

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА

НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ, ІНФОРМАЦІЙНОЇ
ТА ТРАНСПОРТНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

Кафедра електричного транспорту

**ВПРОВАДЖЕННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ
ЗАРЯДЖАННЯМ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ ПРИ ЇХ ІНТЕГРАЦІЇ В
ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНУ СИСТЕМУ**

Бакалаврська кваліфікаційна робота

Здобувач:

Артем ШЕСТОПАЛОВ
гр. СТ2023-1у

Керівник:

Микола ХВОРОСТ
професор, д.т.н.


Харків – 2026

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА
імені О. М. Бекетова

Навчально-науковий інститут енергетичної, інформаційної та транспортної інфраструктури
Кафедра електричного транспорту
Освітньо-кваліфікаційний рівень бакалавр
Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
Освітня програма Електромеханіка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ЕТ

 Микола ХВОРОСТ
« 18 » червня 2026 р.

ЗАВДАННЯ

до бакалаврської кваліфікаційної роботи

Шестопалову Артему Володимировичу

прізвище, ім'я, по батькові

1. Тема роботи: Впровадження інтелектуального керування заряджанням
електромобілів при їх інтеграції в електроенергетичну мережу

керівник бакалаврської

кваліфікаційної роботи д.т.н., професор Микола ХВОРОСТ

затверджені наказом університету від « 22 » травня 2026 р. № 440-03

2. Строк подання студентом бакалаврської кваліфікаційної роботи 15.06.2026 р.

3. Вихідні дані до бакалаврської кваліфікаційної роботи *Матеріали переддипломної практики; параметри зарядної інфраструктури електромобілів; режими G2V, V2G, V2L; характеристики електроенергетичної системи; нормативна та науково-технічна література.*

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

1. Аналіз інтеграції електромобілів в електроенергетичну систему та керування їх заряджанням.

2. Інтелектуальне керування заряджанням електромобілів та їх взаємодія з електроенергетичною мережею.

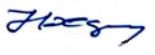





3. Розрахунок інтелектуальних режимів заряджання електромобілів з урахуванням обмежень мережі.

4. Охорона праці.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових слайдів)


Комунікаційні системи та вимоги V2G. Кіберзагрози в системах V2G. Механізми захисту в системах V2G. Інтеграція мобільності та електроенергетичної мережі (VGI). Спільна та автономна мобільність з інтеграцією VGI. Маршрутизація, управління автопарками та динамічне ціноутворення.

6. Консультанти розділів бакалаврської кваліфікаційної роботи


Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>Основна частина</i>	<i>Микола ХВОРОСТ, проф.</i>		
<i>Антиплагіат</i>	<i>Вікторія ЛЕВЧЕНКО, інж.</i>		
<i>Нормоконтроль</i>	<i>Вячеслав ШАВКУН, доц.</i>		

7. Дата видачі завдання 11.05.2026 р.**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№ з/п	Назва етапів бакалаврської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	<i>Стан питання</i>	11.05 – 24.05.2026	
2	<i>Розробка технічного завдання</i>	25.05 – 31.05.2026	
3	<i>Розрахункова частина</i>	01.05 – 07.06.2026	
4	<i>Охорона праці</i>	08.06 – 11.06.2026	
5	<i>Оформлення паперового та електронного варіантів роботи</i>	12.06 – 16.06.2026	
6	<i>Підготовка доповіді та презентації</i>	17.06 – 20.06.2026	

Здобувач

(підпис)**Артем ШЕСТОПАЛОВ**

(прізвище та ініціали)**Керівник бакалаврської кваліфікаційної роботи**

(підпис)**Микола ХВОРОСТ**

(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Бакалаврська кваліфікаційна робота присвячена впровадженню інтелектуального керування заряджанням електромобілів при їх інтеграції в електроенергетичну систему. У роботі розглянуто сучасні підходи до організації зарядної інфраструктури електромобілів, проаналізовано режими взаємодії електромобілів з електричною мережею (G2V, V2G, V2L), а також досліджено вплив зарядного навантаження на режими роботи електроенергетичних систем.

Особливу увагу приділено застосуванню інтелектуальних алгоритмів керування заряджанням електромобілів з метою оптимізації графіків навантаження, підвищення ефективності використання електричної енергії та забезпечення надійності електропостачання. Розроблено рекомендації щодо впровадження систем інтелектуального керування зарядною інфраструктурою.

У роботі також розглянуто питання охорони праці та безпеки при експлуатації зарядних станцій, проведено аналіз небезпечних факторів та виконано розрахунок захисного заземлення.

Ключові слова: електромобіль, електрична мережа, інтелектуальні системи керування заряджанням, електроенергетична система.

ЗМІСТ

	стор
ВСТУП.....	7
1 АНАЛІЗ ІНТЕГРАЦІЇ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ В ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНУ СИСТЕМУ ТА КЕРУВАННЯ ЇХ ЗАРЯДЖАННЯМ.....	9
1.1 Технічні основи систем «транспортний засіб-мережа».....	9
1.2 Інфраструктура зарядних станцій та структура інтеграції мережі для V2G.....	14
1.3 Висновки до розділу.....	20
2 ІНТЕЛЕКТУАЛЬНЕ КЕРУВАННЯ ЗАРЯДЖАННЯМ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ ТА ЇХ ВЗАЄМОДІЯ З ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНОЮ МЕРЕЖЕЮ.....	22
2.1 Системи зв'язку та стандарти сумісності.....	22
2.2 Оптимізація мобільності з урахуванням мережі та послуги VGI.....	27
2.3 Висновки до розділу.....	31
3 РОЗРАХУНОК ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ РЕЖИМІВ ЗАРЯДЖАННЯ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ З УРАХУВАННЯМ ОБМЕЖЕНЬ МЕРЕЖІ.....	33
3.1 Вихідні дані та постановка задачі.....	33
3.2 Аналіз режиму некерованого заряджання.....	34
3.3 Визначення допустимого навантаження від електромобілів.....	35
3.4 Розрахунок тривалості заряджання та формування графіка.....	36
3.5 Формування керованого режиму заряджання.....	37
3.6 Оцінка ефективності запропонованого рішення.....	37
3.7 Висновки до розділу.....	38

4	ОХОРОНА ПРАЦІ.....	39
4.1	Вступ.....	39
4.2	Аналіз небезпечних та шкідливих факторів.....	40
4.3	Організаційно-технічні заходи по забезпеченню безпеки....	42
4.4	Висновки до розділу.....	45
	ВИСНОВКИ.....	46
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	47

ВСТУП

Сучасний розвиток електроенергетики та транспортної галузі характеризується активним впровадженням інтелектуальних технологій, спрямованих на підвищення ефективності використання енергетичних ресурсів та оптимізацію режимів роботи електричних мереж. Одним із ключових напрямів є розвиток електромобільного транспорту, що супроводжується необхідністю створення ефективних систем керування процесами заряджання.

Особливого значення набуває впровадження інтелектуальних систем керування заряджанням електромобілів, які дозволяють координувати процеси споживання електроенергії в реальному часі, враховувати стан електричної мережі, тарифи на електроенергію, навантаження та інші фактори. Такі системи забезпечують можливість адаптивного керування зарядним навантаженням, що сприяє зменшенню пікових навантажень, підвищенню якості електроенергії та покращенню надійності електропостачання.

Актуальність теми обумовлена необхідністю впровадження інтелектуального керування заряджанням електромобілів для забезпечення ефективної та надійної роботи електроенергетичної системи.

Метою роботи є розробка підходів до впровадження інтелектуального керування заряджанням електромобілів при їх інтеграції в електроенергетичну систему.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Проаналізувати особливості інтеграції електромобілів в електроенергетичну систему та процеси їх заряджання.
2. Розглянути методи інтелектуального керування заряджанням електромобілів та їх взаємодію з електроенергетичною мережею.
3. Виконати розрахунок режимів заряджання електромобілів з урахуванням обмеження потужності трансформатора.

4. Розробити організаційно-технічні заходи з охорони праці при впровадженні та експлуатації систем інтелектуального керування заряджанням електромобілів в електроенергетичній системі.

1 АНАЛІЗ ІНТЕГРАЦІЇ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ В ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНУ СИСТЕМУ ТА КЕРУВАННЯ ЇХ ЗАРЯДЖАННЯМ

1.1 Технічні основи систем «транспортний засіб-мережа»

Концепція «транспортний засіб-мережа» (V2G) ґрунтується на поєднанні електрохімічних процесів, силової електроніки, інформаційно-комунікаційних технологій та систем керування, що забезпечують керований двонаправлений обмін електроенергією між електромобілем і енергосистемою. Сучасні електромобілі вже оснащені базовими компонентами, необхідними для реалізації цієї функції. Зокрема, тягова батарея, яка перебуває під контролем системи керування батареєю, взаємодіє з силовими перетворювачами, що регулюють потоки енергії через бортові або зовнішні зарядні пристрої [1].

Можливість зворотного енергетичного потоку підтверджується функцією рекуперативного гальмування, яка фактично демонструє фізичні передумови для інтеграції з мережею. Серед різних типів електромобілів найбільш придатними до реалізації V2G є акумуляторні електромобілі, оскільки вони мають значну ємність накопичувача та повністю електричну силову установку. Плагін-гібриди також можуть брати участь у V2G, проте їх внесок обмежений меншою ємністю батареї та наявністю комбінованого приводу [2]. Електромобілі на паливних елементах і транспорт із сонячними панелями розглядаються як альтернативні джерела енергії, однак їх застосування у V2G наразі обмежене через інфраструктурні та економічні бар'єри.

Система керування батареєю відіграє ключову роль у забезпеченні безпечної експлуатації, контролюючи електричні, теплові та експлуатаційні параметри при взаємодії з мережею [3]. Сучасні підходи до побудови системи керування батареєю передбачають використання інтелектуальних алгоритмів оцінки стану батареї, врахування процесів деградації та оптимізацію теплових

режимів, що є критично важливим для стабільної роботи в умовах циклічного V2G-навантаження [1].

Основною функціональною особливістю V2G є можливість керованого двонаправленого обміну потужністю. У режимі заряджання електромобіль виступає як гнучке навантаження, а в режимі розряджання – як джерело енергії, здатне забезпечувати згладжування піків навантаження, балансування системи, а також надання допоміжних послуг, зокрема регулювання частоти та напруги. При цьому зарядні пристрої, що підтримують V2G, повинні відповідати вимогам мережевих кодів і стандартів якості електроенергії. Координація роботи великої кількості електромобілів зазвичай здійснюється агрегаторами або централізованими системами керування, які враховують стан мережі, економічні сигнали та потреби користувачів. Ефективна агрегація є ключовим чинником для отримання системного ефекту від впровадження V2G.

Масштабне впровадження V2G потребує розвитку зарядної інфраструктури, здатної забезпечувати двонаправлений обмін енергією та надійне підключення до мережі [4]. На практиці переважає кондуктивна зарядка, яка охоплює як малопотужні рішення змінного струму (рівні 1 і 2), так і швидкі зарядні станції постійного струму для громадського використання [5].

Функціонування інфраструктури визначається міжнародними стандартами. Так, IEC 61851 і SAE встановлюють загальні вимоги до процесу заряджання, тоді як стандарти роз'ємів регламентують параметри потужності, фізичні інтерфейси та протоколи взаємодії [4, 5]. Заряджання змінним струмом, яке базується на сигналі керування-пілота, має обмежені можливості для двонаправленої роботи, тоді як системи швидкої зарядки постійного струму із цифровими каналами зв'язку забезпечують повноцінну підтримку V2G. Зокрема, стандарт CHAdeMO та його наступні модифікації передбачають двонаправлену передачу енергії.

На рисунку 1.1 наведено основні фактори, що визначають ефективність реалізації V2G, включаючи взаємодію користувачів, стандартизацію, інвестиції в інфраструктуру, питання кібербезпеки, деградацію акумуляторів та

організацію управління. Всі ці аспекти є взаємопов'язаними та потребують комплексного вирішення.



Рисунок 1.1 – Ключові проблеми, що регулюють функціонування та інтеграцію V2G

Важливим елементом функціонування V2G є система зв'язку та диспетчерського керування. Обмін даними між транспортними засобами, зарядною інфраструктурою та енергосистемою має здійснюватися з мінімальною затримкою та із застосуванням сучасних методів криптографічного захисту [6]. Стандарт ISO 15118 регламентує взаємодію між електромобілем і зарядною станцією, включаючи механізми автентифікації та функцію Plug-and-Charge [7]. Інтеграцію з системами автоматизації забезпечує IEC 61850, а взаємодію з бекенд-платформами – протоколи OCPP та OCPP. На рівні енергосистеми координація здійснюється системами управління енергією, які оптимізують режими роботи електромобілів і відновлюваних джерел енергії.

Використання акумуляторів електромобілів у V2G змінює характер їх навантаження, що впливає на процеси зношування. Дослідження показують, що збільшення кількості циклів і глибини розряду може прискорювати втрату

ємності та зростання внутрішнього опору батареї [9]. При цьому неглибоке циклування, характерне для регулювання частоти, має менший вплив на деградацію, ніж глибокі цикли, пов'язані з енергетичним арбітражем або покриттям пікових навантажень. Це підкреслює необхідність врахування деградації при плануванні режимів роботи.

Додатковим викликом є кібербезпека, оскільки інтеграція V2G збільшує кількість точок доступу до системи. Потенційні загрози включають несанкціонований доступ, зміну даних та втручання у процеси керування [10]. Для їх мінімізації застосовуються багаторівневі системи захисту, що включають автентифікацію, шифрування, моніторинг та безпечне оновлення програмного забезпечення. Важливу роль також відіграють нормативно-правові вимоги щодо захисту даних і розподілу відповідальності [11].

Практична реалізація V2G значною мірою обмежується деградацією акумуляторів та пов'язаними з нею витратами. Зазвичай термін служби батареї визначається досягненням рівня близько 80% від початкової ємності, після чого її експлуатаційні характеристики суттєво погіршуються. Враховуючи, що вартість батареї становить до третини вартості електромобіля, це має критичне економічне значення.

Деградація проявляється у зменшенні ємності, потужності та запасу ходу і зумовлена складними електрохімічними процесами, такими як утворення SEI-шару, втрата літію та деградація активних матеріалів.

У контексті V2G важливо враховувати, що різні типи мережевих послуг по-різному впливають на знос батареї. Послуги, пов'язані з регулюванням параметрів мережі, зазвичай передбачають неглибокі цикли і мають обмежений вплив на ресурс. Натомість енергоємні операції, такі як покриття пікових навантажень або енергетичний арбітраж, значно прискорюють деградацію.

Ступінь старіння також залежить від умов експлуатації: температури, струмів і глибини розряду. Високі температури та струми прискорюють деградаційні процеси, тоді як робота у вузькому діапазоні заряду сприяє продовженню ресурсу батареї.

Для зменшення негативного впливу деградації застосовуються спеціальні стратегії керування, що враховують стан батареї. Використання відповідних моделей (емпіричних, фізичних, на основі даних або гібридних) дозволяє інтегрувати фактор деградації у системи управління. Обмеження струмів, звуження діапазону SOC та оптимізація режимів роботи дозволяють зменшити довгострокові втрати ресурсу.

Таблиця 1.1 – Типові підходи до моделювання деградації акумуляторів, що використовуються в дослідженнях V2G

Техніка моделювання	Ключові змінні	Сильні сторони аналізу V2G	Обмеження та практичні труднощі
Емпіричні моделі життєвого циклу	DOD, кількість циклів, температура	Швидка інтеграція в планування та техніко-економічні дослідження	Обмежена екстраполяція та точність перехідних процесів
Напівемпіричні моделі старіння	Вікно SOC, поточна швидкість, температура	Відображає домінуючі тенденції старіння з помірною складністю	Потрібне калібрування для конкретних хімічних потреб
Електрохімічні моделі	Запаси літію, зростання SEI, імпеданс	Висока фізична точність для детального аналізу терміну служби	Обчислювально інтенсивний
Моделі на основі даних (на основі машинного навчання)	Історія експлуатації, напруга, струм, температура	Обробляє нелінійне старіння та моніторинг рівня автопарку	Вибагливість до даних та обмежена інтерпретаційність
Гібридні моделі деградації	Емпіричні + електрохімічні індикатори	Підвищена точність завдяки фізичному аналізу	Вища складність впровадження

З економічної точки зору, врахування деградації є обов'язковим для коректної оцінки ефективності V2G. Оптимізація повинна враховувати баланс між доходами від мережевих послуг і витратами на знос батареї [12].

Узагальнюючи, слід зазначити, що результати досліджень V2G часто відрізняються через різні підходи до моделювання деградації, архітектур систем та економічних припущень. Електрохімічні дослідження підтверджують суттєвий вплив режимів експлуатації на старіння батарей [9], тоді як деякі моделі на рівні енергосистеми спрощують або ігнорують цей фактор, що призводить до оптимістичних оцінок. Дослідження силової електроніки підтверджують технічну реалізованість V2G, але часто не враховують реальні експлуатаційні обмеження. У свою чергу, роботи з кібербезпеки виявляють ризики, які зазвичай не інтегруються в технічні чи економічні моделі [6].

Це свідчить про необхідність комплексного підходу до оцінки V2G, який поєднує електрохімічні, економічні, технічні та кіберфізичні аспекти. Лише інтегровані моделі дозволять отримати достовірну оцінку ефективності та масштабованості систем «транспортний засіб – мережа».

1.2 Інфраструктура зарядних станцій та структура інтеграції мережі для V2G

Ефективне впровадження технології V2G значною мірою визначається рівнем розвитку зарядної інфраструктури, її стандартизацією та здатністю інтегруватися в електроенергетичну систему. Зарядну інфраструктуру доцільно розглядати як багаторівневу систему, що охоплює фізичні зарядні пристрої, силові двонаправлені перетворювачі, стандартизовані інтерфейси підключення та вимоги до взаємодії з мережею. Сукупність цих елементів визначає можливість електромобілів стабільно надавати мережеві послуги та підтримувати режими роботи розподільчих мереж.

Режими заряджання та ієрархія інфраструктури

Основним способом заряджання електромобілів, у тому числі в системах V2G, залишається кондуктивне підключення. Воно передбачає безпосередній електричний контакт між транспортним засобом і обладнанням зарядних станцій через стандартизований роз'єм [13]. Залежно від архітектури, перетворення енергії може здійснюватися як у межах транспортного засобу, так і на стороні зарядної станції. Це відповідає двом підходам: бортовій зарядці змінним струмом і зовнішній швидкій зарядці постійним струмом. Вказані архітектури, наведені на рисунку 1.2, формують основу сучасної зарядної інфраструктури та визначають рівень потужності, складність керування та можливості реалізації V2G.



Рисунок 1.2 –Бортова та зовнішня зарядки для електромобілів

Інфраструктура заряджання функціонує на різних рівнях. Зарядні пристрої, що встановлюються в житлових будинках або на робочих місцях, зазвичай

працюють на рівнях 1 і 2 змінного струму (2-22 кВт). Вони характеризуються тривалим часом підключення, що робить їх придатними для координації режимів заряджання та реалізації V2G. Натомість громадські зарядні станції, зокрема швидкі зарядки вздовж транспортних магістралей, використовують потужні джерела постійного струму (50-350 кВт). Через короткий час підключення їх участь у V2G є обмеженою [14]. Додатково зарядні станції можуть інтегруватися в локальні енергосистеми – наномережі, мікромережі або мережі рівня громади, де доступність генерації та накопичення енергії впливає на алгоритми керування потоками потужності.

Архітектури бортових та зовнішніх зарядних пристроїв

Важливим аспектом оцінки можливостей V2G є відмінність між бортовими та зовнішніми зарядними пристроями. Бортові зарядні пристрої обмежені конструктивними особливостями транспортного засобу, включаючи габарити та тепловідведення, що зазвичай обмежує їх потужність на рівні до 22 кВт. Більшість таких пристроїв підтримують лише односпрямоване заряджання.

Зовнішні зарядні станції постійного струму, навпаки, виносять силові перетворювачі за межі транспортного засобу. Це дозволяє досягати значно вищих рівнів потужності, ефективніше організувати охолодження та інтегрувати такі системи з локальними джерелами енергії [15]. Подібні рішення є більш придатними для реалізації V2G, оскільки забезпечують стабільне керування двонаправленими потоками енергії, наприклад, із використанням ШІМ-випрямлячів або багатопортових DC/DC перетворювачів.

Незалежно від архітектури, EVSE виконує роль ключового інтерфейсу між мережею, локальними ресурсами та батареєю електромобіля. Конфігурація перетворювачів (одно- чи двоступенева, одно- чи двонаправлена) визначає відповідність мережевим вимогам і можливість надання допоміжних послуг.

Сімейства зарядних роз'ємів та стандарти, що підтримують V2G

Сучасна інфраструктура заряджання базується на кількох основних типах роз'ємів: SAE J1772, CCS, CHAdeMO та GB/T 20234. Вони регламентують геометрію інтерфейсу, допустимі рівні потужності та протоколи обміну даними.

Заряджання змінним струмом із використанням сигналу керування-пілота має обмежені можливості для реалізації V2G, оскільки не передбачає повноцінного зворотного потоку енергії. У свою чергу, системи постійного струму використовують цифровий зв'язок між електромобілем і зарядні станції, що дозволяє точно керувати як заряджанням, так і розряджанням. Хоча CCS та GB/T теоретично можуть підтримувати V2G, для цього необхідні додаткові технічні вдосконалення.

На сьогодні стандарт CHAdeMO є найбільш розвиненим щодо підтримки V2G, забезпечуючи повноцінний двонаправлений обмін енергією [16]. Його розвитком є стандарт ChaoJi (CHAdeMO 3.0), який передбачає надвисокі рівні потужності (до 900 кВт) із збереженням сумісності з попередніми рішеннями.

Для важкого транспорту розробляється система Megawatt Charging System, яка орієнтована на потужності понад 1 МВт та підтримку двонаправленого обміну енергією. Це розширює сферу застосування V2G на автобуси, вантажівки та інші великогабаритні електротранспортні засоби.

Таблиця 1.2 – Типи зарядних пристроїв для електромобілів, пов'язані стандарти та можливості V2G

Тип зарядного пристрою	Діапазон потужності	Супутні стандарти	Метод зв'язку	Можливість V2G	Технічні зауваження
Зарядження змінним струмом	2-22 кВт	SAE J1772, IEC 61851	Аналогова сигналізація керування-пілота	Не підтримується	Бракує цифрового зв'язку та контрольованого зворотного потоку потужності, що обмежує придатність для практичної роботи V2G
Швидка зарядка постійним струмом	50-350 кВт	CCS (Combo 1/2), GB/T 20234 (DC)	Цифрова комунікація між електромобілями та електричними навантажувачами	Потенціал	Двонаправлена робота технічно здійсненна, але масштабне розгортання V2G вимагає посиленої координації захисту та швидкого реагування на уставки
Зарядка постійним струмом високої потужності	до 900 кВт	CHAdeMO, ChaoJi (CHAdeMO 3.0)	Цифровий зв'язок з активним керуванням потужністю	Повністю підтримується	CHAdeMO пропонує повністю стандартизовану функціональність V2G, а ChaoJi покращує цю платформу, забезпечуючи надвисокоєфективну роботу, зберігаючи при цьому зворотну сумісність
Зарядка постійним струмом мегаватного класу	>1 МВт	Система зарядки мегават (MCS)	Цифровий зв'язок на основі ISO 15118-20	Підтримується (готовий до V2X)	Розроблено для важких електромобілів, що забезпечує двонаправлений обмін енергією для автобусів, вантажівок та промислових застосувань

Інтеграція в мережу та стандарти якості електроенергії

При роботі електромобілів у режимі навантаження необхідно дотримуватися встановлених обмежень щодо напруги, струму та гармонічних спотворень. Наприклад, однофазне заряджання може спричиняти перекося фаз, допустимий рівень яких зазвичай становить 2–3% відповідно до стандартів IEEE, GB/T та EN 50160 [103]. Неконтрольоване заряджання здатне підвищувати пікові навантаження, що обумовлює необхідність застосування керованих стратегій [17].

Вимоги до інтеграції визначаються комплексом міжнародних стандартів, що охоплюють аспекти якості електроенергії, безпеки, взаємодії та підключення до мережі.

У режимі V2G електромобілі розглядаються як розподілені джерела енергії, тому повинні відповідати стандартам підключення, таким як IEEE 1547, IEC 61727 та GB/T 33593. Вони регламентують параметри регулювання напруги і частоти, захист від острівного режиму, коефіцієнт потужності та допустимі рівні інжекції постійного струму. Додатково важливими є вимоги електромагнітної сумісності, правил монтажу та сертифікації обладнання.

Завдяки використанню силових перетворювачів електромобілі можуть не лише споживати, а й генерувати реактивну потужність, забезпечуючи підтримку напруги та покращення коефіцієнта потужності.

Схеми перетворювачів змінного/постійного струму для V2G

Конструкція силової частини зарядного пристрою визначає ефективність роботи, відповідність стандартам і можливості реалізації V2G. Поширеною є двоступенева структура, яка включає AC/DC перетворювач із корекцією коефіцієнта потужності та ізольований DC/DC перетворювач для регулювання параметрів заряджання [18].

У бортових системах часто застосовуються підвищувальні або напівмостові схеми PFC, які забезпечують компроміс між вартістю, ефективністю та компактністю. Для двонаправленої роботи використовуються ШІМ-випрямлячі та тотемно-полюсні схеми, що дозволяють реалізувати повний чотириквadrантний режим роботи.

В ізольованих каскадах поширені резонансні перетворювачі типу PSFB та LLC, тоді як для двонаправлених систем застосовуються топології DAB і CLLC, які забезпечують високу ефективність та м'яке перемикання [18]. У швидких зарядних станціях використовуються трифазні випрямлячі, що забезпечують низькі гармонічні спотворення та ефективне керування реактивною потужністю.

Порівняльний аналіз показує, що заряджання в житлових і робочих умовах є більш придатним для V2G через тривалий час підключення, тоді як швидкі зарядні станції обмежені короткими сеансами роботи [14]. Бортові рішення мають обмеження за потужністю та тепловими режимами, тоді як зовнішні системи постійного струму забезпечують більшу гнучкість для двонаправленої роботи [15]. Стандарти CHAdeMO, ChaoJi та MCS демонструють розвиток у напрямку високопотужних V2G-рішень [16]. Загалом, ефективне масштабування V2G потребує поєднання сучасних перетворювачів, дотримання мережевих стандартів і впровадження інтелектуальних стратегій керування [17, 18].

1.3 Висновки до розділу

У першому розділі проаналізовано особливості інтеграції електромобілів в електроенергетичну систему та основні підходи до організації процесів їх заряджання. Встановлено, що розвиток зарядної інфраструктури, типи зарядних станцій і застосовувані стандарти визначають можливості взаємодії електромобілів з мережею.

Показано, що некероване заряджання може призводити до збільшення пікових навантажень і погіршення режимів роботи електроенергетичної

системи. У зв'язку з цим важливим є застосування керованих режимів заряджання.

Таким чином, проведений аналіз підтверджує необхідність використання інтелектуального керування заряджанням електромобілів для забезпечення їх ефективної інтеграції в електроенергетичну систему.

2 ІНТЕЛЕКТУАЛЬНЕ КЕРУВАННЯ ЗАРЯДЖАННЯМ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ ТА ЇХ ВЗАЄМОДІЯ З ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНОЮ МЕРЕЖЕЮ

2.1 Системи зв'язку та стандарти сумісності

Ефективне функціонування системи «транспортний засіб-мережа» значною мірою визначається надійністю комунікаційної інфраструктури, яка забезпечує швидкий, захищений та сумісний обмін інформацією між електромобілями, зарядними станціями, агрегаторами та операторами електромережі. Оскільки в таких системах одночасно координуються як енергетичні, так і інформаційні потоки, комунікаційна архітектура повинна базуватися на стандартизованих протоколах, ефективних механізмах автентифікації та масштабованих серверних рішеннях.

Вимоги до зв'язку для мереж V2G

Комунікаційні системи V2G мають специфічні особливості, що відрізняють їх від класичних Smart Grid-рішень. Висока мобільність електромобілів, нестабільність підключення та обмежений час взаємодії вимагають оперативного встановлення зв'язку та гарантованої передачі критично важливих даних, зокрема інформації про рівень заряду батареї, доступність транспортного засобу, тарифні сигнали та команди керування.

Крім того, обробка персональних і технічних даних, таких як ідентифікаційні параметри користувача або профілі використання, потребує застосування сучасних криптографічних засобів для забезпечення конфіденційності та захисту інформації [19]. Як показано на рисунку 2.1, комунікаційна структура V2G охоплює кілька рівнів взаємодії – від електромобіля до операторів мережі, забезпечуючи ієрархічну координацію через стандартизовані інтерфейси. Взаємодія між електромобілем та зарядною

станцією реалізується за допомогою ISO 15118, обмін даними між зарядною станцією та сервером – через OCPP, а між різними операторами – через OCPP. Вищий рівень координації забезпечується протоколами класу IEC 61850 або OpenADR із використанням захищених каналів зв'язку.

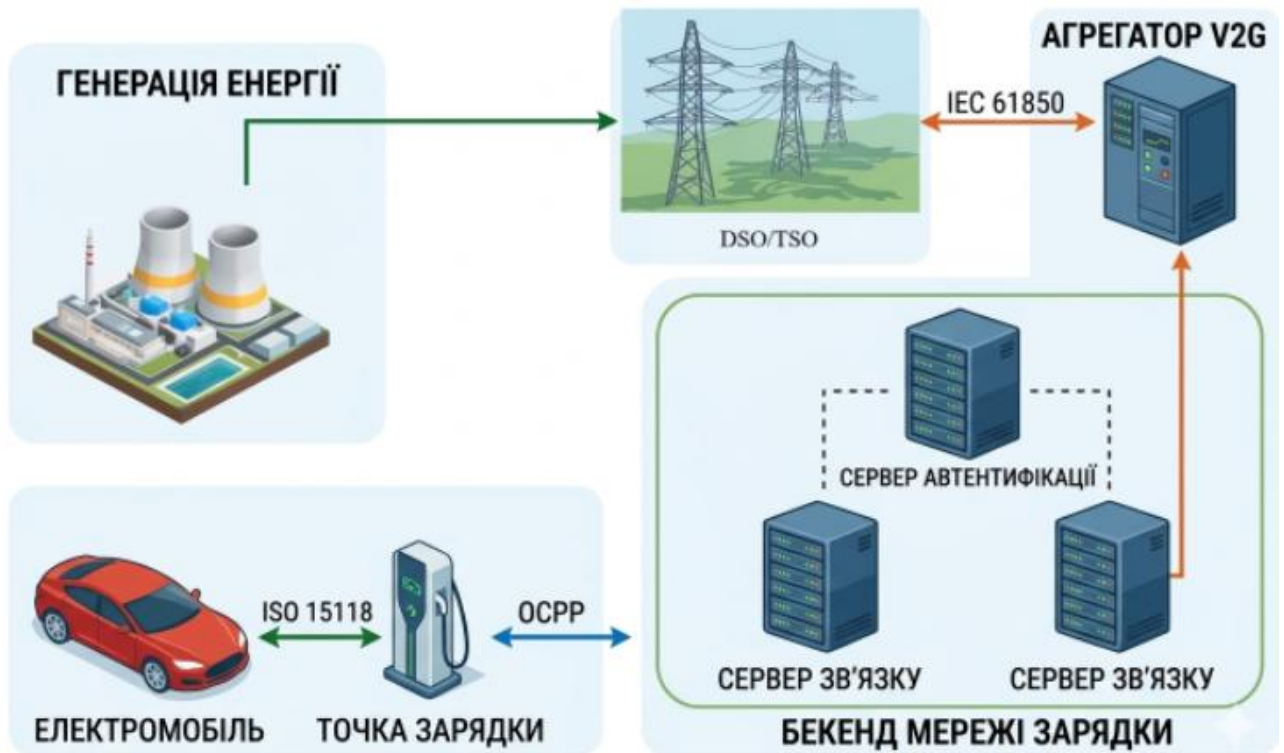


Рисунок 2.1 – Архітектура зв'язку на системному рівні для роботи V2G

Застосування традиційних бездротових технологій, таких як Wi-Fi, є обмеженим через нестабільність затримок і чутливість до перешкод. Водночас стандарти бездротової передачі енергії (GB/T 38775.2, IEC 61980, SAE J2954) регламентують лише фізичний рівень, не охоплюючи вимоги до прикладного рівня, що необхідний для реалізації повноцінного V2G.

Зі збільшенням кількості електромобілів у системі (до сотень тисяч і більше) питання затримки передачі даних та навантаження на канали зв'язку стають критичними. Централізовані підходи керування в таких умовах є малоефективними через перевантаження мережі та нестабільність роботи [20]. Тому сучасні системи V2G будуються на основі ієрархічних архітектур: локальні

контури керування реалізуються безпосередньо на рівні EV або EVSE, проміжні рівні агрегують дані, а верхній рівень виконує стратегічне планування.

Таке розділення дозволяє ізолювати швидкі процеси керування від впливу затримок зв'язку, що забезпечує стабільність системи навіть за великої кількості учасників. Оцінки показують, що навіть при передачі невеликих пакетів даних загальний трафік може досягати сотень Мбіт/с, що підтверджує необхідність використання агрегації даних та обробки на периферії мережі [21].

Протоколи сумісності та зв'язок на рівні додатків

Сумісність між різними компонентами зарядної інфраструктури забезпечується за рахунок використання стандартизованих протоколів. Стандарт ISO 15118 регламентує обмін даними між електромобілем та зарядною станцією, включаючи керування сеансом заряджання, передачу тарифної інформації та реалізацію функції «Plug-and-Charge» [7, 8]. Для захисту даних застосовуються механізми TLS та сертифікати X.509, однак використання лише односторонньої автентифікації може створювати вразливості.

Протокол OCPP використовується для зв'язку між зарядними станціями та серверною частиною, забезпечуючи моніторинг, конфігурацію, діагностику та білінг. Водночас його поточні версії мають обмежену підтримку функцій двонаправленої передачі потужності, що ускладнює реалізацію V2G без додаткових розширень.

OCPI, у свою чергу, забезпечує взаємодію між різними операторами зарядної інфраструктури, стандартизуючи обмін даними про розташування станцій, тарифи та параметри сеансів [22]. Для повної сумісності ці протоколи повинні інтегруватися з фізичними стандартами заряджання, такими як CHAdeMO, CCS та GB/T.

Вплив кібербезпеки в екосистемах V2G

Розвиток V2G призводить до значного зростання кіберризиків, оскільки електромобілі стають активними елементами кіберфізичної енергосистеми. Взаємозв'язок між енергетичними потоками, цифровим зв'язком і керуванням означає, що кібератаки можуть безпосередньо впливати на фізичну роботу мережі.

Вразливості можуть виникати на різних рівнях — від електромобіля до мережеских систем керування. Наприклад, атаки на зарядні станції можуть поширюватися на інтелектуальні лічильники, системи автоматизації та інші елементи мережі. Серед основних загроз виділяють перехоплення даних, підміну повідомлень, атаки типу «людина посередині», а також маніпуляції сигналами керування.

Особливо небезпечними є атаки, пов'язані з оновленням програмного забезпечення, оскільки вони можуть змінювати логіку роботи системи та поширюватися на інші рівні інфраструктури [23]. Також значну загрозу становлять атаки введення неправдивих даних, які можуть призвести до некоректних рішень керування без явних ознак порушення.

Інтеграція сучасних технологій, таких як IoT, штучний інтелект і блокчейн, підвищує функціональність системи, але одночасно ускладнює її структуру та збільшує потенційні ризики [24]. Як показано на рисунку 2.2, різні типи атак можуть взаємодіяти між собою та підсилювати негативний вплив на систему.



Рисунок 2.2 – Кіберзагрози в системах V2G

Таким чином, кібербезпека V2G повинна розглядатися як комплексна проблема кіберфізичної стійкості, що потребує інтегрованих рішень, які враховують як інформаційні, так і енергетичні аспекти функціонування системи [22].

Механізми безпеки та нові дослідницькі виклики

Для забезпечення надійної роботи V2G необхідно впроваджувати багаторівневі системи захисту, що включають шифрування, автентифікацію, контроль доступу та системи виявлення вторгнень. Використання TLS, сертифікатів та сучасних криптографічних алгоритмів є базовими елементами безпеки [25].

Однак складні алгоритми шифрування можуть створювати значне навантаження на обладнання, що стимулює розвиток легких та апаратно-прискорених рішень. Для захисту конфіденційності також пропонуються

криптографічні підходи на основі ідентифікації, хоча їх реалізація потребує ефективного управління ключами.

Сучасні дослідження також розглядають використання блокчейну та туманних обчислень для підвищення надійності та розподілу обчислювальних ресурсів. Водночас для оцінки впливу кіберзагроз необхідні комплексні моделі, які враховують мобільність електромобілів, поведінку користувачів та особливості енергосистем [6].

Аналіз літератури показує, що існуючі дослідження часто зосереджені на окремих аспектах (зв'язок, безпека або протоколи), що призводить до фрагментарного розуміння проблеми. Для забезпечення ефективного впровадження V2G необхідний комплексний підхід, який поєднує комунікаційні технології, кібербезпеку та керування енергетичними процесами.

2.2 Оптимізація мобільності з урахуванням мережі та послуги VGI

Розширення концепції V2G в мережево-інтегровані транспортні засоби відображає перехід від розгляду електромобіля виключно як елемента енергосистеми до його інтеграції в єдине середовище «енергетика–транспорт». У такій постановці взаємодія охоплює не лише процеси заряджання та обміну енергією, а й транспортні процеси, зокрема маршрутизацію, експлуатацію автопарків та поведінку користувачів. Основними напрямками дослідження є координація режимів заряджання, поєднання задач маршрутизації з енергетичним плануванням, розвиток спільної та автономної мобільності, а також формування ефективних механізмів ціноутворення в інтегрованих енергетично-транспортних системах.

Адаптивна координація заряджання в середовищах VGI

Зі зростанням кількості електромобілів їх заряджання стає суттєвим фактором навантаження на енергосистему. За оцінками Міжнародного

енергетичного агентства, у 2024 році електромобілі спожили приблизно 180 ТВт·год електроенергії, а до 2030 року цей показник може зрости до 780 ТВт·год [26]. Без належного керування це призводить до зростання пікових навантажень та перевантаження мережі.

Для вирішення цієї проблеми застосовуються скоординовані стратегії заряджання та розряджання, які дозволяють підвищити стабільність мережі, зменшити витрати та забезпечити допоміжні послуги, зокрема регулювання частоти, балансування навантаження та інтеграцію відновлюваних джерел енергії.

Існуючі підходи до керування заряджанням у VGI можна поділити на три основні групи:

- ✓ *Методи, засновані на навчанні.* Алгоритми навчання з підкріпленням ефективно працюють в умовах невизначеності, пов'язаної з мобільністю та ціноутворенням. Такі підходи дозволяють мінімізувати витрати, зменшувати коливання напруги та враховувати деградацію акумуляторів.
- ✓ *Методи оптимізації.* За наявності чітко визначених обмежень використовуються підходи математичного програмування.
- ✓ *Методи на основі правил.* У роботі [10] запропоновано алгоритм, що використовує прості правила на основі параметрів мережі та стану батареї. Такі підходи легко реалізуються, але мають обмежену гнучкість.

Інтегрована маршрутизація та планування енергоспоживання для VGI

Задача маршрутизації електромобілів у VGI-системах розширюється за рахунок урахування енергетичних обмежень, часу заряджання та доступності інфраструктури. В умовах VGI маршрутизація та енергетичне планування

взаємопов'язані: вибір маршруту впливає на можливості взаємодії з мережею, а стан мережі – на оптимальний маршрут.

Методи навчання з підкріпленням показали високу ефективність у таких задачах. Традиційні підходи включають генетичні алгоритми, MILP та гібридні методи [27], які забезпечують високу якість рішень, але потребують значних обчислювальних ресурсів.

Для масштабних систем застосовуються децентралізовані підходи, зокрема багатоагентні моделі RL [28], що дозволяють ефективно координувати велику кількість транспортних засобів.

Економічні моделі [29] підтверджують, що інтеграція V2G у задачі маршрутизації дозволяє зменшити витрати та підвищити ефективність логістичних процесів. У цілому, маршрутизація, заряджання та участь у V2G формують єдину комплексну задачу оптимізації.

Спільна та автономна мобільність з інтеграцією VGI

Системи спільної мобільності характеризуються високою динамічністю попиту та інтенсивним використанням транспортних засобів. У таких умовах необхідно враховувати як потреби мобільності, так і енергетичні аспекти.

На рисунку 2.3 показано архітектуру, в якій агрегатор електромобілів взаємодіє з оператором автопарку. Агрегатор відповідає за енергетичне планування, тоді як оператор – за транспортні процеси. Така взаємодія дозволяє узгоджувати енергетичні та логістичні рішення.

Дослідження показують, що спільні та автономні автопарки мають вищий потенціал участі у V2G порівняно з приватними електромобілями [30].

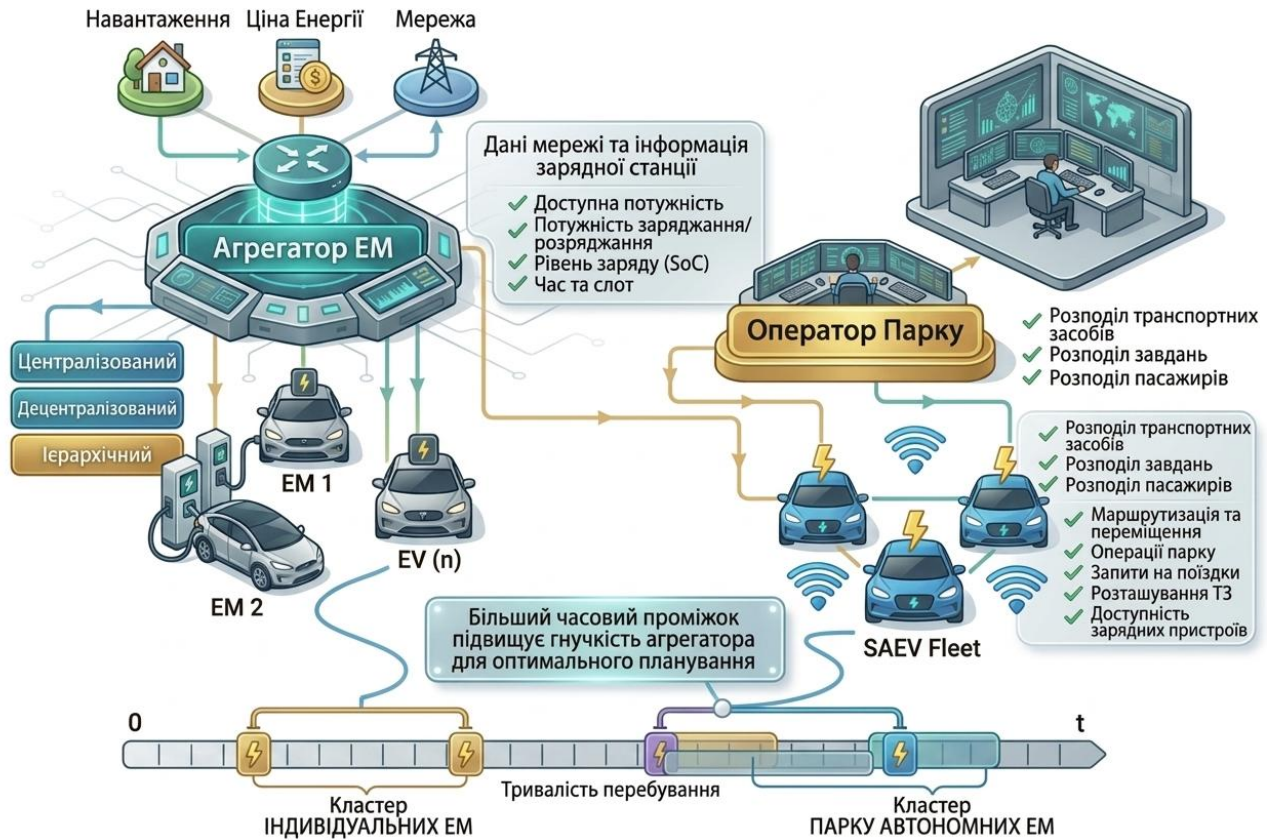


Рисунок 2.3 – Архітектура скоординованої агрегації електромобілів та роботи парку автономних електромобілів за умов обмежень мережі та мобільності

Моделювання [30] демонструє, що один автономний електромобіль може замінити декілька приватних транспортних засобів, зберігаючи рівень обслуговування. Це свідчить про значний потенціал інтеграції VGI у транспортні системи.

Стратегії динамічного ціноутворення для систем VGI

Ціноутворення є ключовим інструментом узгодження інтересів транспортної та енергетичної систем. Динамічні тарифи дозволяють зміщувати навантаження у позапікові періоди, покращувати використання відновлюваної енергії та зменшувати затори.

У [31] запропоновано модель, яка враховує поведінку користувачів та стан мережі. Деякі дослідження показують, що оптимізація тарифів дозволяє зменшити втрати та покращити якість електроенергії, також дозволяють враховувати інтереси різних учасників системи і демонструють покращення розподілу навантаження.

Подальші дослідження повинні враховувати поведінкові аспекти користувачів, динаміку транспортних потоків та обмеження енергосистеми, забезпечуючи при цьому масштабованість алгоритмів.

Узагальнюючи, можна зазначити, що існуючі підходи до управління в системах VGI відрізняються за рівнем складності та ефективності. Методи на основі навчання добре працюють в умовах невизначеності, але потребують значних обсягів даних. Оптимізаційні підходи забезпечують точні рішення, однак мають високу обчислювальну складність. Методи на основі правил є простими у реалізації [10], але обмежені за функціональністю.

У задачах маршрутизації навчальні методи демонструють кращу масштабованість, тоді як класичні алгоритми забезпечують вищу точність [27]. Спільні та автономні автопарки мають більший потенціал для участі у V2G [30], а ефективне ціноутворення може суттєво покращити роботу інтегрованих систем.

2.3 Висновки до розділу

У другому розділі розглянуто принципи організації інтелектуального керування заряджанням електромобілів та їх взаємодії з електроенергетичною мережею. Встановлено, що ефективність функціонування систем V2G значною мірою визначається надійністю комунікаційної інфраструктури, застосуванням стандартизованих протоколів обміну даними та забезпеченням кібербезпеки.

Показано, що сучасні протоколи, такі як ISO 15118, OCPP, OCPI, забезпечують сумісність елементів зарядної інфраструктури, однак їх розвиток

має бути спрямований на підтримку двонаправленого обміну потужністю та інтеграцію з системами керування електромережами.

Визначено, що зростання кількості електромобілів потребує переходу від централізованих до ієрархічних та децентралізованих систем керування, що дозволяє зменшити навантаження на мережу та підвищити її стійкість.

Проаналізовано підходи до оптимізації режимів заряджання в рамках концепції VGI, зокрема методи математичної оптимізації, алгоритми навчання та правила керування. Встановлено, що найбільш ефективними з точки зору електроенергетики є методи, які враховують обмеження мережі, графіки навантаження та можливості участі електромобілів у регулюванні режимів роботи енергосистеми.

Таким чином, реалізація інтелектуального керування заряджанням електромобілів дозволяє підвищити пропускну здатність та надійність розподільчих мереж, забезпечити інтеграцію відновлюваних джерел енергії та створити передумови для формування гнучких електроенергетичних систем.

3 РОЗРАХУНОК ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ РЕЖИМІВ ЗАРЯДЖАННЯ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ З УРАХУВАННЯМ ОБМЕЖЕНЬ МЕРЕЖІ

3.1 Вихідні дані та постановка задачі

У процесі інтеграції електромобілів у розподільчі електроенергетичні системи одним із визначальних факторів є обмежена пропускна здатність існуючої мережевої інфраструктури. Зокрема, силові трансформатори розподільчих підстанцій мають обмеження за допустимою потужністю, перевищення якої призводить до перегріву, прискореного старіння ізоляції та зниження надійності електропостачання споживачів [32].

У реальних умовах експлуатації навантаження на трансформатор формується не лише електромобілями, але й іншими споживачами, що створює базове навантаження. При цьому підключення значної кількості електромобілів у вечірні години може спричинити перевищення допустимих режимів роботи трансформатора [33].

У зв'язку з цим виникає задача визначення такого режиму заряджання електромобілів, який забезпечує:

- повне заряджання акумуляторних батарей у заданий часовий інтервал;
- недопущення перевищення допустимого навантаження трансформатора;
- рівномірний розподіл навантаження в часі [34].

Для вирішення поставленої задачі виконується розрахунок для двох режимів: некерованого та керованого (інтелектуального) заряджання.

Для проведення розрахунків приймаються такі вихідні дані.

Номінальна потужність силового трансформатора становить:

$$S_{mp} = 400 \text{ кВА}$$

З урахуванням коефіцієнта потужності: $\cos \varphi = 0,95$.

Допустима активна потужність трансформатора визначається як:

$$P_{дон} = S_{mp} \cdot \cos \varphi = 400 \cdot 0,95 = 380 \text{ кВт}.$$

Базове навантаження мережі (без електромобілів) приймається:

$$P_{\text{баз}} = 250 \text{ кВт}.$$

Кількість електромобілів у зоні живлення трансформатора: $N = 50$.

Потужність одного зарядного пристрою: $P_{\text{зар}} = 7 \text{ кВт}$.

Ємність акумуляторної батареї одного електромобіля: $W_{\text{бат}} = 60 \text{ кВт} / \text{год}$.

Середній рівень розряду батареї перед заряджанням приймається 50 %, тому необхідна енергія для одного електромобіля становить:
 $W_{\text{нотр}} = 60 \cdot 0,5 = 30 \text{ кВт} / \text{год}$.

Час, доступний для заряджання, становить 10 годин (з 18:00 до 08:00).

Таким чином, подальший розрахунок спрямований на визначення допустимого режиму заряджання електромобілів з урахуванням обмеження потужності трансформатора.

3.2 Аналіз режиму некерованого заряджання

У разі відсутності керування процесом заряджання всі електромобілі можуть бути підключені до мережі одночасно після завершення робочого дня. Такий режим є найбільш несприятливим, оскільки призводить до різкого зростання навантаження у піковий період [33].

Сумарна потужність, яку споживають електромобілі, визначається як:

$$P_{EV} = N \cdot P_{\text{зар}} = 50 \cdot 7 = 350 \text{ кВт} \quad (3.1)$$

З урахуванням базового навантаження загальна потужність становить:

$$P_{\text{сум}} = P_{\text{баз}} + P_{EV} = 250 + 350 = 600 \text{ кВт} \quad (3.2)$$

Порівняння з допустимою потужністю трансформатора показує:

$$600 > 380$$

Отже, має місце перевищення допустимого навантаження на:

$$\Delta P = 600 - 380 = 220 \text{ кВт} \quad (3.3)$$

Це відповідає перевантаженню трансформатора більш ніж на 57 %, що є неприпустимим режимом експлуатації. У таких умовах можливе:

- спрацювання захисних пристроїв;
- перегрів обмоток трансформатора;
- зниження напруги у мережі;
- погіршення якості електроенергії.

Таким чином, некероване заряджання не може бути використане в умовах заданої електроенергетичної системи [32].

3.3 Визначення допустимого навантаження від електромобілів

Для забезпечення нормального режиму роботи трансформатора необхідно обмежити сумарну потужність, що припадає на електромобілі.

Допустима потужність для заряджання визначається як різниця між допустимою потужністю трансформатора та базовим навантаженням:

$$P_{EV\text{дон}} = P_{\text{дон}} - P_{\text{баз}} = 380 - 250 = 130 \text{ кВт} \quad (3.4)$$

Це максимальна потужність, яка може бути використана для заряджання без перевантаження трансформатора.

Визначимо максимально допустиму кількість електромобілів, що можуть заряджатися одночасно:

$$N_{\text{дон}} = \frac{P_{EV\text{дон}}}{P_{\text{зар}}} = \frac{130}{7} \approx 18 \quad (3.5)$$

Отже, в будь-який момент часу одночасно можуть заряджатися не більше 18 електромобілів.

Це обмеження є ключовим при формуванні керованого графіка заряджання.

3.4 Розрахунок тривалості заряджання та формування графіка

Тривалість заряджання одного електромобіля при номінальній потужності визначається як:

$$t_{зар} = \frac{W_{номр}}{P_{зар}} = \frac{30}{7} \approx 4,3 \text{ год.} \quad (3.6)$$

Оскільки доступний час становить 10 годин, очевидно, що всі електромобілі не можуть заряджатися одночасно і потребують розподілу у часі [34].

Загальна кількість електромобілів становить 50, тому їх доцільно поділити на декілька груп, які будуть заряджатися послідовно.

Кількість груп визначається як:

$$k = \frac{N}{N_{дон}} = \frac{50}{18} \approx 3 \quad (3.7)$$

Приймаємо три групи:

- перша – 18 електромобілів;
- друга – 18 електромобілів;
- третя – 14 електромобілів.

З урахуванням тривалості заряджання формуємо послідовний графік підключення.

3.5 Формування керованого режиму заряджання

Для забезпечення рівномірного навантаження електромобілі підключаються до мережі поетапно.

Графік заряджання може бути представлений у вигляді таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Керований графік заряджання електромобілів

Інтервал часу	Кількість EV	Потужність, кВт
18:00–22:30	18	126
22:30–03:00	18	126
03:00–07:30	14	98

У кожному інтервалі потужність не перевищує допустиме значення:

$$P_{\text{сум}} = 250 + 126 = 376 \text{ кВт} \quad (3.8)$$

Оскільки:

$$376 < 380$$

умова допустимого навантаження трансформатора виконується.

Таким чином, всі електромобілі отримують необхідну енергію без перевантаження електроенергетичної системи.

3.6 Оцінка ефективності запропонованого рішення

Порівняємо режими роботи.

При некерованому заряджанні:

$$P_{\text{сум}} = 600 \text{ кВт}$$

При керованому:

$$P_{\text{сум}} = 376 \text{ кВт}$$

Зменшення пікового навантаження:

$$\Delta P = 600 - 376 = 224 \text{ кВт} \quad (3.9)$$

Отриманий результат свідчить про суттєве зменшення навантаження на мережу [35].

Крім того, запропонований підхід дозволяє:

- уникнути перевантаження трансформатора;
- підвищити надійність електропостачання;
- забезпечити можливість підключення більшої кількості електромобілів у майбутньому.

3.7 Висновки до розділу

У третьому розділі виконано розрахунок режимів заряджання електромобілів з урахуванням обмеження потужності трансформатора.

Встановлено, що некероване заряджання призводить до значного перевантаження трансформатора і не може бути застосоване в умовах заданої мережі. Визначено допустиму потужність для заряджання електромобілів та встановлено, що одночасно можуть заряджатися не більше 18 транспортних засобів.

Розроблено керований графік заряджання, який забезпечує повне заряджання всіх електромобілів без перевищення допустимого навантаження. Отримані результати підтверджують ефективність застосування інтелектуального керування заряджанням для забезпечення надійної роботи електроенергетичної системи.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Вступ

Сучасні системи інтелектуального керування заряджанням електромобілів, що інтегруються в електроенергетичну систему, являють собою складні електротехнічні комплекси, які включають зарядні станції, силові перетворювачі, кабельні мережі, системи зв'язку та програмні засоби керування. Їх функціонування пов'язане з передачею значних потоків електричної енергії, у тому числі в режимах двонаправленого обміну, що підвищує рівень потенційної небезпеки для обслуговуючого персоналу [40].

Під час експлуатації, налагодження та технічного обслуговування зарядної інфраструктури працівники піддаються впливу комплексу небезпечних і шкідливих виробничих факторів, характерних для електроустановок напругою до та понад 1000 В [36]. До них належать електричні, теплові, електромагнітні, механічні та психофізіологічні фактори, які можуть призводити до травмування, професійних захворювань або аварійних ситуацій [39].

Особливістю систем заряджання електромобілів є наявність високих рівнів напруги, значних струмів, а також використання силової електроніки, що працює в імпульсних режимах. Це обумовлює необхідність застосування підвищених вимог до безпеки відповідно до нормативних документів, зокрема ПУЕ та стандартів ДСТУ [36–38].

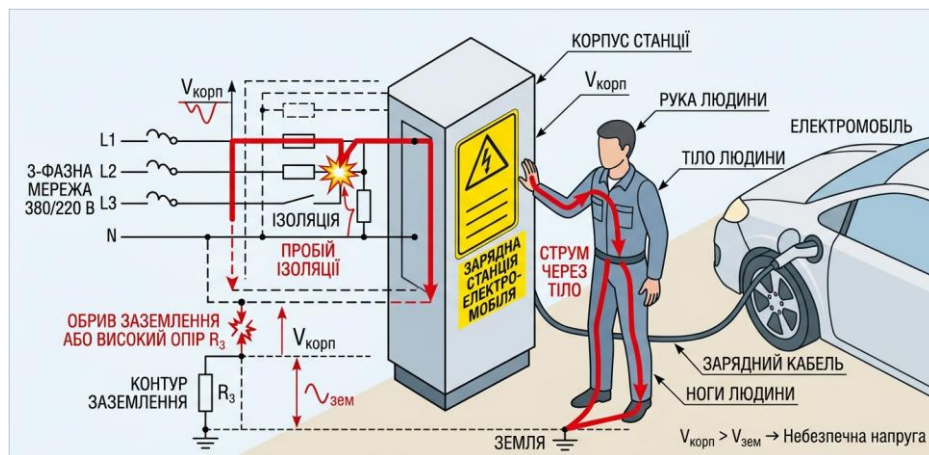
Метою даного розділу є аналіз небезпечних і шкідливих факторів, що виникають при експлуатації систем інтелектуального заряджання електромобілів, розробка організаційно-технічних заходів щодо забезпечення безпеки праці, а також виконання розрахунку параметрів захисного заземлення як одного з основних засобів електробезпеки [37].

4.2 Аналіз небезпечних та шкідливих факторів

Експлуатація зарядної інфраструктури електромобілів супроводжується дією комплексу небезпечних та шкідливих виробничих факторів, характерних для електротехнічних установок та систем силової електроніки [40].

Електричні фактори

Основним небезпечним фактором є електричний струм. Ураження людини може відбутися при безпосередньому контакті зі струмоведучими частинами або при дотику до металевих корпусів обладнання, що опинилися під напругою внаслідок пошкодження ізоляції (рис. 4.1) [37].



Рисунк 4.1 – Схема ураження людини електричним струмом при дотику до корпусу електрообладнання зарядних станцій електромобіля

Особливу небезпеку становлять кола постійного струму зарядних станцій, оскільки у них відсутній природний перехід струму через нуль, що ускладнює його гасіння та підвищує ризик ураження [40]. Крім того, значну небезпеку становлять акумуляторні батареї великої ємності, здатні віддавати значні струми короткого замикання.

Згідно з нормативними вимогами, струм понад 50 мА є небезпечним для життя людини, а напруга дотику повинна бути обмежена до безпечного рівня [37].

Теплові та пожежні фактори

У процесі роботи зарядних станцій частина електричної енергії перетворюється у тепло. Основними джерелами тепловиділення є силові напівпровідникові елементи, кабелі та контактні з'єднання [40].

Перегрів обладнання може призводити до пошкодження ізоляції, коротких замикань та виникнення пожеж. Відповідно до вимог нормативних документів, необхідно забезпечувати контроль температурних режимів та застосовувати системи охолодження [36].

Електромагнітні фактори

Силові перетворювачі зарядних станцій працюють у імпульсному режимі та створюють електромагнітні поля, які можуть впливати на роботу електронних пристроїв та організм людини [40]. Для зменшення впливу необхідно застосовувати заходи електромагнітної сумісності відповідно до стандартів [38].

Механічні фактори

До механічних факторів належать травмування при монтажі, падіння обладнання, пошкодження кабельних ліній. Вони виникають переважно через порушення правил експлуатації або недотримання технології виконання робіт [39].

Психофізіологічні фактори

Робота оператора пов'язана з контролем складних систем, що потребує високої концентрації уваги та швидкого прийняття рішень. Це може призводити до перевтоми, зниження працездатності та підвищення ризику помилок [4].

4.3 Організаційно-технічні заходи по забезпеченню безпеки

Забезпечення безпеки праці досягається комплексним застосуванням організаційних та технічних заходів відповідно до вимог нормативних документів [36-39].

Організаційні заходи

Організаційні заходи включають:

- допуск до роботи лише персоналу відповідної кваліфікації;
- проведення інструктажів з охорони праці;
- оформлення нарядів-допусків;
- періодичний контроль технічного стану обладнання [39].

Технічні заходи

До технічних заходів належать:

- ізоляція струмоведучих частин;
- автоматичне відключення живлення;
- застосування пристроїв захисного відключення;
- захисне заземлення [37].

Для забезпечення пожежної безпеки використовуються негорючі матеріали, системи автоматичного пожежогасіння та контроль температури обладнання [36].

Захист від електромагнітних впливів забезпечується шляхом екранування, заземлення та використання фільтрів [38].

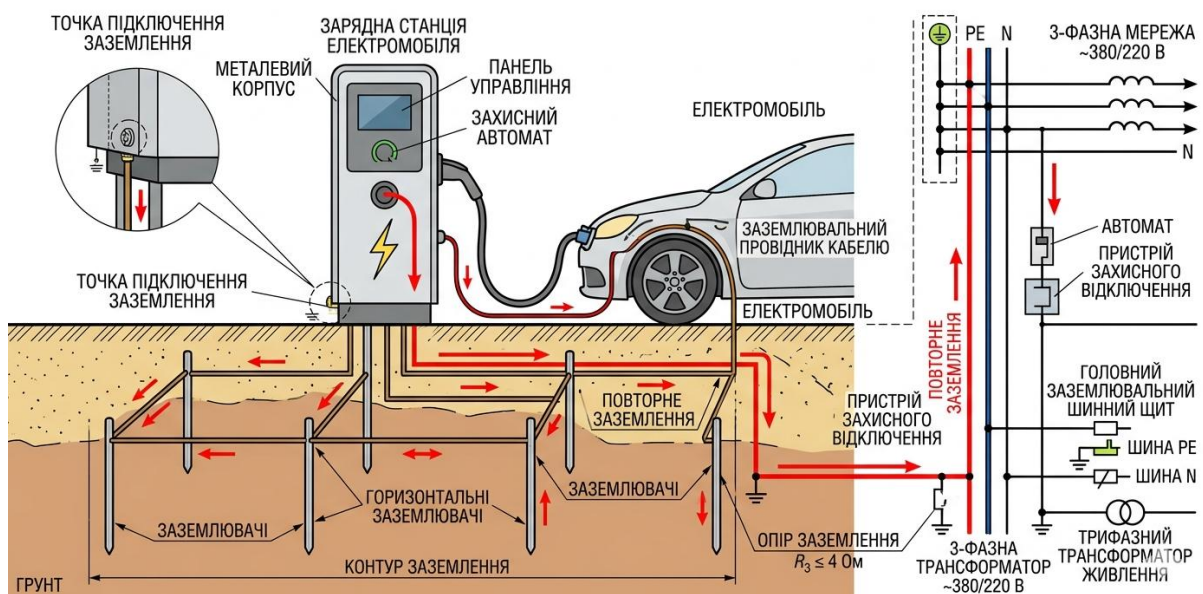


Рисунок 4.2 – Схема захисного заземлення зарядної станції

Розрахунок захисного заземлення

Захисне заземлення застосовується для зниження напруги дотику до безпечного рівня у випадку пошкодження ізоляції електрообладнання. Відповідно до вимог нормативних документів, опір заземлювального пристрою для електроустановок до 1000 В не повинен перевищувати 10 Ом [36].

Розрахунок виконується для зарядної станції електромобілів із вертикальними стрижневими заземлювачами.

Вихідні дані:

- питомий опір ґрунту: $\rho = 100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$;
- довжина електрода: $l = 3 \text{ м}$;
- діаметр електрода: $d = 0,05 \text{ м}$;
- попередня кількість електродів: $n = 4$;
- коефіцієнт використання електродів: $\eta = 0,6$.

1. Визначення опору одиночного заземлювача

Опір одиночного вертикального заземлювача визначається за формулою:

$$R_1 = \frac{\rho}{2\pi l} \ln\left(\frac{2l}{d}\right) \quad (4.1)$$

Підставляючи вихідні дані, отримуємо:

$$R_1 = \frac{100}{2\pi \cdot 3} \ln\left(\frac{2 \cdot 3}{0,05}\right) = \frac{100}{18,85} \ln(120) = 5,31 \cdot 4,79 = 25,4 \text{ Ом}$$

2. Визначення сумарного опору заземлювального пристрою

Сумарний опір групи заземлювачів визначається як:

$$R = \frac{R_1}{n \cdot \eta} \quad (4.2)$$

$$R = \frac{25,4}{4 \cdot 0,6} = \frac{25,4}{2,4} = 10,6 \text{ Ом}$$

3. Перевірка відповідності нормативу

Отримане значення:

$$R = 10,6 \text{ Ом}$$

перевищує допустиме значення:

$$R_{\text{дон}} \leq 10 \text{ Ом}$$

4. Уточнення параметрів заземлення

Збільшуємо кількість електродів до $n = 5$:

$$R = \frac{25,4}{5 \cdot 0,6} = \frac{25,4}{3} = 8,47 \text{ Ом}$$

Отримане значення опору заземлення:

$$R = 8,47 \text{ Ом} < 10 \text{ Ом}$$

відповідає вимогам нормативних документів. Таким чином, для забезпечення електробезпеки зарядної станції необхідно застосувати не менше п'яти вертикальних заземлювачів.

4.4 Висновки до розділу

У розділі розглянуто питання охорони праці при впровадженні інтелектуального керування заряджанням електромобілів у електроенергетичну систему.

У результаті проведеного аналізу встановлено, що експлуатація зарядної інфраструктури супроводжується впливом комплексу небезпечних і шкідливих факторів, серед яких визначальними є електричні, теплові та електромагнітні. Показано, що найбільшу небезпеку становить можливість ураження електричним струмом у колах постійного та змінного струму, а також ризик виникнення пожеж унаслідок перегріву силових елементів та порушення режимів роботи обладнання.

На основі проведеного аналізу обґрунтовано необхідність застосування комплексу організаційних і технічних заходів, спрямованих на забезпечення безпечних умов праці. Зокрема, визначено доцільність використання захисного заземлення, автоматичного відключення живлення, засобів електромагнітної сумісності, а також впровадження систем контролю технічного стану зарядних станцій.

У межах розділу виконано інженерний розрахунок захисного заземлення зарядної станції, за результатами якого встановлено, що для забезпечення нормативного значення опору заземлювального пристрою необхідно застосувати не менше п'яти вертикальних електродів. Отримане значення опору заземлення відповідає вимогам нормативних документів і забезпечує зниження напруги дотику до безпечного рівня.

Таким чином, запропоновані у розділі заходи дозволяють підвищити рівень електробезпеки при експлуатації систем інтелектуального керування заряджанням електромобілів, зменшити ризик аварійних ситуацій та забезпечити відповідність умов праці чинним нормативним вимогам.

ВИСНОВКИ

У першому розділі проаналізовано особливості інтеграції електромобілів в електроенергетичну систему та підходи до керування їх заряджанням, що підтвердило необхідність застосування інтелектуального керування для забезпечення ефективної роботи електроенергетичної системи.

У другому розділі розглянуто принципи інтелектуального керування заряджанням електромобілів та їх взаємодії з електроенергетичною мережею. Встановлено, що впровадження керованих режимів заряджання з урахуванням параметрів мережі дозволяє знизити навантаження на розподільчі мережі, підвищити ефективність їх роботи та забезпечити надійну інтеграцію електромобілів у електроенергетичну систему.

У третьому розділі виконано розрахунок режимів заряджання електромобілів з урахуванням обмеження потужності трансформатора.

У четвертому розділі проведено аналіз небезпечних і шкідливих факторів при впровадженні інтелектуального керування заряджанням електромобілів в електроенергетичну систему, розроблено організаційно-технічні заходи забезпечення безпечних умов праці та виконано розрахунок захисного заземлення зарядної станції відповідно до нормативних вимог.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Naseem, H.; Hadi, A.; Kang, M.J.; Seok, J.K. Enhancing Energy Storage Efficiency: Advances in Battery Management Systems in Electric Vehicles. *Energy Technol.* 2025, 13, 2500100.
2. Xie, X.; Pan, Z.; Yin, B.; Yang, L.; Shi, R.; Tan, G. Design and assessment of V2G systems for hybrid vehicles based on fuel cells, power batteries and photovoltaic cells. *Energy* 2025, 334, 137764/
3. Wei, H.; Wu, J.; Lv, C.; Yang, S.; Zhang, H.; Al-Haddad, K. Intelligent EV Charging Control and Management: From Microscale Battery Cell to Macroscale Grid Synergy. *IEEE Trans. Intell. Veh.* 2024, 10, 1693–1713.
4. CHAdeMO Association. V2G/VGI: A Decade of In-Market Experience with Bidirectional Charging. CHAdeMO Technical Reports. December 2025. Available online: <https://www.chademo.com/technology/v2g>
5. Hecht, C.; Figgenger, J.; Sauer, D.U. Protocols and interfaces for ev charging. In *Next Generation Electrified Vehicles Optimised for the Infrastructure*; Springer: Berlin, Germany, 2024; pp. 77–89.
6. Hijgenaar, S.; Ştefanov, A.; Van Voorden, A.M.; Palensky, P. Cyber Resilience of Electric Vehicle Charging in Smart Grids: The Dutch Case. *IEEE Access* 2025, 13, 111454–111483.
7. Santos, J.B.; Francisco, A.M.; Cabrita, C.; Monteiro, J.; Pacheco, A.; Cardoso, P.J. Development and implementation of a smart charging system for electric vehicles based on the ISO 15118 standard. *Energies* 2024, 17, 3045.
8. Porter, R.; Biglari-Abhari, M.; Tan, B.; Thrimawithana, D. Enhancing Security in the ISO 15118-20 EV Charging System. *Green Energy Intell. Transp.* 2025, 4, 100262.
9. Qiu, Y.L.; Wang, Y.D.; Iseki, H.; Shen, X.; Xing, B.; Zhang, H. Empirical grid impact of in-home electric vehicle charging differs from predictions. *Resour. Energy Econ.* 2022, 67, 101275.

10. Chamola, V.; Sancheti, A.; Chakravarty, S.; Kumar, N.; Guizani, M. An IoT and edge computing based framework for charge scheduling and EV selection in V2G systems. *IEEE Trans. Veh. Technol.* 2020, 69, 10569–10580.
11. Chen, L.; Zhou, J.; Chen, Y.; Cao, Z.; Dong, X.; Choo, K.K.R. PADP: Efficient privacy-preserving data aggregation and dynamic pricing for vehicle-to-grid networks. *IEEE Internet Things J.* 2020, 8, 7863–7873.
12. Curado Fernandes, N.A. Optimizing Electric Fleet Management with Vehicle-to-Grid Services for Profitability and Grid Stability: A Case Study of Ridehailing in Lisbon. Master's Thesis, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Lisbon, Portugal, 2025.
13. Niazi, M.A.; Kumar, V.; Sajid, Q.; Koondhar, M.A.; Kim, Y.S.; Zainuri, M.A.A.M.; Touti, E. A Physics-Informed Reinforcement Learning Approach to Vehicle-to-Grid Control with Real-Time Battery Degradation. *IEEE Access* 2026, 14, 7879–7894.
14. Deb, N.; Singh, R.; Brooks, R.R.; Bai, K. A review of extremely fast charging stations for electric vehicles. *Energies* 2021, 14, 7566.
15. Monteiro, V.; Afonso, J.; Sousa, T.; Afonso, J.L. The role of off-board EV battery chargers in smart homes and smart grids: Operation with renewables and energy storage systems. In *Electric Vehicles in Energy Systems: Modelling, Integration, Analysis, and Optimization*; Springer: Berlin, Germany, 2020; pp. 47–72.
16. Rumale, S.; Al Ashkar, H.; Kerner, T.; Koya, F.; Eitzenberger, M. Design and implementation of an on-board vehicle CHAdeMO interface for vehicle-to-grid applications. *Proc. IEEE Int. Conf. Power Electron., Smart Grid Renew. Energy (PESGRE 2020)*, Kochi, India, 2–4 January 2020; pp. 1–6.
17. Pradhan, P. Quantifying and Managing the Impact of Electric Vehicles on Power Distribution Assets. Ph.D. Thesis, Edith Cowan University, Perth, Australia, 2023.
18. Zanatta, N.; Caldognetto, T.; Biadene, D.; Spiazzi, G.; Mattavelli, P. A two-stage dc-dc isolated converter for battery-charging applications. *IEEE Open J. Power Electron.* 2023, 4, 343–356.

19. Razzaque, M.A.; Khadem, S.K.; Patra, S.; Okwata, G.; Noor-A-Rahim, M. Cybersecurity in vehicle-to-grid (V2G) systems: A systematic review. *Appl. Energy* 2025, 398, 126364.
20. Dávila-Sacoto, M.; González, L.G.; Zorita-Lamadrid, Á.L.; Espinoza, J.L. Effect of latency and charge control of electric vehicles in power grids with high penetration of photovoltaic solar energy. *Renew. Energies* 2025, 3, 27533735251342114.
21. Zeinali, M.; Erdogan, N.; Bayram, I.S.; Thompson, J.S. Impact of communication system characteristics on electric vehicle grid integration: A large-scale practical assessment of the UK's cellular network for the internet of energy. *Electricity* 2023, 4, 309–319.
22. Cao, Y.; Li, S.; Lv, C.; Wang, D.; Sun, H.; Jiang, J.; Meng, F.; Xu, L.; Cheng, X. Towards cyber security for low-carbon transportation: Overview, challenges and future directions. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2023, 183, 113401.
23. Aljohani, T.; Almutairi, A. A comprehensive survey of cyberattacks on EVs: Research domains, attacks, defensive mechanisms, and verification methods. *Def. Technol.* 2024, 42, 31–58.
24. Khan, M.A.; Gupta, N.; Kathuria, R.; Vanshika, S.; Sharma, V.; Vaghmare, A.K. Electric Vehicle Integration System for Power Management on a Blockchain-Based Smart Grid Platform with AI Capabilities. Preprint 2023.
25. Johnson, J.; Anderson, B.; Wright, B.; Quiroz, J.; Berg, T.; Graves, R.; Daley, J.; Phan, K.; Kunz, M.; Pratt, R.; et al. Cybersecurity for Electric Vehicle Charging Infrastructure; Technical Report; Sandia National Laboratories (SNL-NM): Albuquerque, NM, USA, 2022.
26. International Energy Agency (IEA). Global EV Outlook 2025—Outlook for Energy Demand; Online Report; International Energy Agency (IEA): Paris, France, 2025.
27. Abdulaal, A.; Cintuglu, M.H.; Asfour, S.; Mohammed, O.A. Solving the multivariant EV routing problem incorporating V2G and G2V options. *IEEE Trans. Transp. Electrification* 2016, 3, 238–248.

28. Alqahtani, M.; Scott, M.J.; Hu, M. Dynamic energy scheduling and routing of a large fleet of electric vehicles using multi-agent reinforcement learning. *Comput. Ind. Eng.* 2022, 169, 108180.
29. Shaheen, H.I.; Rashed, G.I.; Yang, B.; Yang, J. Optimal electric vehicle charging and discharging scheduling using metaheuristic algorithms: V2G approach for cost reduction and grid support. *J. Energy Storage* 2024, 90, 111816.
30. Iacobucci, R.; McLellan, B.; Tezuka, T. Modeling shared autonomous electric vehicles: Potential for transport and power grid integration. *Energy* 2018, 158, 148–163.
31. Yang, T.; Guo, Q.; Xu, L.; Sun, H. Dynamic pricing for integrated energy-traffic systems from a cyber-physical-human perspective. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2021, 136, 110419.
32. Правила улаштування електроустановок. 7-ме вид. Київ: Міненерговугілля України, 2017. 617 с.
33. Clement-Nyns K., Haesen E., Driesen J. The impact of charging plug-in hybrid electric vehicles on a residential distribution grid. *IEEE Transactions on Power Systems.* 2010. Vol. 25, No. 1. P. 371–380.
34. Sortomme E., El-Sharkawi M. Optimal charging strategies for unidirectional vehicle-to-grid. *IEEE Transactions on Smart Grid.* 2011. Vol. 2, No. 1. P. 131–138.
35. International Energy Agency. *Global EV Outlook 2023.* Paris: IEA, 2023. 200 p.
36. Правила улаштування електроустановок. – Київ: Міненерговугілля України, 2017. – 617 с.
37. ДСТУ EN 50110-1:2014. Експлуатація електроустановок.
38. ДСТУ ІЕС 60364-4-41:2016. Захист від ураження електричним струмом.
39. ДСТУ ISO 45001:2019. Системи управління охороною праці.
40. ІЕС 61851-1:2017 Electric vehicle conductive charging system.