатації та призводить до спрацювання релейного захисту.

Детерміноване обмеження (Constrained Charging). Рис. 3.12 ілюструє роботу системи з жорстким відсіканням піків. Алгоритм просто блокує зарядку нових автомобілів, коли сумарна потужність наближається до 120 кВт. Перевантаження відсутнє, проте графік має "зрізану" форму, що свідчить про штучне обмеження обслуговування. Частина споживачів отримує відмову в доступі до послуги.

Адаптивне керування (Proposed Fuzzy Method). На рис. 3.13 представлено результат роботи запропонованого нечіткого контролера. Система не відключає споживачів, а динамічно зменшує потужність зарядки в години пік, переносючи споживання на періоди спаду навантаження (нічні години та обідня перерва). В результаті графік навантаження стає більш рівномірним (ефект вирівнювання або Load Leveling). Пікові значення надійно утримуються в межах допустимого діапазону.

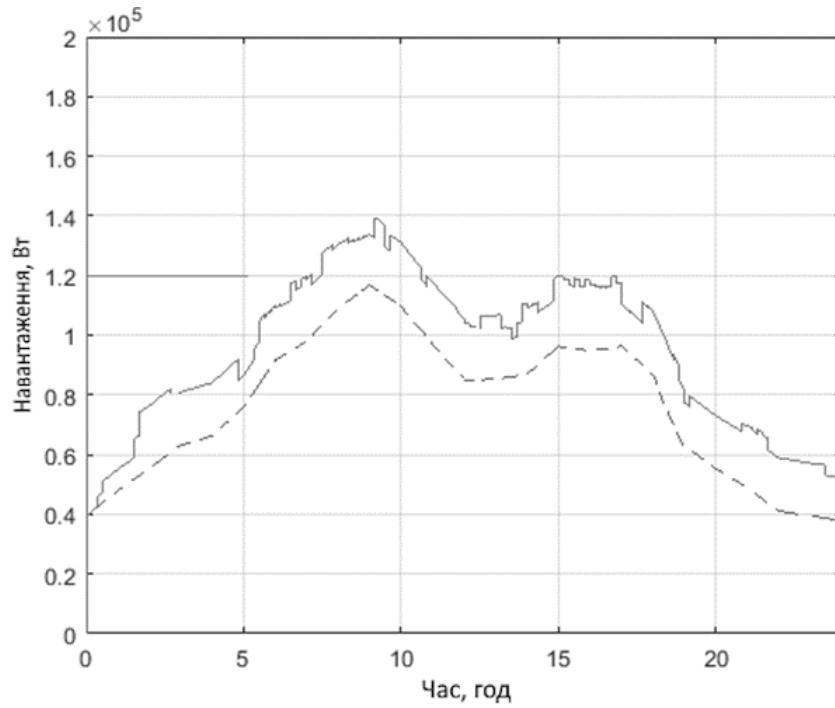


Рис. 3.11. Добовий графік попиту на електроенергію при некерованій зарядці

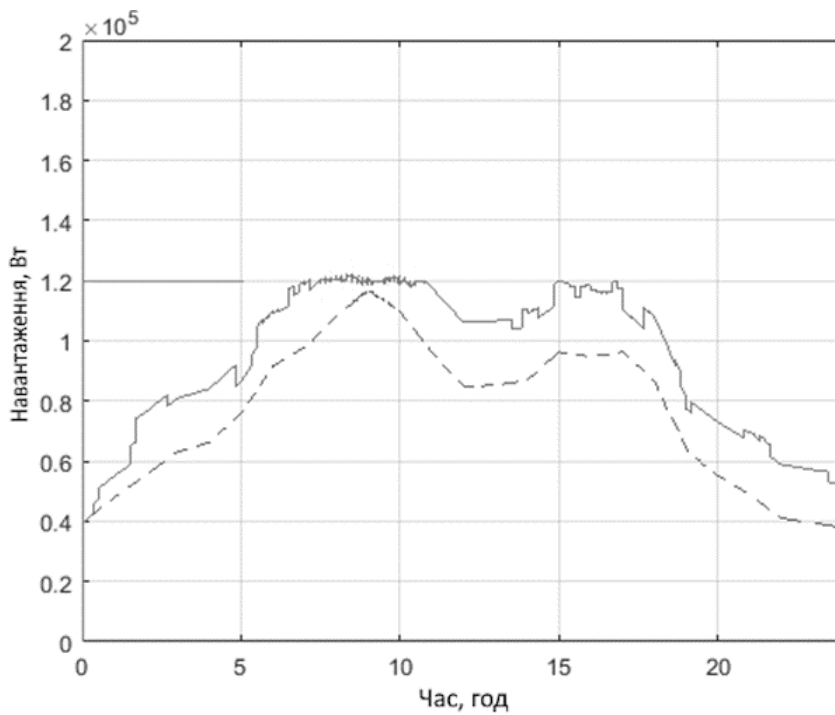


Рис. 3.12. Добовий графік попиту при використанні типового алгоритму обмеження

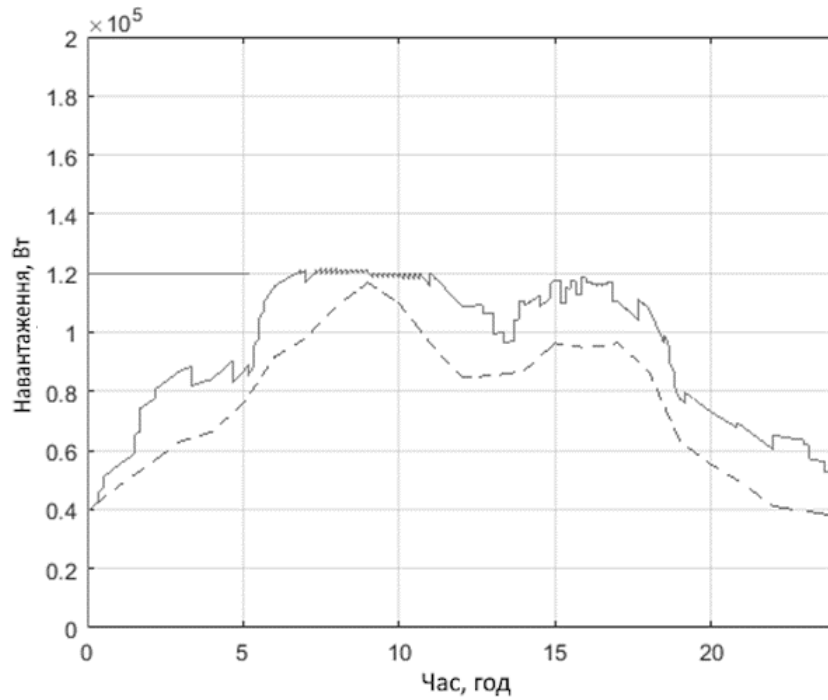


Рис. 3.13. Добовий графік попиту при застосуванні запропонованого адаптивного методу

Зведений графік системного навантаження (рис. 3.14) наочно демонструє переваги запропонованого методу. На відміну від некерованого

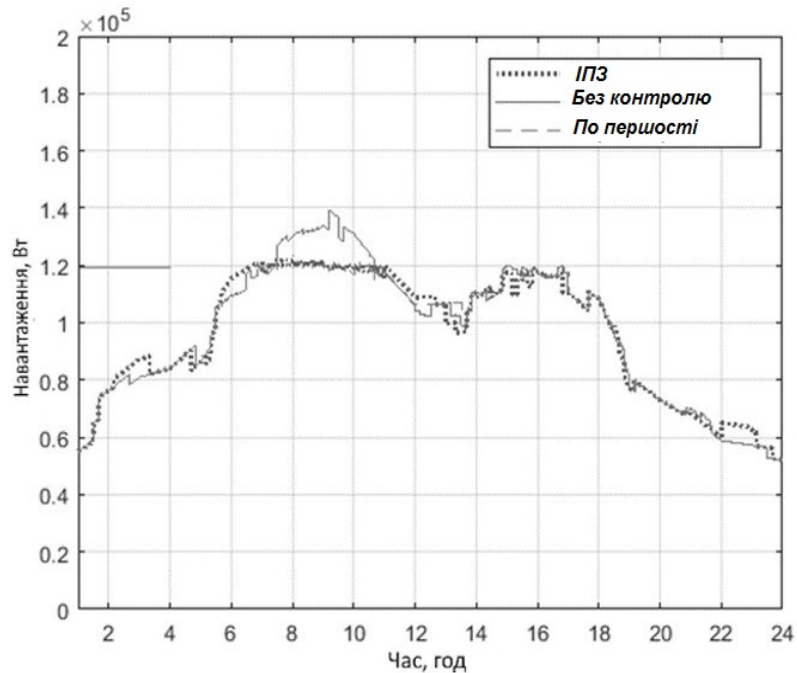


Рис. 3.14. Порівняльна характеристика сумарного навантаження системи електропостачання для трьох стратегій

методу, адаптивний алгоритм повністю усуває 16-відсоткове перевантаження мережі. Крива навантаження стає більш гладкою порівняно з методом жорсткого обмеження, оскільки контролер розподіляє навіть залишкову (малу) потужність між автомобілями з низьким пріоритетом, замість того щоб просто вимикати їх.

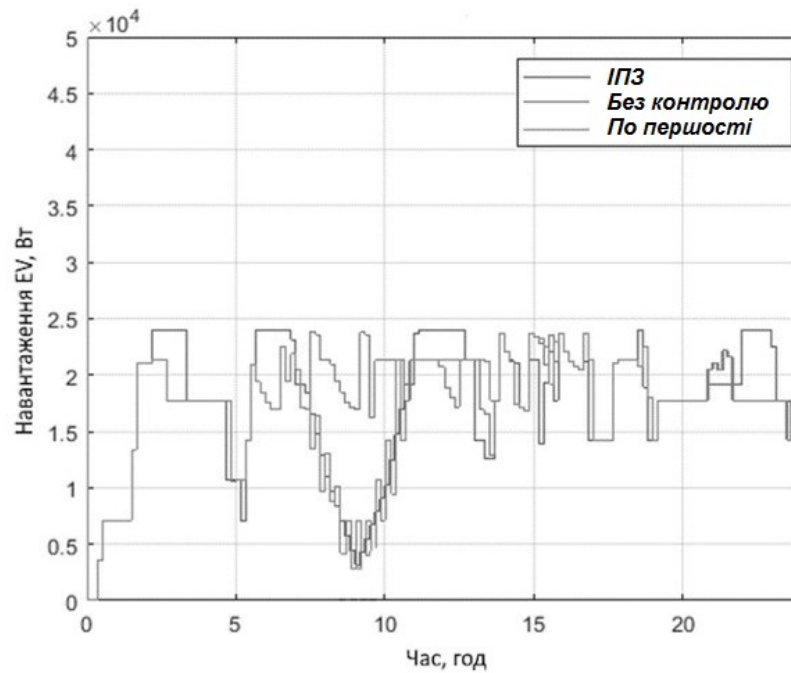


Рис. 3.15. Динаміка активної потужності зарядної станції

Окремий аналіз споживання саме зарядної станції (рис. 3.15) підтверджує економічну ефективність методу. У періоди дії високого тарифу на електроенергію (пікові години), споживання електромобілів було автоматично знижено на 20% завдяки налаштуванням нечіткого контролера. Це дозволяє власнику інфраструктури суттєво зменшити операційні витрати, не порушуючи при цьому комфорту користувачів, оскільки необхідна енергія була довнесена пізніше.

3.3.2 Аналіз динаміки зміни стану заряду (SOC) акумуляторних батарей. Важливим етапом дослідження є оцінка того, як обрана стратегія керування впливає на кінцевий результат для споживача – рівень заряду батареї SOC. Порівняльний аналіз динамічних характеристик процесу

заряджання для розробленого адаптивного методу та типового алгоритму представлено на графічних залежностях нижче.

Аналіз отриманих результатів дозволяє виявити критичні недоліки традиційного підходу. Як видно з рис. 3.16, при використанні детермінованого алгоритму («First-Come-First-Served») спостерігається ефект блокування доступу до енергоресурсу. Зокрема, електромобілі, що були підключені до зарядних портів №5 та №6, фактично не отримували енергії протягом тривалого часу, оскільки ліміт потужності був вичерпаний попередніми користувачами. Це призвело до того, що транспортні засоби з критичною потребою в енергії (позначені маркером на графіку) не досягли цільового рівня заряду до моменту від'їзду.

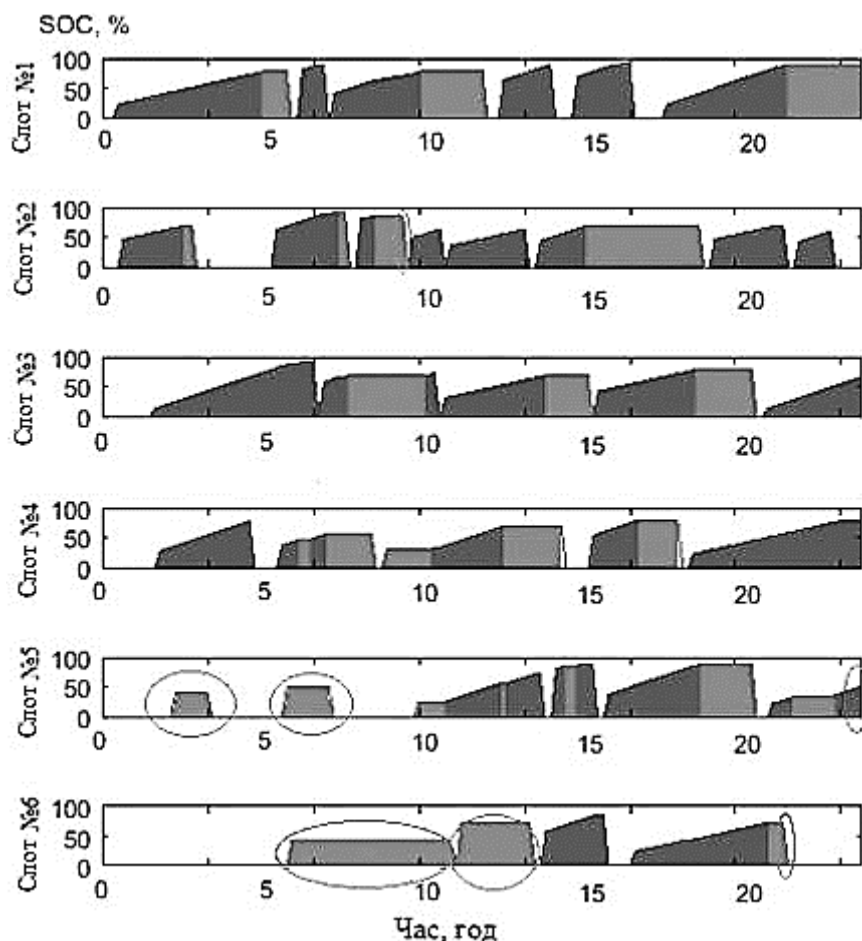
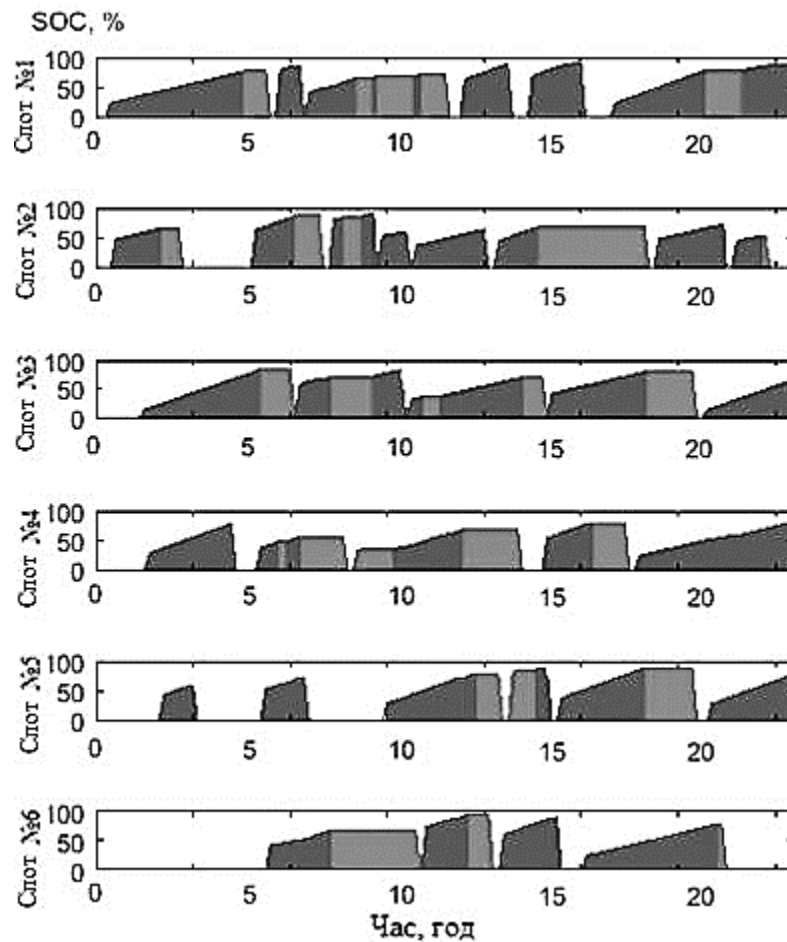


Рис. 3.16. Хронограма зміни рівня заряду (SOC) при використанні традиційного алгоритму з пріоритетом черги



сірий колір – активна фаза, світло-сірий – режим очікування)

Рис. 3.17. Хронограма зміни рівня заряду (SOC) для шести тестових слотів при використанні адаптивного алгоритму на базі ІПЗ

Натомість, запропонований метод (рис. 3.17) демонструє паралельне обслуговування всіх активних слотів. Система автоматично знижує швидкість зарядки для менш пріоритетних авто, вивільняючи ресурс для критичних споживачів, що дозволяє уникнути ситуацій повного недозаряду.

3.3.3 Кількісна оцінка якості обслуговування (Quality of Service).

Для математичного підтвердження ефективності алгоритму після налаштування вагових коефіцієнтів бази правил було введено інтегральний критерій якості. В якості такого показника використано коефіцієнт E - середньоквадратичне відхилення між бажаною ($W_{\text{необх}}$) та фактично отриманою ($W_{\text{доставлен}}$) енергією:

$$E = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (W_{\text{необх}_i} - W_{\text{доставлен}_i})^2}$$

де n - загальна кількість електромобілів у вибірці,
 i - індекс конкретного транспортного засобу.

Результати розрахунку похибки регулювання для різних груп користувачів зведено в таблицю 3.2.

Таблиця 3.2. Порівняльний аналіз показників якості обслуговування E для досліджуваних методів

Категорія споживачів	Запропонований адаптивний метод	Метод фіксованого пріоритету	Ефективність
Усереднений показник для всіх EV	1,942	2,915	33,4 %
Група некритичних EV (низький пріоритет)	0,614	1,927	68,1 %
Група критичних EV (високий пріоритет)	2,843	4,125	31,1 %

Аналіз даних таблиці 3.2 свідчить, що застосування нечіткого контролера дозволило знизити середньоквадратичне відхилення для критичної групи електромобілів на 31,5%, а загальну похибку системи - на 33,4%. Це підтверджує, що розроблений алгоритм забезпечує більш справедливий та ефективний розподіл дефіцитного ресурсу.

3.3.4 Оцінка надійності роботи розподільчої мережі. Другим, не менш важливим критерієм ефективності, є здатність системи утримувати параметри режиму в допустимих межах. Розрахунок коефіцієнта завантаження трансформаторної підстанції (p) виконувався за формулою:

$$p = \left(\frac{S_{\text{max}}}{S_{\text{ліміт}}} \right) 100\%$$

де S_{max} - зафіксована пікова потужність на інтервалі моделювання,

$S_{\text{ліміт}} = 120 \text{ кВт}$ - номінальна пропускна здатність вузла приєднання.

Результати моніторингу для різних сценаріїв наведено в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3. Максимальне завантаження силового обладнання

Сценарій моделювання	Максимальне завантаження лінії (p), %	Стан системи
Базовий режим (без EV)	97,0%	Нормальний
Некерована зарядка	116,2%	Перевантаження (Аварія)
Типове обмеження	99,0%	Нормальний
Запропонований метод (ІПЗ)	99,0%	Нормальний

Як видно з розрахунків, при некерованому підключенні електромобілів виникає перевантаження на рівні 16,2%, що є неприпустимим. Запропонований метод, аналогічно до типового обмеження, надійно утримує навантаження на рівні 99%, проте робить це більш гнучко, не відключаючи споживачів повністю.

3.3.5 Аналіз енергетичної ефективності та пропускної здатності

Третім вектором порівняння є загальний обсяг переданої енергії. Було проаналізовано добовий цикл роботи станції при обслуговуванні потоку з 34 електромобілів.

Розрахунок інтегрального енергоспоживання виконувався шляхом сумування миттєвих потужностей за кожен годину (t) розрахункового періоду. Енергія, спожита виключно зарядним хабом (W_{EM}):

$$W_{EM} = \sum_{t=1}^{24} W_{EM_t}$$

Повний енергетичний баланс вузла приєднання ($W_{\text{заг}}$), що включає базове навантаження підприємства:

$$W_{\text{заг}} = \sum_{t=1}^{24} (W_{EM_t} + W_{\text{навант}_t})$$

Підсумкове порівняння енергетичної ефективності досліджуваних

стратегій зведено в таблицю 3.4.

Таблиця 3.4. Порівняльна характеристика добового енергоспоживання

Показник ефективності	Базовий режим	Некерована зарядка	Типове обмеження	Адаптивний метод (ІІЗ)
Сумарна енергія $W_{\text{заг}}$, кВт·год	1826	2267	2235	2291
Енергія, передана в EV, кВт·год	-	442	408	467

Аналіз даних табл. 3.4 виявляє важливу перевагу розробленого методу. Незважаючи на суворе дотримання ліміту потужності (як і в методі типового обмеження), адаптивна система дозволила передати електромобілям 467 кВт·год, що на 12,6% більше, ніж при використанні звичайного алгоритму обмеження (408 кВт·год), і навіть перевищує показники некерованого режиму.

Цей позитивний ефект пояснюється підвищенням коефіцієнта використання встановленої потужності: контролер динамічно заповнює «провали» у графіку навантаження, надаючи пріоритет автомобілям, здатним прийняти великий струм у моменти, коли мережа недовантажена. Отже, метод не просто обмежує споживання, а оптимізує його розподіл у часі.

Висновки до розділу 3

У третьому розділі проведено імітаційне моделювання роботи зарядної інфраструктури в середовищі Matlab Simulink та виконано порівняльний аналіз стратегій керування. Результати досліджень дозволяють зробити наступні висновки:

Моделювання сценарію некерованої зарядки («Uncontrolled Charging») показало, що одночасне підключення парку електромобілів у вечірні години призводить до пікового навантаження 139,4 кВт. Це на 16,2% перевищує номінальну пропускну здатність трансформаторної підстанції (120 кВт), що

підтверджує необхідність впровадження активних систем керування.

Розроблений адаптивний алгоритм на основі нечіткої логіки успішно вирішує задачу обмеження потужності. На відміну від аварійного режиму, запропонована система надійно утримує сумарне навантаження в межах 120 кВт (коефіцієнт завантаження $p \approx 99\%$), запобігаючи спрацюванню захисної автоматики.

Встановлено, що запропонований метод є енергетично ефективнішим за традиційні алгоритми жорсткого обмеження. Завдяки динамічному заповненню «провалів» у графіку навантаження (технологія Valley Filling), система дозволила передати електромобілям 467 кВт·год енергії за добу, що на 12,6% більше, ніж при використанні типового методу обмеження (408 кВт·год).

Використання Індексу Пріоритету Заряджання (ІПЗ) дозволило усунути ефект «блокування черги», характерний для методу First-Come-First-Served. Середньоквадратичне відхилення недоотриманої енергії (E) для групи критичних користувачів знизилося з 4,125 до 2,843 (покращення на 31,1%). Це свідчить про те, що пріоритетні транспортні засоби обслуговуються якісніше та швидше.

Алгоритм продемонстрував здатність адаптуватися до тарифної політики. У години пікового попиту споживання зарядної станції було автоматично знижено на 20%, що дозволяє власнику інфраструктури оптимізувати операційні витрати без суттєвого погіршення комфорту клієнтів.

Результати моделювання доводять, що запропонована система керування на базі нечіткої логіки є ефективним інструментом для інтеграції зарядної інфраструктури в умови обмеженого електропостачання, перевершуючи існуючі аналоги за критеріями енергоефективності та якості надання послуг.

РОЗДІЛ 4

ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ЗАРЯДНИХ КОМПЛЕКСІВ

4.1 Аналіз потенційних небезпек та шкідливих виробничих факторів при обслуговуванні зарядної інфраструктури

Впровадження розробленої у магістерській дисертації системи адаптивного керування зарядними станціями передбачає роботу зі складним електротехнічним комплексом, що поєднує силові перетворювальні пристрої, комутаційну апаратуру та мікропроцесорні системи керування. Відповідно до чинного законодавства України про охорону праці та галузевих нормативних актів, на етапі проектування необхідно провести комплексний аналіз умов праці персоналу, який здійснюватиме монтаж, налагодження та експлуатаційне обслуговування даного обладнання. Специфіка об'єкта дослідження, яким є зарядна інфраструктура потужністю до 120 кВт, зумовлює наявність низки потенційно небезпечних та шкідливих виробничих факторів, серед яких домінуючими є ураження електричним струмом, термічні ризики, електромагнітне випромінювання та пожежна небезпека.

Основним джерелом небезпеки є наявність в електроустановках напруги, що значно перевищує безпечні межі. Зарядні станції оперують як змінним струмом промислової частоти 50 Гц напругою 380 В на стороні живлення, так і постійним струмом напругою до 500-1000 В на вихідних клеммах, що підключаються до електромобіля. Особливістю постійного струму є його специфічний вплив на організм людини, що характеризується електролітичним розкладанням рідин організму та значним термічним ефектом при виникненні електричної дуги. Небезпека посилюється тим, що зарядні станції часто встановлюються на відкритому повітрі, де вплив

атмосферних опадів, підвищеної вологості та перепадів температур може призвести до зниження опору ізоляції та підвищення провідності ґрунту, що збільшує ризик електротравматизму.

Крім того, процес заряджання акумуляторних батарей супроводжується протіканням значних струмів, що генерують електромагнітні поля промислової частоти та широкого спектру гармонік, виявлених у другому розділі роботи. Тривале перебування обслуговуючого персоналу в зоні дії електромагнітного поля підвищеної напруженості може призводити до функціональних розладів нервової, серцево-судинної та імунної систем організму. Додатковим фактором ризику є можливість виникнення пожежі внаслідок теплового розгону літій-іонних акумуляторів електромобілів або перегріву контактних з'єднань при протіканні струмів перевантаження, хоча розроблена система керування мінімізує останній ризик шляхом інтелектуального обмеження потужності.

4.2 Інженерно-технічні заходи забезпечення електробезпеки

Забезпечення захисту персоналу від ураження електричним струмом при експлуатації розробленої системи керування базується на комплексному застосуванні технічних засобів та організаційних заходів відповідно до вимог Правил улаштування електроустановок (ПУЕ) та ДСТУ EN 61851-1. Основним технічним заходом захисту при непрямому дотику є автоматичне вимкнення живлення, яке реалізується за допомогою пристроїв захисного відключення (ПЗВ) та автоматичних вимикачів з відповідними часо-струмовими характеристиками.

Враховуючи специфіку навантаження, яке включає випрямлячі та інвертори, критично важливим є використання пристроїв диференційного струму типу В, які здатні реагувати не лише на змінні, а й на постійні пульсуючі струми витоку, що можуть виникати при пошкодженні ізоляції в силових колах електромобіля. Стандартні пристрої типу АС у таких умовах

можуть втрачати чутливість через підмагнічування осердя трансформатора постійною складовою струму, тому їх використання в колах живлення зарядних станцій заборонено нормами безпеки.

Ефективним заходом захисту є також виконання захисного заземлення та зрівнювання потенціалів. Усі металеві неструмопровідні частини корпусів зарядних станцій, розподільчих шаф та металоконструкцій навісів повинні бути надійно з'єднані з головною заземлювальною шиною об'єкта. Опір заземлювального пристрою не повинен перевищувати 4 Ом для електроустановок напругою до 1000 В. Для системи керування, що базується на мікропроцесорній техніці, якісне заземлення виконує подвійну функцію: забезпечує електробезпеку персоналу та створює умови для електромагнітної сумісності, відводячи високочастотні завади, які можуть порушити роботу логічних контролерів та призвести до збоїв у алгоритмах керування.

Важливим аспектом є забезпечення необхідного ступеня захисту оболонки електрообладнання. Для зарядних станцій, що встановлюються зовні приміщень, ступінь захисту повинен бути не нижчим за IP54 згідно з ГОСТ 14254, що унеможливує потрапляння всередину корпусу пилу та бризок води. Кабельні лінії, що з'єднують трансформаторну підстанцію із зарядними слотами, повинні бути захищені від механічних пошкоджень шляхом прокладання в металевих або пластикових трубах, а в місцях можливого руху автотранспорту – у спеціальних кабельних каналах або блоках. Окрім того, система керування повинна передбачати функцію автоматичного контролю цілісності захисного провідника та блокування процесу заряджання у разі виявлення обриву заземлення.

4.3 Заходи пожежної профілактики та реагування на аварійні ситуації

Пожежна безпека на об'єктах зарядної інфраструктури набуває

особливої актуальності через високу енергоємність літій-іонних акумуляторних батарей та схильність їх до займання у разі внутрішніх коротких замикань або механічних пошкоджень. Процес горіння таких батарей характеризується високою температурою, швидким поширенням полум'я та виділенням токсичних газів, що вимагає специфічних підходів до гасіння та евакуації.

На етапі проектування розташування зарядних станцій необхідно дотримуватися протипожежних розривів між зарядними слотами та будівлями, спорудами або зеленими насадженнями. Зарядні майданчики повинні бути забезпечені первинними засобами пожежогасіння, причому вибір вогнегасників має враховувати специфіку електроустановок під напругою та хімічну природу горіння літію. Рекомендується використання порошкових або вуглекислотних вогнегасників, а також наявність спеціалізованих протипожежних покривал, здатних локалізувати осередок займання електромобіля та запобігти поширенню вогню на сусідні транспортні засоби.

Розроблена в магістерській роботі інтелектуальна система керування також виконує функцію активної пожежної профілактики. Алгоритм безперервно моніторить струм споживання та температуру контактних з'єднань (за наявності відповідних датчиків). У разі фіксації аномального зростання струму або перегріву, що може свідчити про перед аварійний режим, контролер миттєво припиняє подачу напруги на пошкоджений слот, локалізуючи проблему до моменту виникнення відкритого горіння. Такий підхід дозволяє значно знизити ймовірність виникнення пожежі з електричних причин.

Для забезпечення безпечної евакуації персоналу та відвідувачів у разі надзвичайної ситуації повинна бути розроблена та затверджена схема руху автотранспорту, яка унеможлиблює блокування виїздів. Персонал, що обслуговує зарядну станцію, повинен проходити регулярні інструктажі та тренування з дій у разі загоряння електромобіля, включаючи порядок

знеструмлення установки, виклик пожежно-рятувальної служби та застосування первинних засобів пожежогасіння.

Висновки до розділу 4

У четвертому розділі роботи розроблено комплекс заходів з охорони праці та безпеки життєдіяльності, спрямованих на мінімізацію виробничих ризиків при експлуатації інтелектуальних зарядних станцій. За результатами аналізу можна зробити наступні висновки:

Встановлено, що основними факторами ризику є ураження електричним струмом (зокрема, постійним струмом високої напруги), термічний вплив внаслідок можливого загоряння акумуляторних батарей та вплив електромагнітних полів.

Обґрунтовано необхідність використання специфічних засобів захисту, таких як ПЗВ Типу В, чутливих до витоків постійного струму, та забезпечення надійного заземлення, що є критичним як для безпеки персоналу, так і для стабільної роботи мікропроцесорної системи керування.

Доведено, що запропонована система адаптивного керування виконує функцію превентивного захисту, здійснюючи безперервний моніторинг параметрів режиму та автоматично відключаючи аварійні ділянки, що значно знижує ймовірність пожежі.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У роботі вирішено актуальну задачу підвищення ефективності, надійності та безпеки функціонування зарядної інфраструктури електромобілів шляхом розробки та обґрунтування системи адаптивного керування режимами роботи в умовах обмеженого електропостачання.

Проведений системний аналіз розвитку електромобільності в Україні виявив критичний дисбаланс між стрімким зростанням парку електромобілів та пропускнуою здатністю існуючих розподільчих мереж. Встановлено, що масове підключення зарядних станцій за принципом некерованого доступу створює реальні загрози для енергетичної безпеки, зокрема перевантаження трансформаторних підстанцій та погіршення показників якості електроенергії.

Критичний аналіз існуючих алгоритмів керування довів їхню неефективність, оскільки метод фіксованого пріоритету призводить до дискримінації користувачів, а методи непрямого регулювання через тарифи провокують виникнення небезпечних вторинних піків навантаження.

Для вирішення проблеми диспетчеризації в умовах стохастичної невизначеності розроблено та обґрунтовано нову ієрархічну структуру системи керування, ключовим елементом якої стало введення поняття Індексу Пріоритету Заряджання. Цей інтегральний критерій дозволяє ранжувати споживачів залежно від їхньої реальної потреби в енергії, а не часу підключення.

Розроблено структуру нечіткого контролера типу Мамдані, що включає фазифікацію вхідних змінних, синтез бази знань із 40 продукційних правил та обґрунтування вибору методу дефазифікації Центру Тяжіння, що забезпечило плавність регулювальної характеристики та стійкість системи до випадкових збурень.

Створена комплексна імітаційна модель системи електропостачання в

середовищі Matlab Simulink, яка враховує нелінійні характеристики акумуляторних батарей та обмеження розподільчої мережі, дозволила підтвердити гіпотезу про недостатність наявної інфраструктури та зафіксувати аварійні режими при некерованому навантаженні.

Порівняльний аналіз результатів роботи розробленого адаптивного алгоритму та традиційних методів продемонстрував суттєві переваги запропонованого підходу. Система успішно вирішує задачу обмеження потужності, надійно утримуючи сумарне навантаження в межах заданого ліміту та запобігаючи спрацюванню захисної автоматики. Завдяки інтелектуальному заповненню провалів у добовому графіку навантаження, система дозволила передати електромобілям значно більший обсяг енергії, ніж при використанні типового методу жорсткого обмеження.

Використання Індексу Пріоритету Заряджання дозволило усунути ефект блокування черги, суттєво знизивши середньоквадратичне відхилення недоотриманої енергії для групи критичних користувачів, що гарантує своєчасне обслуговування пріоритетного транспорту. Алгоритм забезпечив автоматичну адаптацію до тарифної політики, знизивши споживання зарядної станції у пікові години, що дозволяє власникам інфраструктури оптимізувати операційні витрати.

Обґрунтовано комплекс заходів з охорони праці, необхідних для безпечної експлуатації потужних зарядних комплексів, зокрема критичну важливість використання спеціалізованих засобів захисту від ураження електричним струмом. Доведено, що розроблена система керування виконує функцію активного превентивного захисту, здійснюючи безперервний моніторинг параметрів режиму та автоматично локалізуючи аварійні ділянки, що мінімізує ризики виникнення пожеж та термічного пошкодження обладнання.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Закон України «Про ринок електричної енергії»: від 13.04.2017 р. № 2019-VIII. Відомості Верховної Ради України. 2017. № 27-28. Ст. 312.
2. Кодекс систем розподілу, затверджений постановою НКРЕКП від 14.03.2018 № 310. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0310874-18> (дата звернення: 10.12.2023).
3. Енергетична стратегія України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність»: схвалено розпорядженням Кабінету Міністрів України від 18.08.2017 р. № 605-р.
4. ДСТУ EN 61851-1:2019. Системи струмопровідного заряджання електричних транспортних засобів. Частина 1. Загальні вимоги (EN 61851-1:2011, IDT). Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2019. 42 с.
5. ДСТУ EN 50160:2014. Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності (EN 50160:2010, IDT). Київ: Мінекономрозвитку України, 2014. 38 с.
6. Денисюк С. П., Базюк Т. М. Інтелектуальні електричні мережі: навч. посіб. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. 215 с.
7. Кириленко О. В., Павлюченко Д. А., Черемісін М. М. Інтелектуальні електроенергетичні мережі: елементи та режими: підручник. Київ: Ін-т електродинаміки НАН України, 2016. 400 с.
8. Global EV Outlook 2023. Catching up with climate ambitions. International Energy Agency (IEA). Paris, 2023. URL: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2023>.
9. Zadeh L. A. Fuzzy sets. Information and Control. 1965. Vol. 8, Issue 3. P. 338–353. doi: 10.1016/S0019-9958(65)90241-X.
10. Wang D., Guan X., Wu J. Intelligent Charging Control of Electric Vehicles Based on Fuzzy Logic. IEEE Transactions on Smart Grid. 2019. Vol. 10, No. 5. P. 4972–4982.

11. Mamdani E. H., Assilian S. An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. *International Journal of Man-Machine Studies*. 1975. Vol. 7, Issue 1. P. 1–13.
12. Tan K. M., Ramachandaramurthy V. K., Yong J. Y. Integration of electric vehicles in smart grid: A review on vehicle to grid technologies and optimization techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016. Vol. 53. P. 720–732.
13. Shukla A., Verma K., Kumar R. Voltage dependent modelling of fast charging station for electric vehicle. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2019. Vol. 110. P. 11–22.
14. Bozchalui M. C., Hashad Y., Hassen H. Optimal operation of residential energy hubs in smart grids. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2012. Vol. 3, No. 4. P. 1755–1766.
15. Тугай Ю. І., Вербовий А. П. Вплив зарядних станцій електромобілів на якість електроенергії в розподільних мережах. *Технічна електродинаміка*. 2020. № 4. С. 62–68.
16. Жемеров Г. Г., Тугай Д. В. Якість електроенергії в системах електропостачання з напівпровідниковими перетворювачами. Харків: НТУ «ХПІ», 2019. 280 с.
17. IEC 61000-3-2:2018. Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-2: Limits - Limits for harmonic current emissions (equipment input current ≤ 16 A per phase). International Electrotechnical Commission. Geneva, 2018.
18. ISO 15118-1:2019. Road vehicles — Vehicle to grid communication interface — Part 1: General information and use-case definition. International Organization for Standardization. 2019.
19. Savio D. A., Juliet V. A., Chokkalingam B. Photovoltaic fed electric vehicle charging station with fuzzy logic controller. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*. 2019. Vol. 10, No. 1. P. 452–460.

20. Ali A., Aghaei J., Waset M. Real-Time Operation of Electric Vehicle Charging Stations under Uncertainties. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2021. Vol. 17, Issue 5. P. 3412–3423.
21. Tremblay O., Dessaint L. Experimental Validation of a Battery Dynamic Model for EV Applications. *World Electric Vehicle Journal*. 2009. Vol. 3. P. 289–298. (Basis for Matlab Simulink Battery Model).
22. Fuzzy Logic Toolbox User's Guide. Natick, MA: The MathWorks, Inc., 2023.
23. Стенніков В. А., Пеньковський А. В. Методи керування попитом на електроенергію в умовах Smart Grid. *Енергетика та електрифікація*. 2021. № 5. С. 12–18.
24. Uddin K., Moore A. D., Barai A. The effects of high frequency current ripple on electric vehicle battery performance. *Applied Energy*. 2016. Vol. 178. P. 142–154.
25. Yilmaz M., Krein P. T. Review of Battery Charger Topologies, Charging Power Levels, and Infrastructure for Plug-In Electric and Hybrid Vehicles. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2013. Vol. 28, No. 5. P. 2151–2169.