

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА

НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ, ІНФОРМАЦІЙНОЇ
ТА ТРАНСПОРТНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

Кафедра електричного транспорту

**АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ЗАРЯДЖАННЯ
ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ ДЛЯ РОЗВИТКУ ЗАРЯДНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ**

Бакалаврська кваліфікаційна робота

Здобувач:

Євгеній СИТНИКОВ

гр. СТ2023-1у

Керівник:

Наталя ЛУКАШОВА

доцент, к.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

« 17 » червня 2026 р.

ЗАВДАННЯ

до бакалаврської кваліфікаційної роботи

Ситникову Євгенію Сергійовичу

прізвище, ім'я, по батькові

1. **Тема роботи:** Аналіз сучасних технологій заряджання електромобілів
для розвитку зарядної інфраструктури

керівник бакалаврської

кваліфікаційної роботи к.т.н., доцент Наталя ЛУКАШОВА

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

2. Строк подання студентом бакалаврської кваліфікаційної роботи 15.06.2025 р.

3. Вихідні дані до бакалаврської кваліфікаційної роботи Матеріали переддипломної практики; технічні характеристики зарядних станцій електромобілів; сучасні технології заряджання електромобілів; режими роботи зарядної інфраструктури; типові схеми підключення зарядних станцій до електричних мереж; науково-технічна література з питань розвитку зарядної інфраструктури електромобілів.

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

1. Аналіз сучасних технологій заряджання електромобілів.




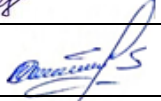
2. Розвиток зарядної інфраструктури електромобілів із використанням сучасних технологій.

3. Розрахунок параметрів зарядної інфраструктури електромобілів.

4. Охорона праці.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових слайдів)
Технології та методи заряджання електромобілів. Процедура заряджання та протоколи зв'язку. Структура Інтернету Електрики (IoE)

6. Консультанти розділів бакалаврської кваліфікаційної роботи


Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>Основна частина</i>	<i>Наталя ЛУКАШОВА, доц.</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)

Євгеній СИТНИКОВ

(прізвище та ініціали)

Керівник бакалаврської кваліфікаційної роботи



(підпис)

Наталя ЛУКАШОВА

(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Бакалаврська кваліфікаційна робота присвячена розгляду сучасних технологій заряджання електромобілів та питань розвитку зарядної інфраструктури.

У роботі наведено характеристику сучасного стану електромобільного транспорту та визначено роль зарядної інфраструктури у забезпеченні його функціонування. Розглянуто основні технології заряджання електромобілів, їх класифікацію, принципи роботи, а також типи зарядних станцій і їх технічні особливості.

Висвітлено особливості функціонування зарядної інфраструктури та її взаємодію з електричними мережами. Розглянуто фактори, що впливають на режими роботи електричних мереж при підключенні зарядних станцій.

У роботі також наведено розрахункову частину, пов'язану з визначенням параметрів роботи зарядної інфраструктури.

Окремий розділ присвячено питанням охорони праці під час експлуатації зарядних станцій, включаючи аналіз небезпечних і шкідливих факторів та заходи щодо забезпечення безпечних умов праці.

Ключові слова: електромобіль, зарядна інфраструктура, зарядна станція, технології заряджання.

ЗМІСТ

	ВСТУП.....	6
1	АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ЗАРЯДЖАННЯ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ.....	8
	1.1 Кондуктивне заряджання.....	8
	1.2 Бездротова зарядка.....	14
	1.3 Висновки до розділу.....	28
2	РОЗВИТОК ЗАРЯДНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ.....	29
	2.1 Методи заряджання.....	29
	2.2 Процедура заряджання та протоколи зв'язку.....	34
	2.3 Структура Інтернету Електрики.....	38
	2.4 Висновки до розділу.....	42
3	РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ЗАРЯДНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ.....	43
	3.1 Вихідні дані для розрахунку.....	43
	3.2 Розрахунок добового електроспоживання електромобілів..	44
	3.3 Визначення максимального навантаження на електричну мережу.....	45
	3.4 Розрахунок необхідної кількості зарядних станцій.....	46
	3.5 Оцінка впливу на електричну мережу.....	46
	3.6 Аналіз ефективності застосування сучасних технологій заряджання.....	47
	3.7 Висновки до розділу.....	48
4	ОХОРОНА ПРАЦІ.....	49
	4.1 Вступ.....	49
	4.2 Аналіз небезпечних та шкідливих факторів.....	50
	4.3 Організаційно-технічні заходи забезпечення безпеки.....	51
	4.4 Висновки по розділу.....	54
	ВИСНОВКИ.....	55
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	56

ВСТУП

Сучасний етап розвитку електроенергетики та транспортної галузі характеризується активним впровадженням електромобільного транспорту, що зумовлено глобальними тенденціями до зниження рівня викидів парникових газів, підвищення енергоефективності та переходу до використання екологічно чистих джерел енергії. Електромобілі поступово займають важливе місце у транспортній системі міст, що, у свою чергу, зумовлює необхідність створення відповідної інфраструктури для їх повноцінної експлуатації.

Одним із ключових елементів функціонування електромобільного транспорту є зарядна інфраструктура, яка забезпечує процес поповнення енергії акумуляторних батарей. Від рівня розвитку зарядної інфраструктури залежить не лише зручність використання електромобілів, але й ефективність їх інтеграції в міське середовище та електроенергетичну систему загалом. Недостатній розвиток мережі зарядних станцій, нерівномірність їх розміщення, а також обмежена пропускна здатність електричних мереж можуть суттєво стримувати поширення електромобільного транспорту.

Актуальність теми обумовлена необхідністю розвитку сучасної зарядної інфраструктури, здатної забезпечити надійне, ефективне та безпечне функціонування електромобілів. Збільшення кількості електромобілів призводить до зростання навантаження на електричні мережі, що вимагає впровадження новітніх технологій заряджання, оптимізації режимів роботи зарядних станцій та підвищення рівня керованості енергоспоживання.

Сучасні технології заряджання електромобілів включають широкий спектр рішень – від повільного заряджання змінним струмом до швидкісного та надшвидкого заряджання постійним струмом, а також безконтактних систем. Їх застосування дозволяє підвищити ефективність використання електромобілів, скоротити час заряджання та зменшити вплив на електричні мережі. Водночас впровадження таких технологій потребує обґрунтування технічних рішень та врахування особливостей роботи електроенергетичних систем.

Таким чином, розгляд сучасних технологій заряджання та визначення напрямів їх застосування для розвитку зарядної інфраструктури є важливим завданням, що має практичне значення для підвищення ефективності функціонування електромобільного транспорту.

Метою роботи є аналіз сучасних технологій заряджання електромобілів та обґрунтування їх застосування для розвитку ефективної та безпечної зарядної інфраструктури.

Для досягнення поставленої мети у роботі вирішуються такі завдання:

1. Провести аналіз сучасних технологій заряджання електромобілів.
2. Розглянути застосування сучасних технологій заряджання для розвитку зарядної інфраструктури електромобілів.
3. Розрахувати параметри зарядної інфраструктури електромобілів.
4. Розробити організаційно-технічні заходи з охорони праці під час експлуатації та обслуговування зарядної інфраструктури електромобілів.

1 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ЗАРЯДЖАННЯ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ

1.1 Кондуктивне заряджання

Кондуктивний спосіб заряджання є найбільш поширеним методом поповнення енергії акумуляторів електромобілів, зокрема для транспортних засобів типу BEV. У цьому випадку електрична енергія від мережі передається до автомобіля через зарядний кабель і роз'єм, підключений до зарядного порту транспортного засобу. Залежно від параметрів електроживлення кондуктивне заряджання може здійснюватися змінним або постійним струмом.

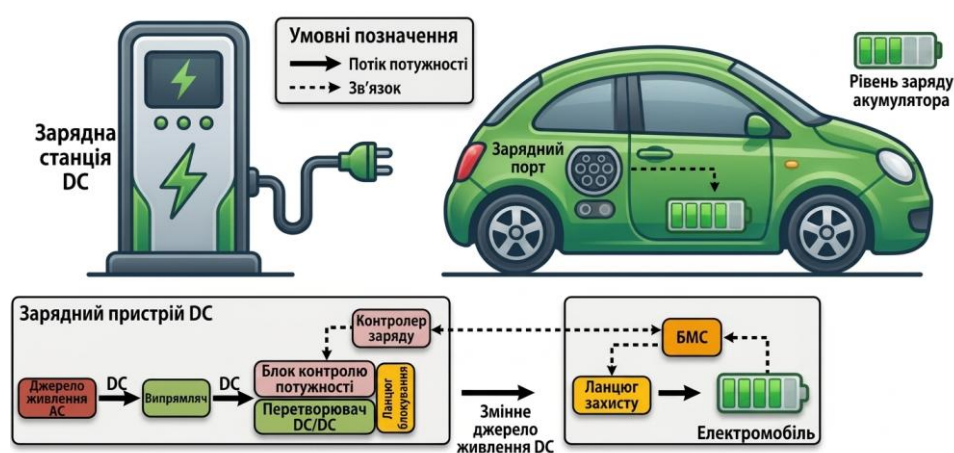
У разі використання заряджання змінним струмом електроенергія надходить до електромобіля безпосередньо від мережі змінного струму. Перетворення цієї енергії у постійний струм, необхідний для заряджання акумуляторної батареї, здійснюється за допомогою бортового зарядного пристрою. Його габарити та маса визначають максимальну потужність, яка може бути передана на акумулятор. Таким чином, електроенергія мережі перетворюється на відповідні значення напруги та струму постійного струму, необхідні для безпечного заряджання батареї.

Інший варіант передбачає використання заряджання постійним струмом, коли перетворення енергії відбувається у зовнішній зарядній станції. У такому випадку електромобіль отримує вже випрямлений постійний струм, що дозволяє передавати значно більші рівні потужності та скорочувати тривалість заряджання.

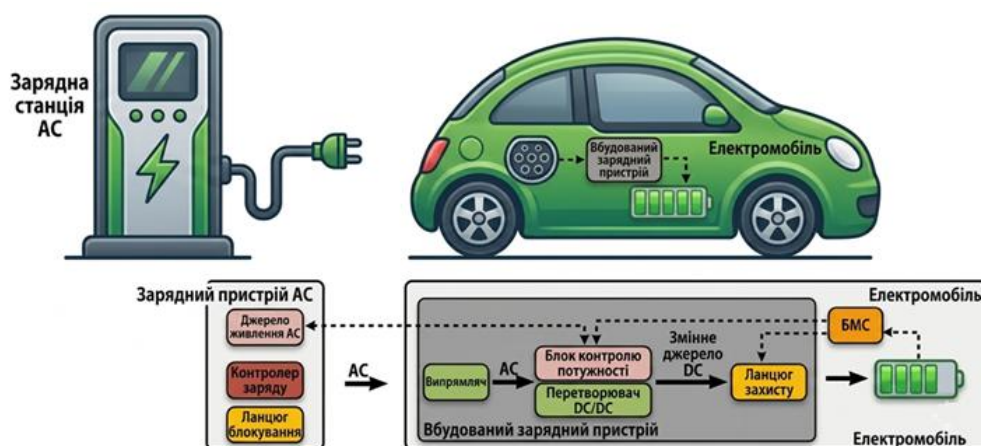
На рисунку 1 а, б наведені узагальнені схеми заряджання постійним та змінним струмом відповідно. Під час заряджання постійним струмом змінний струм мережі спочатку випрямляється всередині зарядної станції. Далі система керування регулює параметри напруги та струму перетворювача DC/DC відповідно до сигналів контролера заряджання, що дозволяє забезпечити необхідний рівень потужності для акумулятора. Система керування батареєю

передає контролеру інформацію про стан заряду та у разі виникнення небезпечних режимів активує захисні механізми. Основним завданням системи керування батареєю є моніторинг параметрів окремих елементів акумулятора (напруги, струму) та їх регулювання, що забезпечує безпечний процес заряджання та розряджання відповідно до встановлених вимог [1, 7].

Крім того, система містить схеми захисту та блокування, які зупиняють процес заряджання у випадку несправностей або неправильного підключення між електромобілем і зарядним пристроєм.



а) DC заряджання



б) AC заряджання

Рисунок 1.1 – Загальні схеми для (а) заряджання постійним струмом та (б) заряджання змінним струмом

У разі заряджання змінним струмом силові перетворювачі розміщені безпосередньо в електромобілі. Принцип роботи більшості елементів залишається аналогічним описаному вище. Відмінність полягає у роботі контролера заряджання, який взаємодіє з системою керування батареєю для контролю допустимих меж напруги та струму акумулятора, а також для активації захисту у випадку некоректного підключення.

Окрім традиційних рішень, у деяких країнах розглядаються альтернативні підходи до заряджання електротранспорту. Наприклад, у Німеччині проводяться дослідження щодо використання повітряних контактних ліній для заряджання під час руху. Гібридні вантажні транспортні засоби можуть отримувати електроенергію під час руху за допомогою встановленого пантографа. Основною метою цього експерименту є оцінювання ефективності такої технології для зменшення викидів CO₂ від важких вантажних автомобілів.

Рівні заряджання та типи роз'ємів для заряджання постійним та змінним струмом

Зарядні пристрої змінного та постійного струму класифікують за величиною вихідної потужності, яка передається електромобілю. Є основні рівні потужності заряджання відповідно до стандартів Товариства автомобільних інженерів (SAE), Міжнародної електротехнічної комісії (IEC) та системи CHAdeMO. У США інфраструктура заряджання в основному базується на стандартах SAE, тоді як у європейських країнах переважають норми IEC [1]. Стандарт CHAdeMO був розроблений Токійською електроенергетичною компанією спільно з японськими виробниками автомобілів і застосовується в різних країнах світу.

Згідно зі стандартом IEC 62196, зарядні пристрої змінного струму Mode 1 характеризуються найменшою потужністю та використовуються переважно для малих електротранспортних засобів, таких як електросамокати або електровелосипеди. Вони підключаються до однофазної або трифазної мережі з

напругою 230 В або 480 В та можуть забезпечувати потужність до 7,6 кВт при струмі до 16 А.

Зарядні пристрої змінного струму Mode 2 можуть застосовуватися як у побутових умовах, так і на громадських зарядних станціях. Вони підключаються до однофазної або трифазної мережі і забезпечують потужність до 15,3 кВт при струмі до 32 А. Важливо зазначити, що в кабелі таких зарядних пристроїв, а також у системах з вищими рівнями Mode 3 і Mode 4, передбачено спеціальний сигнальний провідник для обміну даними, керування процесом заряджання та забезпечення захисту.

Зарядні пристрої Mode 3 забезпечують найвищу потужність заряджання змінним струмом. Вони призначені переважно для громадських зарядних пунктів і можуть передавати потужність до 120 кВт при струмі до 250 А. У деяких випадках функції перетворення змінного струму в постійний можуть виконуватися силовим перетворювачем, що використовується для приводу транспортного засобу в реверсивному режимі. Це дозволяє підвищити щільність потужності та зменшити масу обладнання.

Найбільш швидким способом поповнення енергії акумулятора є заряджання постійним струмом Mode 4. Відповідно до стандарту IEC 62196 такі зарядні станції можуть передавати електромобілю потужність до 400 кВт. Зазвичай вони використовуються на громадських або комерційних зарядних станціях і рідко встановлюються в житлових зонах [7].

Разом з тим, використання високопотужних зарядних пристроїв постійного струму має певні обмеження. Збільшення струму заряджання супроводжується значним тепловиділенням, що може прискорювати деградацію акумуляторних батарей і скорочувати їхній термін служби [3]. Крім того, передавання великих струмів потребує використання масивних кабелів, що ускладнює експлуатацію зарядного обладнання.

Окрім рівнів потужності, заряджання змінним та постійним струмом реалізується за допомогою різних типів роз'ємів. Найбільш поширеними стандартами швидкого заряджання постійним струмом є Combo Charging System (CCS), CHAdeMO та Tesla Supercharger. Стандарт CCS був розроблений SAE та передбачає використання роз'ємів Combo 1 і Combo 2, які можуть забезпечувати

потужність до 350 кВт і підтримують також заряджання змінним струмом [7]. Оновлена версія стандарту CHAdeMO допускає використання напруги до 1000 В та струму до 400 А, що дозволяє передавати потужність до 400 кВт. Компанія Tesla розробила власну систему швидкого заряджання, яка підтримує роботу як зі змінним, так і з постійним струмом і забезпечує потужність до 250 кВт [7]. У Китаї застосовується власний стандарт швидкого заряджання GB/T із портом GB/T 20234-3, розрахованим на напругу 750 В постійного струму та струм до 250 А.

Для заряджання змінним струмом у США та Японії використовується роз'єм стандарту SAE J1772 [1, 7], тоді як у Європі застосовується стандарт IEC 62196-2, номінальний струм якого становить 32 А. У Китаї використовується порт, конструктивно подібний до роз'єму IEC 62196-2.

Перетворювачі енергії

Перетворювачі потужності є ключовими елементами систем заряджання електромобілів, оскільки їхні характеристики безпосередньо впливають на ефективність процесу заряджання. Під час проектування зарядної інфраструктури необхідно враховувати дві важливі задачі: забезпечення мінімального часу заряджання акумуляторної батареї та обмеження теплових навантажень, що можуть негативно впливати на її роботу. Тому розроблення компактних, надійних, економічно доцільних та високоефективних перетворювачів потужності є важливою умовою створення ефективних систем заряджання електромобілів.

Залежно від вимог конкретного застосування можуть використовуватися різні типи силових перетворювачів, зокрема топології перетворення змінного струму в змінний, змінного струму в постійний або постійного струму в постійний. На рисунку 1.2 наведено блок-схему односпрямованої кондуктивної системи заряджання електромобілів.

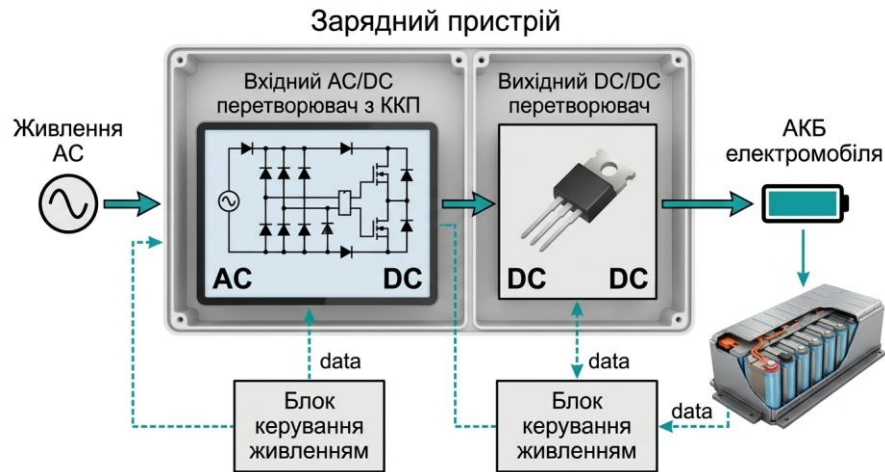


Рисунок 1.2 – Блок-схема кондуктивної односпрямованої системи заряджання електромобілів

Основними елементами такої системи є:

- однофазний або трифазний перетворювач змінного струму в постійний (AC/DC);
- перетворювач постійного струму в постійний (DC/DC).

Перший із зазначених перетворювачів виконує випрямлення напруги мережі, тоді як другий призначений для регулювання параметрів вихідної напруги та струму до значень, необхідних для заряджання акумуляторної батареї.

Оскільки силові перетворювачі мають нелінійний характер роботи, їх функціонування супроводжується виникненням гармонійних спотворень струму. Для зменшення впливу вищих гармонік та забезпечення відповідності вимогам стандартів якості електроенергії у фронтальному випрямлячі застосовують методи корекції коефіцієнта потужності. Реалізація таких методів часто передбачає використання системи фазового автопідстроювання частоти. Крім того, у системі керування можуть застосовуватися додаткові алгоритми, спрямовані на стабілізацію напруги у ланці постійного струму або компенсацію реактивної потужності, що споживається з електричної мережі. Застосування подібних алгоритмів керування потребує використання активних схем випрямлячів.

Для реалізації переднього каскаду перетворення постійного струму (DC/DC) у кондуктивних системах заряджання електромобілів можуть застосовуватися різні топології перетворювачів. Серед них використовують як ізольовані, так і неізольовані схеми, причому вибір конкретного рішення визначається вимогами до системи заряджання.

Силові перетворювачі містять різноманітні пасивні компоненти, зокрема індуктори та конденсатори, які забезпечують необхідні процеси перетворення енергії. Підвищення частоти комутації силових ключів дозволяє зменшити розміри та масу цих елементів. Однак збільшення частоти перемикання призводить до зростання втрат на комутацію. Для зменшення таких втрат застосовують резонансні схеми та методи так званого м'якого перемикання. Найбільш поширеними методами є перемикання при нульовому струмі та перемикання при нульовій напрузі.

Загалом алгоритми керування перетворювачами спрямовані на реалізацію відповідної стратегії заряджання акумуляторної батареї. Найчастіше застосовуються режими заряджання з підтриманням постійного струму, постійної напруги або їх комбінації, що реалізується за допомогою систем керування у режимі струму або режимі напруги.

1.2 Бездротова зарядка

Бездротове заряджання базується на передачі енергії між джерелом і приймачем без прямого електричного контакту, що забезпечується гальванічною розв'язкою між первинною та вторинною частинами системи [9, 10]. На сьогодні ця технологія широко застосовується для живлення малопотужних пристроїв, зокрема під час заряджання побутової електроніки, портативних та носимих гаджетів. Розвиток силових електроніки, а також використання сучасних напівпровідникових матеріалів, сприяють збільшенню рівня потужності, який можуть передавати системи бездротової передачі енергії. У результаті

з'являється можливість застосування таких технологій для заряджання електромобілів.

Бездротовий спосіб заряджання має низку переваг:

- забезпечує зручний та безпечний процес заряджання без використання кабелів і механічних контактів, що також знижує витрати на технічне обслуговування;
- усуває ризики, пов'язані з використанням кабельних з'єднань (наприклад, застосування пошкоджених кабелів під час дощу або снігу), оскільки між транспортним засобом і джерелом живлення існує гальванічна ізоляція;
- передавальний модуль може бути розташований під поверхнею дорожнього покриття, що захищає його від несприятливих погодних умов, підвищує довговічність обладнання та зменшує ризик пошкодження або вандалізму.

Технології бездротової передачі енергії зазвичай поділяють на дві основні групи: методи дальнього поля та ближнього поля. Методи дальнього поля дозволяють передавати енергію на значні відстані, тоді як технології ближнього поля працюють на невеликих відстанях між передавачем і приймачем. На рисунку 1.3 наведено класифікацію основних технологій бездротової передачі енергії.



Рисунок 1.3 – Категоризація технологій бездротового транспорту

Одним із методів передачі енергії дальнього поля є мікрохвильова передача енергії. У цьому випадку для передачі енергії використовуються

електромагнітні хвилі мікрохвильового діапазону. Мікрохвильове випромінювання створюється магнетроном, після чого через хвилевід подається до передавальної антени. На стороні приймача використовується ректена, яка поєднує антену та випрямляч і перетворює мікрохвильовий сигнал на постійний струм для заряджання акумулятора електромобіля [11, 12].

Іншим варіантом є оптична бездротова передача енергії, яка використовує електромагнітні хвилі терагерцового діапазону. У цьому випадку лазерний діод формує світловий промінь, який спрямовується до приймача. На стороні приймача встановлюються фотоелектричні елементи, що перетворюють отриману електромагнітну енергію у постійний струм [11, 12]. Для підвищення ефективності ширина забороненої зони фотоелемента повинна відповідати довжині хвилі світлового випромінювання. Проте обидва зазначені методи характеризуються відносно низькою ефективністю та обмеженою потужністю. Крім того, збільшення потужності передачі у випадку мікрохвильових систем потребує використання великих антен і може створювати небезпечний рівень радіочастотного випромінювання. У випадку оптичних систем висока інтенсивність світлового променя може спричиняти оптичні перешкоди або навіть становити небезпеку для зору. Додатковим обмеженням є те, що ці технології забезпечують лише односпрямований потік енергії.

Ще одним варіантом бездротової передачі енергії дальнього поля є акустичний метод, у якому використовуються хвилі кілогерцового діапазону. Проте і цей підхід характеризується низькою ефективністю передачі енергії [7].

До методів ближнього поля належить ємнісна бездротова передача енергії. У цьому випадку використовується високочастотне електричне поле, що формується між пластинами конденсаторів, розташованими у передавачі та приймачі. Пластини розміщуються паралельно одна одній на невеликій відстані, утворюючи систему конденсаторів. У результаті в приймачі виникає індукований струм, який після випрямлення використовується для заряджання акумуляторної батареї електромобіля [11, 12].

Протягом останніх років ця технологія активно розвивається, і деякі експериментальні системи здатні передавати потужність кілька кіловат при повітряному зазорі до 300 мм [11]. Однак коефіцієнт корисної дії таких систем зазвичай знаходиться в межах 50-80% [7], що робить їх менш ефективними порівняно з індуктивними системами. Крім того, для їх роботи потрібна досить висока напруга, а максимальна відстань між передавачем і приймачем є меншою, ніж у випадку індуктивних технологій. На ефективність системи також негативно впливають паразитні ємності транспортного засобу.

Ще один варіант бездротового заряджання базується на використанні магнітної системи передачі, у якій енергія передається за рахунок взаємодії синхронізованих магнітних елементів [10]. У такій системі обертовий магніт, який приводиться в дію електродвигуном від мережі, змушує обертатися ротор постійного магніту передавача. Це, у свою чергу, індукує напругу в обмотці ротора приймача, що обертається синхронно з передавачем. У результаті приймальний модуль працює як генератор, який через випрямляч подає енергію на акумулятор електромобіля [13]. Основними недоліками таких систем є наявність механічних елементів, що підвищує потребу у технічному обслуговуванні та спричиняє додатковий шум під час роботи. Крім того, ефективність передачі енергії значною мірою залежить від точності взаємного розташування елементів системи.

Індуктивна передача потужності

Найбільш поширеним методом бездротової передачі енергії у системах заряджання електромобілів є індуктивний метод, який базується на передачі енергії між слабо зв'язаними котушками за рахунок магнітної індукції. Саме ця технологія на сьогодні набула найбільшого поширення серед систем бездротового заряджання та вже використовується у комерційних рішеннях [7].

Індуктивні системи здатні передавати значні рівні потужності – до 100 кВт – на відстанях у декілька десятків сантиметрів, що відповідає розмірам котушок

передавача та приймача. При цьому ефективність передачі енергії може досягати 90-95% [12].

Принцип роботи такої системи полягає у створенні змінного магнітного поля первинною котушкою, через яку протікає змінний струм. Відповідно до закону Ампера навколо провідника формується змінне електромагнітне поле, яке індукує напругу у вторинній котушці згідно із законом Фарадея. Це призводить до появи змінного струму в колі приймача [9].

Для підвищення ефективності системи та зменшення втрат магнітного потоку такі системи зазвичай працюють у резонансному режимі. Тому до їх складу включають додаткові пасивні елементи, які формують резонансні контури [12, 14].

У цьому випадку технологію часто називають системою бездротової передачі енергії на основі зв'язаного магнітного резонансу [12, 13, 14]. Підвищення частоти комутації також сприяє збільшенню рівня переданої потужності. За принципом роботи така система подібна до трансформатора, однак між його обмотками існує значний повітряний зазор, що призводить до слабого магнітного зв'язку між котушками.

Коефіцієнт зв'язку k у таких системах зазвичай не перевищує 0,6 і на практиці становить приблизно 0,1-0,4 [9].

Блок-схему односпрямованої індуктивної системи передачі енергії наведено на рисунку 1.4.

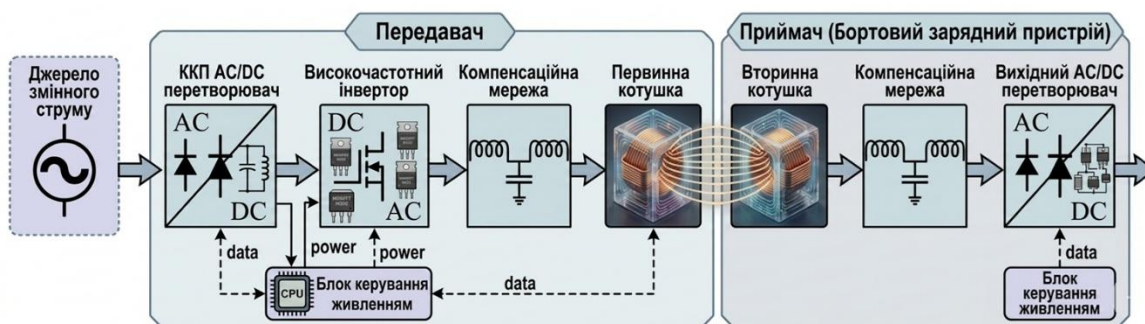


Рисунок 1.4 – Блок-схема односпрямованого індуктивного зарядного пристрою

Основними складовими цієї системи є:

- вхідний однофазний або трифазний перетворювач змінного струму в постійний;
- інвертор постійного струму в змінний;
- компенсаційні мережі;
- магнітний з'єднувач;
- вихідний перетворювач змінного струму в постійний.

Змінний струм мережі спочатку випрямляється, після чого інвертор разом із компенсаційною мережею формує високочастотний синусоїдальний струм, який подається на первинну котушку. Для зменшення гармонічних спотворень струму у вхідному випрямлячі можуть використовуватися схеми корекції коефіцієнта потужності. Висока частота роботи системи передбачає застосування методів м'якого перемикання, що дозволяє знизити втрати на комутацію в інверторі.

Напруга, індукована у вторинній котушці, перетворюється на постійний струм за допомогою вихідного випрямляча, після чого використовується для заряджання акумулятора електромобіля. Додаткова компенсаційна мережа на стороні приймача забезпечує узгодження робочих частот первинної та вторинної частин системи. Слід зазначити, що вторинна частина системи встановлюється безпосередньо в електромобілі та фактично виконує функцію бортового зарядного пристрою.

Регулювання потоку енергії в таких системах може здійснюватися як на стороні передавача, так і на стороні приймача. У першому випадку керування здійснюється шляхом регулювання параметрів перетворювачів первинної сторони. Найбільш поширеними методами керування інвертором є зміна частоти перемикання та фазова модуляція. При частотному керуванні робоча частота змінюється відносно резонансної, що призводить до зміни вихідного імпедансу інвертора та відповідно рівня переданої потужності. У випадку фазової модуляції регулювання здійснюється шляхом зміни фазового зсуву між керуючими імпульсами ключів перетворювача при постійній частоті перемикання.

Це дозволяє змінювати напругу на котушці та керувати потужністю, що передається до електромобіля.

Альтернативним рішенням є використання додаткового перетворювача постійного струму, підключеного до виходу випрямляча корекції коефіцієнта потужності, який забезпечує регулювання напруги живлення інвертора. У цьому випадку система керування може бути орієнтована на узгодження імпедансу для підвищення ефективності передачі енергії.

Для ефективної роботи системи необхідний обмін інформацією між транспортним засобом і передавальною станцією. До таких даних належать значення струму заряджання, напруги акумулятора, рівень заряду батареї, вимоги до потужності, інформація про зміщення котушок передавача та приймача, дорожній просвіт, а також виявлення сторонніх предметів у зоні заряджання [7]. Передавання цієї інформації може здійснюватися за допомогою бездротових каналів зв'язку ближнього поля з використанням протоколів Qi, Wi-Fi, Bluetooth, стільникового зв'язку або Zigbee [7].

У випадку реалізації керування на стороні електромобіля можуть застосовуватися активні випрямлячі або додаткові перетворювачі постійного струму, підключені до виходу випрямляча. Крім того, у системах заряджання можуть використовуватися різні комбіновані стратегії керування перетворювачами з обох сторін системи.

Компенсаційні мережі

Компенсаційні схеми первинної та вторинної сторін є важливими елементами індуктивних систем передачі енергії. Їх основне призначення полягає у компенсації індуктивностей витoku, що дозволяє підвищити ефективність роботи системи та збільшити рівень переданої потужності. Такі схеми формуються за допомогою пасивних компонентів, зокрема конденсаторів та індуктивностей. Для підвищення ефективності передачі енергії через повітряний зазор система повинна працювати в умовах резонансу.

Зокрема, компенсаційна мережа вторинної сторони забезпечує покращення передачі енергії завдяки узгодженню імпедансу навантаження, відбитого на первинну сторону, з імпедансом джерела. У свою чергу, компенсаційна схема первинної сторони сприяє зменшенню циркуляції реактивної потужності в системі та забезпечує роботу з коефіцієнтом потужності, близьким до одиниці. На рисунку 1.5 наведено основні топології компенсаційних схем, які застосовуються в системах бездротової передачі енергії. До них належать послідовно-послідовна (SS), послідовно-паралельна (SP), паралельно-послідовна (PS) та паралельно-паралельна (PP) конфігурації, а також складніші топології, що включають кілька пасивних елементів [7].

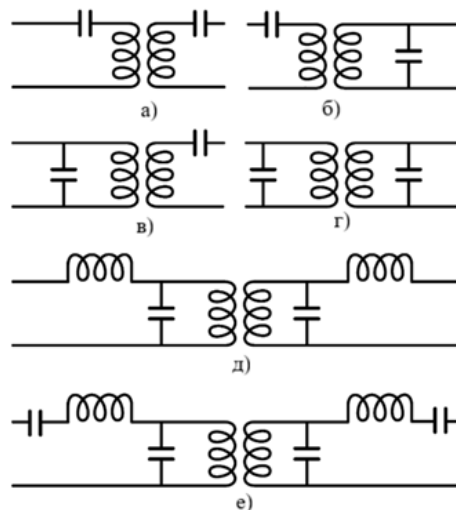


Рисунок 1.5 – Схеми компенсаційної мережі: а) послідовно-послідовна; б) послідовно-паралельна; в) паралельно-послідовна; г) паралельно-паралельна; д, е) схеми, що включають кілька пасивних елементів

Розроблення компенсаційних схем спрямоване на досягнення кількох основних цілей: (а) мінімізація реактивної потужності в резонансних контурах; (б) забезпечення широкого робочого діапазону з умовами нульового струму або нульової напруги для зменшення втрат при комутації; (в) стабільність системи

при зміні навантаження та коефіцієнта зв'язку; (г) створення компактної та економічної конструкції з високим коефіцієнтом корисної дії.

Під час вибору відповідної конфігурації необхідно враховувати певні компроміси та обмеження. Наприклад, у складних компенсаційних схемах із великою кількістю пасивних елементів для зниження рівня напруги та струму конденсаторів часто застосовують додаткові індуктивності. Крім того, враховуючи, що високочастотний інвертор зазвичай працює як джерело напруги, використання паралельної компенсації на первинній стороні потребує додаткової послідовної індуктивності для регулювання струму інвертора. Це призводить до збільшення габаритів, вартості та складності системи, а також може знижувати ефективність через додаткові втрати потужності.

У паралельних схемах значення ємності залежить від коефіцієнта зв'язку та характеристик навантаження [12, 14]. Натомість при використанні послідовної компенсації на первинній стороні не потрібно додаткових елементів, а величина ємності практично не залежить від зміни коефіцієнта зв'язку [15]. Крім того, у випадку паралельної компенсації на вторинній стороні ємнісний реактивний опір відображається на первинну сторону і також залежить від параметрів навантаження [9, 12, 14]. Наприклад, схема SP потребує використання конденсаторів більшої ємності для забезпечення належного зв'язку, тому її максимальна ефективність, як правило, нижча порівняно з конфігурацією SS. Детальні переваги, недоліки та математичні залежності для різних компенсаційних схем наведені у [15]. Отже, вибір конкретної схеми визначається вимогами конкретного застосування.

Магнітні з'єднувачі

Магнітний з'єднувач є одним із ключових елементів систем бездротової передачі енергії. Він складається з первинної та вторинної котушок, між якими енергія передається через повітряний зазор. Основними характеристиками ефективного магнітного з'єднувача є високий коефіцієнт зв'язку та великий

коефіцієнт якості Q , оскільки ефективність передачі енергії значною мірою визначається саме цими параметрами. Також важливою є стійкість системи до умов неузгодженості між котушками [15].

Коефіцієнт якості Q визначається співвідношенням між індуктивністю котушки та її активним опором, який залежить від частоти. Чим більше значення Q на робочій частоті, тим менші втрати в провіднику. Для підвищення коефіцієнта зв'язку часто застосовують феритові елементи у вигляді пластин або стрижнів. Вони дозволяють збільшити індуктивність, а також покращити взаємну індуктивність і коефіцієнт якості магнітного з'єднувача [15]. Водночас надмірне використання феритових матеріалів може спричинити збільшення втрат через зміну розподілу магнітного поля в провідниках.

Магнітні з'єднувачі зазвичай виготовляються з використанням дроту Літца, що дозволяє зменшити втрати, пов'язані зі скін-ефектом, та підвищити коефіцієнт якості. Крім того, для зниження рівня поля розсіювання і зменшення впливу високочастотних електромагнітних полів на людину застосовується алюмінієве екранування.

Зміщення котушок відносно одна одної (неузгодженість) призводить до зменшення коефіцієнта зв'язку k . Це, у свою чергу, впливає на резонансну частоту системи, коефіцієнт потужності, величину індукованої напруги на приймачі та загальну ефективність передачі енергії. Для зменшення негативного впливу таких зміщень використовують спеціальні конфігурації котушок.

Неполяризовані структури створюють переважно вертикальну складову магнітного потоку за допомогою однієї котушки, тоді як поляризовані системи формують як вертикальні, так і горизонтальні компоненти потоку завдяки використанню кількох котушок [7].

У роботі [16] проведено порівняння конфігурацій DD-DD та DD-DDQ за показниками ефективності, стійкості до зміщення та рівня поля розсіювання. Дослідження [17] також порівнює круглі та прямокутні котушки за значеннями коефіцієнта зв'язку, власної та взаємної індуктивностей. Результати показують, що поляризовані структури, такі як DD-DD і DD-DDQ, мають кращу стійкість до

зміщення, тоді як круглі та прямокутні котушки характеризуються меншими полями розсіювання. Крім того, конфігурації з гострими кутами не рекомендуються через підвищене виникнення вихрових струмів [7]. На рисунку 1.6 наведено найпоширеніші варіанти конфігурацій магнітних з'єднувачів.

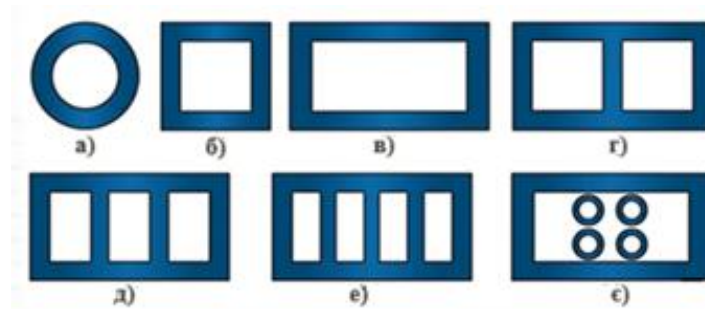


Рисунок 1.6 – Конфігурації магнітних відгалужувачів: а) кругла; б) квадратна; в) прямокутна; г) DD; д) біполярна; е) DDQ; є) QDQ

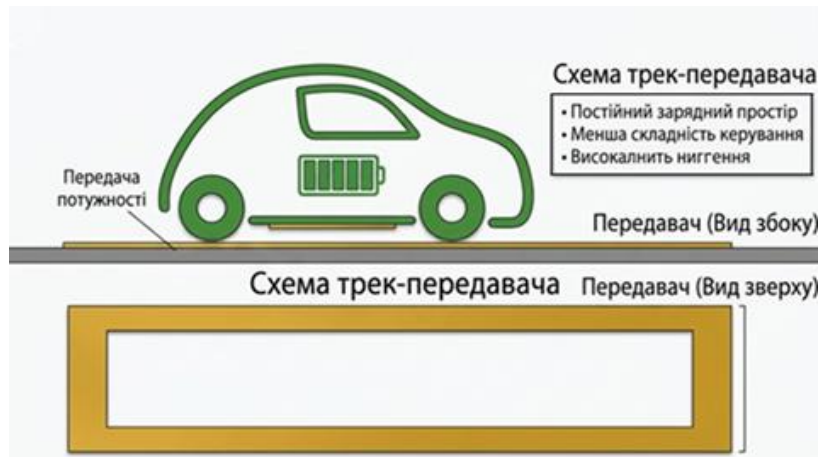
Індуктивні режими заряджання

Існує кілька способів реалізації бездротової індуктивної зарядки електромобілів. Найпростішим варіантом є статична бездротова зарядка, коли транспортний засіб знаходиться на парковці та залишається нерухомим до завершення процесу заряджання. Цей метод є найпоширенішим і використовується як у приватних, так і у громадських зарядних станціях. За принципом організації інфраструктури та часом заряджання він подібний до традиційних дротових систем.

Іншим підходом є квазідинамічна бездротова зарядка. У цьому випадку транспортний засіб також знаходиться в нерухомому стані, але двигун залишається увімкненим. Наприклад, заряджання може здійснюватися під час короткочасних зупинок громадського транспорту або на світлофорах [10, 12, 13].

Найбільш перспективним, але водночас складним у реалізації є динамічний режим бездротової зарядки, при якому передача енергії відбувається під час руху транспортного засобу [10, 12, 13].

У таких системах котушки передавача інтегруються безпосередньо в дорожнє покриття разом з іншими компонентами первинного контуру, тоді як вторинна частина розміщується у транспортному засобі. Залежно від конфігурації передавальних котушок розрізняють два типи систем: рейкові та сегментовані.



а)



б)

Рисунок 1.7 – Конфігурація котушки передавача:

а) трекова; б) сегментована

У рейкових системах використовуються довгі котушки передавача, що забезпечують безперервну передачу енергії рухомому транспортному засобу. Однак такий підхід характеризується зниженим коефіцієнтом зв'язку і, відповідно, меншою ефективністю. Сегментовані системи застосовують кілька передавальних котушок, розміри яких близькі до розміру приймача. Це дозволяє

підвищити ефективність, проте потребує складніших алгоритмів керування, оскільки навантаження на різні сегменти може відрізнятися залежно від положення транспортного засобу.

Додатковим аспектом є організація системи живлення. Вона може бути централізованою, коли всі сегменти живляться від одного джерела, або розподіленою, коли живлення подається лише на ту котушку, яка безпосередньо взаємодіє з приймачем [7]. Кожен із цих підходів має свої переваги та недоліки. Також необхідно враховувати вплив зовнішніх умов, оскільки елементи системи повинні працювати в складних кліматичних умовах.

Для забезпечення ефективної взаємодії між передавачем і приймачем важливу роль відіграють системи зв'язку. Вони повинні забезпечувати малу затримку передачі даних, достатню дальність та можливість одночасного обслуговування кількох транспортних засобів. Серед найбільш перспективних технологій розглядаються DSRC, стільниковий зв'язок та мережі 5G [7].

Незважаючи на значні технічні труднощі та високі витрати на створення інфраструктури, динамічна бездротова зарядка має великий потенціал для розвитку електромобільного транспорту. Завдяки можливості заряджання під час руху зменшується потреба у великих акумуляторах, що сприяє зниженню маси транспортного засобу та збільшенню його ефективності.

Попри значні переваги, широке впровадження бездротових систем заряджання пов'язане з низкою проблем. До них належать технічні обмеження, пов'язані з ефективністю передачі енергії, впливом зміщення котушок та величиною повітряного зазору, необхідність модифікації конструкції транспортних засобів, а також значні витрати на створення інфраструктури. Крім того, важливим питанням є стандартизація технологій та сумісність між різними виробниками електромобілів і зарядного обладнання. Зростання кількості електромобілів також може впливати на стабільність електричних мереж, що потребуватиме їх подальшої модернізації.

Рівні зарядки індуктивної бездротової електропередачі

Відповідно до стандартів SAE J2954 та IEC 61980, системи бездротового заряджання електромобілів класифікуються за рівнями потужності на чотири основні категорії. Найнижчий рівень переданої потужності відповідає категорії Wireless Power Transfer 1 (WPT1). Максимальна вхідна потужність систем цього класу становить 3,7 кВА. Згідно з вимогами стандарту SAE J2954, мінімальний допустимий коефіцієнт корисної дії таких систем повинен становити не менше 85 %. У випадку неідеального вирівнювання первинної та вторинної котушок ефективність може знижуватися до 80 %.

Системи WPT2 забезпечують передачу більшої потужності, причому їх максимальна вхідна потужність досягає 7,7 кВА. Ще вищий рівень передачі енергії реалізують зарядні пристрої WPT3, які можуть споживати з електромережі до 11,1 кВА. Для обох зазначених категорій обмеження щодо мінімального значення ефективності залишаються такими самими, як і для рівня WPT1.

Найвищий рівень передачі енергії належить до категорії WPT4, для якої максимальна вхідна потужність становить 22 кВА. Однак на сьогодні вимоги до цієї категорії ще не повністю визначені в чинних стандартах. Варто зазначити, що наведена класифікація стосується виключно статичних індуктивних систем заряджання і застосовується як для легкових, так і для важких електромобілів. Стандартизованих вимог для систем динамічної бездротової зарядки наразі не існує.

Вимоги щодо сумісності між системами різних рівнів потужності визначені стандартом SAE J2954 [14]. Наприклад, бортовий зарядний пристрій класу WPT2 повинен бути сумісним із первинними системами WPT1, і навпаки. Крім того, бажано забезпечити сумісність систем WPT3 та WPT4 із зарядними пристроями нижчих рівнів потужності.

Робочий діапазон частот для комерційних бездротових зарядних пристроїв становить 79-90 кГц, при цьому номінальна центральна частота роботи системи

дорівнює 85 кГц. Також у стандарті введено класифікацію відстані між первинною та вторинною котушками, тобто повітряного зазору.

Крім кондуктивних та бездротових методів заряджання, існує ще один альтернативний підхід – заміна акумуляторної батареї. Суть цього методу полягає в тому, що розряджений акумулятор замінюється на інший, повністю заряджений [1, 8]. Такий підхід дозволяє суттєво скоротити час, необхідний для відновлення енергії транспортного засобу, а також зменшити проблему обмеженого запасу ходу електромобілів. Крім того, у цьому випадку не потрібні громіздкі силові перетворювачі, оскільки заряджання батареї відбувається поза транспортним засобом.

Однак широке застосування цієї технології обмежується рядом факторів. Зокрема, для її реалізації необхідна уніфікація конструкції акумуляторів між різними виробниками електромобілів, що передбачає створення стандартного інтерфейсу батарей. Це, у свою чергу, може вимагати від виробників акумуляторів обміну інформацією щодо нових технічних розробок. Крім того, користувачі електромобілів повинні погодитися з тим, що після заміни батареї вони можуть отримати акумулятор із невідомим станом або ступенем зношення. Саме ці фактори є основними перешкодами для широкого впровадження такого методу заряджання.

1.3 Висновки до розділу

У розділі, відповідно до завдання, було проведено аналіз сучасних технологій заряджання електромобілів та досліджено тенденції розвитку зарядної інфраструктури. Розглянуто основні типи зарядних станцій, режими заряджання та технічні рішення, що застосовуються у сучасних системах електромобільності.

Проаналізовано особливості функціонування зарядної інфраструктури та визначено ключові фактори, що впливають на її розвиток, зокрема зростання кількості електромобілів, необхідність підвищення пропускної здатності

електричних мереж і впровадження інтелектуальних систем керування заряджанням.

Встановлено, що сучасні технології заряджання є визначальним чинником розвитку зарядної інфраструктури, оскільки забезпечують підвищення ефективності використання електроенергії, надійності функціонування системи та можливість інтеграції електромобілів у електроенергетичні мережі.

2 РОЗВИТОК ЗАРЯДНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

2.1. Методи заряджання

Заряджання електромобілів може здійснюватися за двома основними підходами – контрольованим або неконтрольованим [4, 5, 6]. У випадку неконтрольованого заряджання процес поповнення енергії акумулятора розпочинається одразу після підключення транспортного засобу до електромережі. Інший варіант передбачає запуск заряджання через встановлений користувачем проміжок часу. У будь-якому випадку процес триває до повного зарядження батареї або до відключення автомобіля від мережі. При цьому спеціальні механізми координації або інтеграції з енергосистемою не використовуються. Хоча такий спосіб є простим у реалізації, він може негативно впливати на електричну мережу, оскільки спричиняє зростання пікових навантажень, коливання напруги та перевантаження трансформаторів і ліній розподільної мережі. Зі збільшенням частки електромобілів у транспортному секторі надійність мережі може знижуватися, що зумовлює необхідність модернізації та посилення енергетичної інфраструктури.

Альтернативним підходом є контрольоване заряджання, яке передбачає можливість планування профілів споживання електроенергії. Основна мета такого методу полягає у зменшенні негативних наслідків інтеграції електромобілів у електроенергетичну систему. Серед можливих проблем можна виділити збільшення навантаження на мережу, перевантаження елементів системи, порушення балансу напруги та частоти, появу гармонійних спотворень і додаткові втрати енергії. Використання керованого заряджання сприяє підтриманню стабільності роботи розподільчої мережі та дозволяє уникнути значних витрат на її модернізацію [4, 5, 6]. Водночас важливим фактором залишається забезпечення комфорту користувачів електромобілів та надання їм економічних стимулів для участі в такій системі керування.

Одним із найпростіших способів непрямого регулювання процесу заряджання є позапікове заряджання, коли користувачів заохочують заряджати електромобілі в періоди мінімального навантаження мережі. Це досягається завдяки економічним стимулам або зниженим тарифам на електроенергію у визначені години. Такий пасивний підхід сприяє вирівнюванню добового графіка споживання електроенергії. Проте в разі недостатнього просторового розподілу зарядних станцій може виникати локальне зростання навантаження в окремих ділянках мережі. Крім того, ефективність цього методу значною мірою залежить від готовності споживачів змінювати власні звички використання електроенергії.

Більш складні підходи передбачають активне керування навантаженням. До таких стратегій належать перенесення споживання в періоди низького попиту, зменшення пікового навантаження, надання допоміжних послуг енергосистемі (наприклад, регулювання частоти та напруги, компенсація реактивної потужності або забезпечення резерву потужності), а також сприяння інтеграції відновлюваних джерел енергії, генерація яких має нестабільний характер [4, 5, 8]. У перших двох випадках оператор електричної мережі взаємодіє з електромобілем безпосередньо або через спеціальних посередників – агрегаторів. При цьому швидкість заряджання може регулюватися або обмежуватися. За таких умов акумулятор електромобіля розглядається як гнучке навантаження, і між транспортним засобом та мережею відбувається односпрямований потік енергії.

Водночас для реалізації деяких функцій необхідний двонаправлений обмін енергією. Саме на цьому принципі базується концепція Vehicle-to-Grid (V2G), яка є розширенням інтелектуальної системи заряджання [4, 5, 8]. У рамках цієї технології електромобілі можуть не лише споживати електроенергію, але й передавати її назад до електромережі. Попри значний потенціал цієї концепції, її практичне впровадження супроводжується певними труднощами. Зокрема, часті цикли заряджання та розряджання можуть пришвидшувати деградацію акумуляторів. Крім того, необхідні додаткові інвестиції для модернізації технічної інфраструктури, включаючи встановлення двонаправлених силових

перетворювачів, а також впровадження сучасних систем зв'язку та алгоритмів керування. Для широкого застосування цієї технології також важливо забезпечити достатні економічні стимули для власників електромобілів, щоб компенсувати їхні можливі ризики та сумніви щодо участі в енергетичному обміні з мережею.

Реалізація розумного заряджання може здійснюватися за допомогою різних алгоритмів керування, спрямованих на досягнення певних технічних або економічних цілей. Для цього необхідна спеціальна структура, що приймає рішення – агрегатор, який виступає посередником між електромобілями та енергетичною системою. Залежно від функцій агрегатора архітектури керування можна поділити на централізовані та децентралізовані [4, 5, 6].

У централізованій системі керування всі рішення приймає агрегатор. Він відповідає за технічне функціонування зарядної інфраструктури, а також за участь електромобілів на ринку електроенергії. Для цього агрегатор здійснює прогнозування попиту на основі історичних даних, поведінки користувачів та інших факторів. Отримані результати передаються оператору розподільчої мережі для погодження.

Крім того, агрегатор може подавати заявки на закупівлю електроенергії на внутрішньо-денному ринку або через енергетичну компанію [5]. Після цього оператор системи передачі аналізує загальний профіль навантаження та встановлює допустимі параметри заряджання для кожної агрегованої зарядної станції. Агрегатор також може отримувати додатковий прибуток, використовуючи енергію акумуляторів електромобілів для надання допоміжних послуг енергосистемі.

Для виконання цих функцій він збирає інформацію від кожного транспортного засобу (стан заряду батареї, параметри заряджання, ідентифікаційні дані тощо) та застосовує алгоритми оптимізації, спрямовані на досягнення визначеної мети без порушення потреб користувача. Такою метою може бути максимізація прибутку, мінімізація відхилень між прогнозованим та фактичним попитом або зменшення втрат електроенергії в мережі. Блок-схема централізованої архітектури керування наведена на рисунку 2.1.

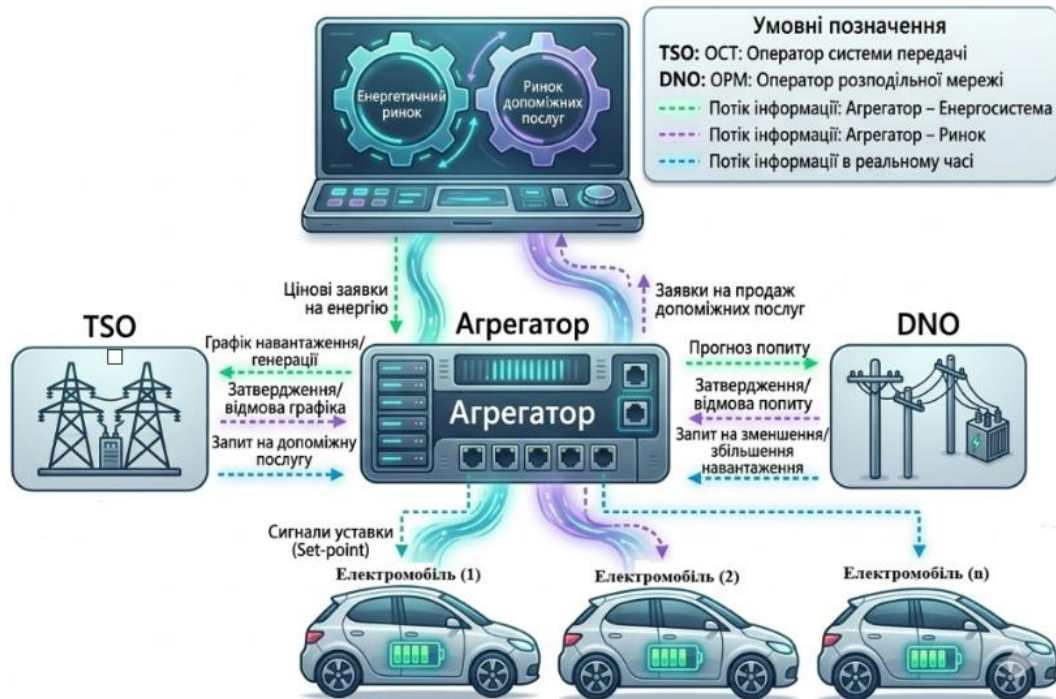


Рисунок 2.1 – Централізована архітектура керування зарядкою електромобілів

У децентралізованій архітектурі керування активну роль у прийнятті рішень відіграє власник електромобіля. Кожен транспортний засіб самостійно визначає оптимальний режим зарядання, орієнтуючись на вартість електроенергії та індивідуальні уподобання користувача, при цьому не передаючи конфіденційну інформацію стороннім організаціям [5]. Агрегатор у такій системі лише інформує про поточні ціни на електроенергію в режимі реального часу. Цей підхід характеризується меншим обчислювальним навантаженням та більшою орієнтацією на інтереси користувачів. Однак для його реалізації необхідний двосторонній обмін інформацією, а самі електромобілі повинні мати певні інтелектуальні можливості для виконання відповідних алгоритмів керування [5]. Структура такої системи наведена на рисунку 2.2.

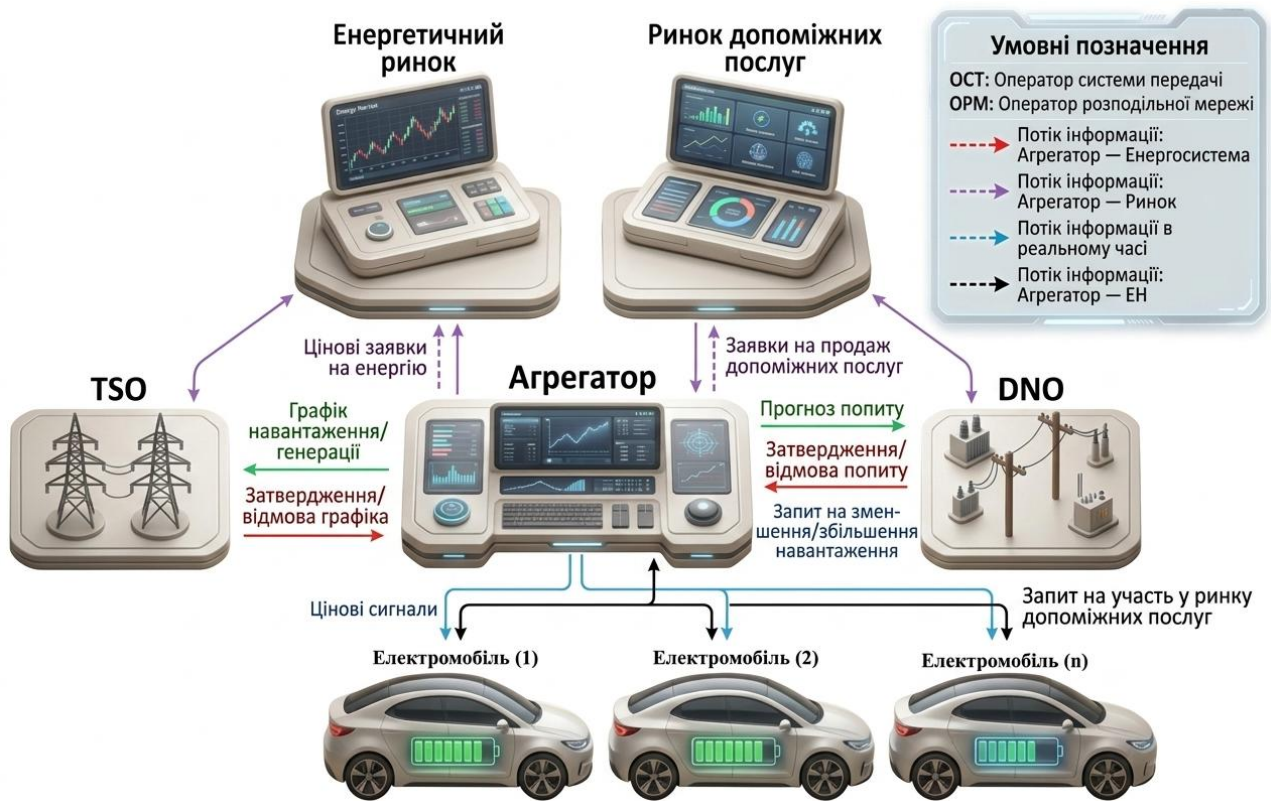


Рисунок 2.2 – Децентралізована архітектура керування зарядкою електромобілів

Окремим варіантом є ієрархічна система керування, яка поєднує риси централізованого та децентралізованого підходів. Її структура наведена на рисунку 2.3. У такій системі процес прийняття рішень розподіляється між кількома агрегаторами, що організовані у вигляді деревоподібної комунікаційної структури. Кожен агрегатор відповідає за визначення графіка заряджання електромобілів у своїй зоні або передає інформаційні сигнали для коригування профілів заряджання більшої групи транспортних засобів. Подібно до децентралізованого підходу, задача оптимізації розбивається на ряд менших підзадач, які вирішуються локально. Проте зазначені методи все ще перебувають на стадії досліджень і поки не отримали широкого практичного застосування.

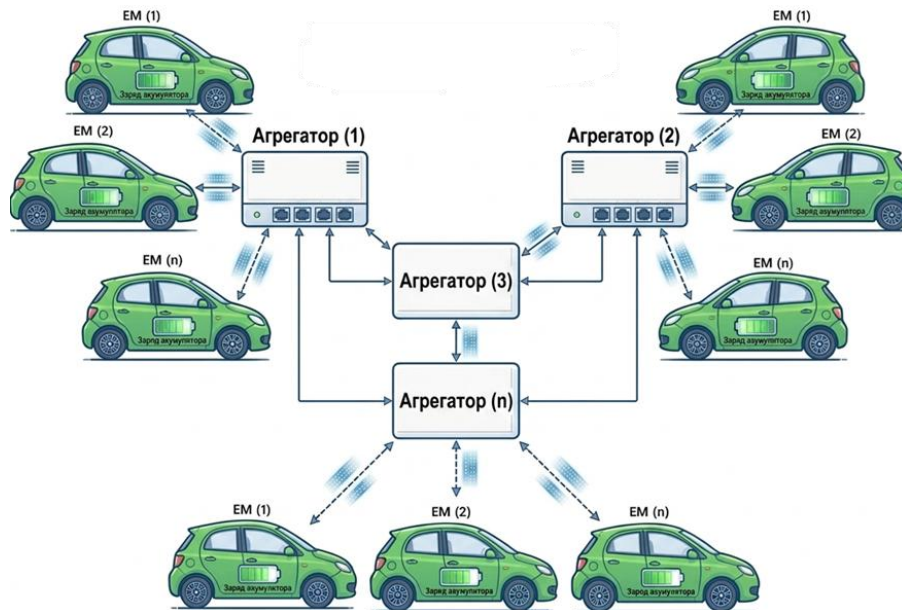


Рисунок 2.3 – Ієрархічна архітектура керування зарядкою електромобілів

На сьогодні більшість енергетичних компаній використовує неконтрольоване зарядання або прості пасивні механізми регулювання. Найпоширенішим із них є тариф «час використання», або система подвійних тарифів. У цьому випадку власників електромобілів стимулюють переносити зарядження на періоди низького попиту, коли вартість електроенергії є нижчою, наприклад у нічний час [2]. Однак навіть така стратегія не завжди забезпечує бажаний ефект вирівнювання навантаження, оскільки пікове споживання може просто зміщуватися на інший часовий інтервал. Крім того, електромобілі в більшості випадків все ще виступають лише як споживачі електроенергії, оскільки концепція V2G поки що не набула широкого поширення [2].

2.2 Процедура зарядження та протоколи зв'язку

Процес зарядження електромобіля передбачає взаємодію між кількома учасниками, серед яких оператори зарядних станцій, постачальники послуг електромобільності та роумінгові платформи. Оператор зарядної станції відповідає за експлуатацію та технічне обслуговування зарядної інфраструктури. До його функцій належать контроль доступу до станцій, управління

обладнанням, збір і обробка експлуатаційних даних, технічне обслуговування та ремонт. Крім того, оператор може здійснювати комерційну діяльність, закупаючи електроенергію на енергетичному ринку та надаючи послуги заряджання користувачам.

Постачальник послуг електромобільності є організацією, що пропонує користувачам різноманітні сервіси, пов'язані з використанням електромобілів. Його основною функцією є забезпечення доступу клієнтів до зарядних станцій, які можуть належати різним операторам зарядної інфраструктури. Крім цього, такі компанії можуть надавати додаткові послуги, зокрема пошук зарядних станцій, моніторинг їх доступності, бронювання місць для заряджання та інші інформаційні сервіси. Як правило, доступ до цих функцій здійснюється через мобільні застосунки, розроблені постачальником послуг електромобільності.

Ще одним важливим елементом системи є роумінговий хаб або клірингова платформа. Це централізована інформаційна система, яка забезпечує обмін даними між різними операторами зарядних станцій та постачальниками послуг електромобільності. Завдяки такій платформі користувачі можуть отримувати доступ до зарядних станцій різних операторів незалежно від того, з яким постачальником послуг у них укладено договір. Для ефективної роботи системи заряджання необхідний постійний обмін інформацією між усіма учасниками. При цьому в окремих випадках одна організація може виконувати декілька ролей одночасно, залежно від бізнес-моделі, що застосовується в певній країні. Наприклад, постачальник послуг електромобільності може одночасно бути власником і оператором зарядної станції.

Взаємодія електромобіля із зарядною станцією здійснюється через спеціальні сигнальні контакти, відомі як пілотні лінії. Для обміну інформацією між транспортним засобом і зарядним пристроєм використовується стандарт ISO/IEC 15118, розроблений Міжнародною організацією зі стандартизації [8, 18, 19]. Цей стандарт вважається одним із найпоширеніших і рекомендованих для реалізації комунікації в системах заряджання електромобілів [20]. Через нього передаються такі дані, як стан заряду

акумулятора, допустимий рівень потужності заряджання, ідентифікаційні дані користувача та інша службова інформація.

Для віддаленого керування зарядними станціями використовується система управління зарядною інфраструктурою – програмна платформа, яка працює на сервері оператора. Взаємодія між зарядною станцією та цією системою зазвичай здійснюється за допомогою протоколу Open Charge Point Protocol (OCPP) [19]. OCPP є відкритим галузевим стандартом, який базується на комунікаційному протоколі WebSocket і широко застосовується для обміну інформацією між зарядними пристроями та центральною системою керування. Він підтримує роботу як із заряджанням змінним струмом, так і з заряджанням постійним струмом [19]. Використання OCPP дає змогу здійснювати дистанційне керування зарядними станціями, а також передавати інформацію про їхній стан до центральної системи.

Через протокол OCPP зарядні станції можуть передавати дані до системи управління зарядною інфраструктурою, що дозволяє оператору контролювати процес заряджання. У свою чергу, центральна система взаємодіє з мобільними застосунками користувачів, надаючи можливість бронювання зарядних слотів, їх скасування та отримання інформації про стан заряджання електромобіля.

Коли електромобіль підключається до зарядної станції, водій може пройти процедуру авторизації різними способами. До них належать використання RFID-карток або токенів, система Plug & Charge відповідно до стандарту ISO 15118-1, платіжні термінали, механічні ключі або мобільні пристрої. Після ідентифікації користувача система CSMS надсилає на зарядну станцію необхідні дані для відображення на її інтерфейсі. Користувач отримує інформацію про умови транзакції, мову інтерфейсу, тариф, приблизну вартість заряджання та очікуваний час завершення процесу [19]. Після підтвердження авторизації центральна система розблоковує відповідний роз'єм зарядної станції.

Центральна система керування має можливість контролювати весь процес заряджання, відстежувати стан кожного підключеного електромобіля та забезпечувати проведення фінансових операцій [18]. Для цього

використовується база даних, яка містить інформацію про доступні зарядні станції, зареєстрованих користувачів і процедури розрахунків. У нових версіях протоколу OCPP передбачена можливість надання користувачам декількох варіантів тарифних планів із різними графіками заряджання. Це дозволяє водіям обирати оптимальний варіант відповідно до власних потреб і тарифних моделей, наприклад тарифів типу Time-of-Use (TOU).

Мобільні застосунки, що розробляються постачальниками послуг електромобільності, виступають інтерфейсом між користувачем та системою керування зарядною інфраструктурою. Завдяки таким додаткам водій може отримувати інформацію про поточну потужність заряджання, орієнтовний час завершення процесу та загальну вартість заряджання. Ці дані доступні як на дисплеї зарядної станції, так і віддалено через смартфон. Крім того, користувач може контролювати процедуру оплати та здійснювати керування заряджанням дистанційно.

Оскільки система управління зарядною інфраструктурою дозволяє бронювати зарядні станції або скасовувати резервування, користувачі мають можливість у режимі реального часу перевіряти наявність вільних зарядних слотів у своєму регіоні та за потреби резервувати їх [18]. Деякі мобільні застосунки також оснащені навігаційними функціями, що допомагає швидко знаходити найближчі зарядні станції та оптимізувати маршрут.

Для забезпечення доступу користувачів до зарядних станцій різних операторів застосовується роумінговий протокол Open Charge Point Interface (OCPI). Завдяки цьому протоколу відбувається обмін інформацією між різними постачальниками послуг електромобільності. Така взаємодія можлива як через прямі договірні відносини між компаніями, так і через роумінгові платформи, які об'єднують різні мережі зарядних станцій. Для користувачів, які не мають контракту з певним оператором, більшість зарядних станцій також пропонує можливість прямої оплати безпосередньо на місці.

Протоколи зв'язку, що застосовуються під час процедури заряджання електромобіля, наведено на рисунку 2.4.

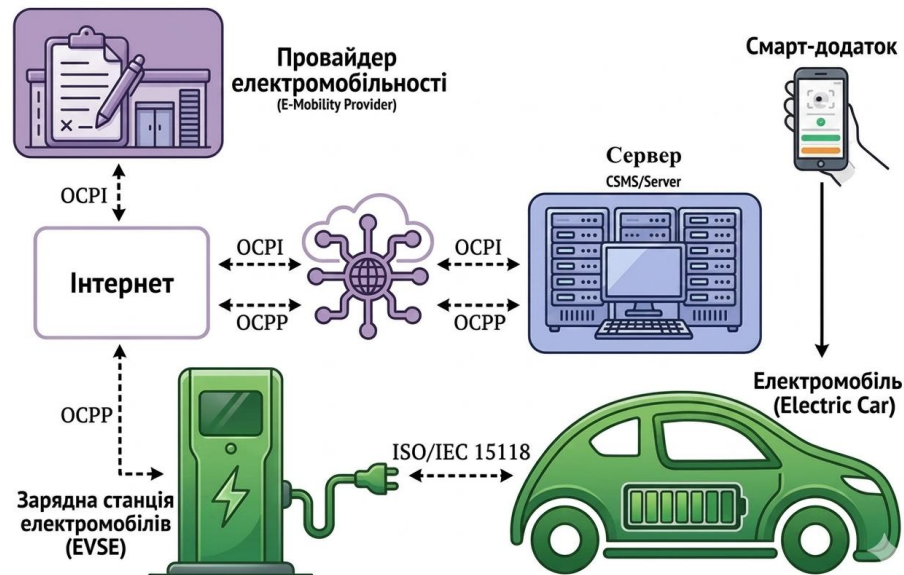


Рисунок 2.4 – Протоколи зв'язку, що використовуються під час процедури заряджання

2.3 Структура Інтернету Електрики

У перспективі структура енергетичних систем разом із їхньою комунікаційною інфраструктурою зазнає суттєвих змін порівняно з сучасною моделлю. Традиційна централізована система виробництва електроенергії поступово трансформуватиметься у децентралізовану мережу, відому як розумна енергосистема або Інтернет енергії (ІоЕ). Така трансформація призведе до зміни принципів передавання та розподілу електроенергії, а також способів обміну інформацією між енергетичною інфраструктурою та кінцевими споживачами. У новій моделі значну роль відіграватимуть розосереджені джерела відновлюваної енергії, як невеликі локальні установки, так і великі електростанції [6]. При цьому промислові та побутові споживачі отримають можливість не лише споживати електроенергію, а й постачати її назад у мережу, виконуючи функції так званих прос'юмерів (споживачів-виробників) [4, 6].

Концепція ІоЕ передбачає інтеграцію різних інфраструктур – електроенергетичної, транспортної, газової та теплової – у єдину взаємопов'язану систему. У межах цієї інтегрованої структури енергетичний

обмін здійснюватиметься між широким спектром джерел та споживачів, включаючи установки відновлюваної генерації, системи накопичення енергії, теплові установки, електромобілі та активних споживачів енергії [6, 21]. Іншими словами, кількість великих централізованих електростанцій поступово зменшуватиметься, тоді як частка відновлюваних джерел значно зростатиме. Кожен енергетичний об'єкт або система накопичення зможе виступати як джерелом, так і споживачем електроенергії. Підключення таких елементів до енергосистеми здійснюватиметься за принципом «plug-and-play», подібно до підключення периферійних пристроїв до комп'ютера через USB-інтерфейс, без необхідності складної перебудови системи [4, 6]. При цьому роль кожного учасника визначатиметься поточним станом мережі, балансом між локальним виробництвом і споживанням енергії, а також економічними інтересами користувачів.

Функціонування такої інфраструктури потребує впровадження системи управління енергією, яка забезпечує координацію роботи різних елементів енергетичної мережі. Основним завданням цієї системи є контроль і регулювання потоків енергії між усіма компонентами, що дозволяє підвищити надійність та гнучкість роботи енергосистеми, а також оптимізувати економічні показники як виробників, так і споживачів [4, 6]. У середовищі ІоЕ генератори, накопичувачі енергії та споживачі в межах певного регіону взаємодіють між собою через локальні контролери, формуючи децентралізовану систему керування. Обмін енергією між ними здійснюється за допомогою двонаправлених силових перетворювачів. Водночас для координації цих процесів необхідний постійний обмін інформацією між пристроями та контролерами через мережу Інтернет.

Комунікаційна інфраструктура ІоЕ ґрунтується на принципах Інтернету речей (ІоТ), який забезпечує двосторонній обмін даними між різними пристроями [4, 22]. Передавання інформації може здійснюватися як через дротові, так і бездротові канали зв'язку або їхню комбінацію. Кожен елемент системи ІоЕ оснащується інтелектуальними компонентами, такими як датчики,

розумні лічильники, виконавчі механізми, обчислювальні модулі та комунікаційні інтерфейси. Завдяки цьому пристрої здатні збирати, обробляти та передавати інформацію, а також приймати локальні рішення щодо власної роботи. Основною метою є створення мережі, у якій кожен елемент може взаємодіяти з іншими компонентами та адаптувати свою поведінку відповідно до умов роботи системи. Важливо, щоб використовувані комунікаційні технології забезпечували надійність і високу швидкість передачі даних. У роботах [20, 22, 23] наведено детальний аналіз комунікаційних технологій, що можуть застосовуватися в інтелектуальних енергетичних мережах. Крім того, у [21] проведено порівняння концепції ІоЕ з сучасними розподіленими обчислювальними системами та інтернет-інфраструктурою, що демонструє подібність принципів їх функціонування. Архітектуру системи ІоЕ представлено на рисунку 2.5.



Рисунок 2.5 – Архітектура фреймворку ІоЕ

Завдяки можливостям моніторингу та керування в режимі реального часу структура ІоЕ створює сприятливі умови для інтеграції електромобілів у енергетичну систему. Використання сучасних комунікаційних технологій

дозволяє реалізувати різні стратегії активного керування навантаженням. Зокрема, можна планувати графіки заряджання електромобілів і змінювати швидкість заряджання залежно від поточного стану мережі та її технічних обмежень. Це сприяє вирівнюванню профілю споживання електроенергії.

Крім того, електромобілі відіграють важливу роль у децентралізованій енергетичній системі завдяки здатності компенсувати нестабільність генерації відновлюваних джерел енергії. Вони можуть виступати як гнучке електричне навантаження, так і кероване джерело енергії, а також швидко підключатися або відключатися від мережі за принципом plug-and-play. У такій системі акумулятор електромобіля розглядається як додатковий енергетичний ресурс, здатний надавати допоміжні послуги та підтримувати баланс між виробництвом і споживанням електроенергії. Саме тому технологія V2G органічно вписується в концепцію ІоЕ.

Ще одним важливим напрямом розвитку є підключена мобільність. Ця концепція передбачає обмін інформацією між електромобілем, дорожньою інфраструктурою, пасажирями, іншими транспортними засобами та елементами транспортної системи [6]. Використання технологій ІоТ та сучасних сенсорних систем дозволяє електромобілям збирати та передавати дані про різні параметри роботи, зокрема швидкість руху, координати, температуру, стан акумулятора та інші характеристики. Така інформація може застосовуватися для оптимізації транспортних потоків, зменшення заторів та підвищення ефективності управління дорожнім рухом. Крім того, водій отримує можливість контролювати технічний стан автомобіля та своєчасно отримувати інформацію про необхідність заряджання або технічного обслуговування [3]. У результаті підключена мобільність підвищує безпеку, комфорт та загальну ефективність використання транспортних засобів.

Подальший розвиток цієї концепції пов'язаний із впровадженням автономних транспортних засобів. Такі автомобілі можуть пересуватися без безпосереднього втручання людини, використовуючи комплекс сенсорних

систем, включаючи ультразвукові датчики, GPS-навігацію, радарні системи, LiDAR та камери, а також спеціалізовані алгоритми керування. Вони здатні визначати оптимальний маршрут руху, аналізувати дорожню обстановку, регулювати швидкість і положення автомобіля на дорозі та забезпечувати безпечну дистанцію між транспортними засобами. Поширення автономних транспортних засобів також стимулює розвиток бездротових систем заряджання, оскільки повністю автономні електромобілі повинні мати можливість заряджатися без участі людини.

2.4 Висновки до розділу

У розділі, відповідно до завдання, було розглянуто застосування сучасних технологій заряджання електромобілів для розвитку зарядної інфраструктури. Досліджено особливості формування зарядної інфраструктури та визначено роль сучасних технологічних рішень у підвищенні ефективності її функціонування.

Проаналізовано використання інтелектуального заряджання, швидкісних зарядних станцій та двонаправленого енергетичного обміну, що забезпечують оптимізацію режимів роботи зарядної інфраструктури та її інтеграцію з електричною мережею.

Встановлено, що застосування сучасних технологій заряджання є ключовим чинником розвитку зарядної інфраструктури електромобілів, оскільки дозволяє підвищити ефективність використання електроенергії, зменшити навантаження на мережу та забезпечити її гнучкість і надійність.

Отже, застосування сучасних технологій заряджання електромобілів забезпечує ефективний розвиток зарядної інфраструктури та є важливою умовою інтеграції електромобільного транспорту в сучасні електроенергетичні системи.

3 РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ЗАРЯДНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ

Розвиток зарядної інфраструктури електромобілів є невід'ємною складовою процесу електрифікації транспорту та інтеграції його в сучасні електроенергетичні системи. Зі зростанням кількості електромобілів виникає необхідність у визначенні раціональних параметрів зарядних станцій, режимів їх роботи та оцінці впливу на електричні мережі.

Особливої актуальності набуває застосування сучасних технологій заряджання, таких як кероване заряджання та технологія двонаправленого енергетичного обміну, які дозволяють підвищити ефективність використання електричної енергії та забезпечити гнучкість енергосистеми [24, 26].

Метою даного розділу є розрахунок параметрів зарядної інфраструктури електромобілів, визначення її впливу на електричну мережу та обґрунтування доцільності застосування сучасних технологій заряджання.

3.1 Вихідні дані для розрахунку

Для виконання розрахунків розглядається умовний міський район із середнім рівнем розвитку електромобільного транспорту. Вихідні дані сформовано на основі аналізу сучасних наукових досліджень у сфері інтеграції електромобілів в електричні мережі та розвитку зарядної інфраструктури [24–27].

Кількість електромобілів у досліджуваному районі приймається рівною 150 одиниць. Таке значення відповідає типовим сценаріям часткової електрифікації міського транспорту.

Середня ємність акумуляторної батареї одного електромобіля приймається на рівні 50 кВт·год, що відповідає характеристикам сучасних електромобілів середнього класу [24]. При цьому вважається, що перед початком заряджання

аккумулятор розряджений на 60 %, тобто коефіцієнт використання ємності становить 0,6.

Передбачається, що кожен електромобіль проходить один цикл заряджання на добу. Такий підхід широко використовується при оцінці добового навантаження від електромобілів [27].

З урахуванням існуючих підходів до організації зарядної інфраструктури приймається, що 70 % заряджання здійснюється за допомогою повільних зарядних станцій змінного струму, тоді як 30 % – за допомогою швидких станцій постійного струму [25].

Номінальна потужність АС-станції приймається рівною 11 кВт, що відповідає стандартним побутовим та напівкомерційним зарядним пристроям. Потужність швидких ДС-станцій приймається на рівні 60 кВт, що характерно для міської зарядної інфраструктури [25].

Коефіцієнт одночасності заряджання без застосування керування приймається рівним 0,35, що відповідає вечірнім піковим навантаженням. У разі використання керованого заряджання цей коефіцієнт може бути знижений до 0,2 за рахунок перерозподілу навантаження у часі [27].

Коефіцієнт корисної дії зарядної інфраструктури приймається на рівні 0,92, що враховує втрати в перетворювальних пристроях [25].

3.2 Розрахунок добового електроспоживання електромобілів

Добове електроспоживання визначається як:

$$W = N \cdot C \cdot k \cdot n, \quad (3.1)$$

де N – кількість електромобілів;
 C – ємність аккумулятора;
 k – коефіцієнт використання;
 n – кількість циклів заряджання.

Підставляючи значення, отримаємо:

$$W = 150 \cdot 50 \cdot 0,6 \cdot 1 = 4500 \text{ кВт} / \text{год}$$

З урахуванням втрат у зарядних пристроях:

$$W_{\text{реал}} = \frac{W}{\eta} \approx 4891 \text{ кВт} \quad (3.2)$$

Отримане значення свідчить про суттєве зростання навантаження на розподільчу мережу внаслідок розвитку електромобільного транспорту [24].

3.3 Визначення максимального навантаження на електричну мережу

Для оцінки впливу зарядної інфраструктури визначається середньозважена потужність заряджання:

$$P_{\text{сеп}} = 0,7 \cdot 11 + 0,3 \cdot 60 = 25,7 \text{ кВт} \quad (3.3)$$

Максимальне навантаження без застосування керування:

$$P_{\text{max}} = N \cdot P_{\text{сеп}} \cdot k_{\text{одн}} \approx 1349 \text{ кВт} \quad (3.4)$$

$$P_{\text{max}} = 150 \cdot 25,7 \cdot 0,35 \approx 1349 \text{ кВт}$$

Це значення відповідає умовам неконтрольованого заряджання, коли більшість електромобілів підключаються до мережі одночасно, що призводить до пікового навантаження [27].

У разі застосування керованого заряджання:

$$P_{\max} = 150 \cdot 25,7 \cdot 0,2 \approx 771 \text{ кВт} \quad (3.5)$$

Зменшення навантаження пояснюється оптимальним розподілом процесів заряджання в часі.

3.4 Розрахунок необхідної кількості зарядних станцій

Кількість зарядних станцій визначається з урахуванням тривалості заряджання та коефіцієнта використання обладнання [25].

Для повільного заряджання (6 год):

$$N_{AC} = \frac{150 \cdot 0,7 \cdot 6}{25,7 \cdot 0,65} \approx 40 \quad (3.6)$$

Для швидкого заряджання (1 год):

$$N_{DC} = \frac{150 \cdot 0,3 \cdot 1}{24 \cdot 0,65} \approx 3 \quad (3.7)$$

Отримані результати показують, що повільні зарядні станції потребують більшої кількості через триваліший процес заряджання.

3.5 Оцінка впливу на електричну мережу

Для оцінки режимів роботи мережі розглядається трансформатор потужністю 1000 кВА.

Коефіцієнт завантаження:

$$k_{зав} = \frac{P_{\max}}{S_{mp}} \quad (3.8)$$

Без керування:

$$k_{зав} = \frac{1349}{1000} = 1,35$$

Це свідчить про перевантаження трансформатора, що є недопустимим режимом роботи.

З урахуванням керованого заряджання:

$$k_{зав} = \frac{771}{1000} = 0,77$$

Такий режим відповідає допустимим умовам експлуатації обладнання.

3.6 Аналіз ефективності застосування сучасних технологій заряджання

Додаткове зниження навантаження досягається за рахунок використання технології V2G, яка забезпечує можливість віддачі електроенергії від акумуляторів електромобілів у мережу [26].

Припустимо, що 20% електромобілів беруть участь у процесі V2G, а потужність віддачі становить 10 кВт:

$$P_{V2G} = 150 \cdot 0,2 \cdot 10 = 300 \text{ кВт} \quad (3.9)$$

Фактичне навантаження:

$$P = 771 - 300 = 471 \text{ кВт} \quad (3.10)$$

Таким чином, застосування технології V2G дозволяє значно зменшити навантаження на мережу в пікові періоди та підвищити її стійкість [26, 27].

3.7 Висновки до розділу

У результаті виконаних розрахунків визначено параметри зарядної інфраструктури електромобілів та оцінено їх вплив на електричну мережу. Встановлено, що неконтрольоване зарядження призводить до перевантаження мережевих елементів, а застосування сучасних технологій зарядження, зокрема керованого зарядження та V2G, забезпечує зниження пікових навантажень, підвищення ефективності функціонування зарядної інфраструктури та її надійну інтеграцію в електроенергетичну систему.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Вступ

Застосування сучасних технологій заряджання електромобілів для розвитку зарядної інфраструктури передбачає використання складного електротехнічного обладнання, яке працює в умовах підвищених електричних навантажень. До такого обладнання належать зарядні станції змінного та постійного струму, силові перетворювачі, кабельні лінії, системи керування та акумуляторні батареї електромобілів.

Експлуатація, технічне обслуговування та ремонт зазначених систем пов'язані з впливом небезпечних і шкідливих виробничих факторів, які можуть негативно впливати на здоров'я працівників. Особливу небезпеку становить електричний струм, оскільки сучасні швидкісні зарядні станції працюють при напругах до 400-1000 В постійного струму, що значно перевищує безпечні для людини значення [28].

Крім того, під час роботи зарядної інфраструктури виникають електромагнітні поля, теплові навантаження, а також існує ризик виникнення пожеж у разі коротких замикань або несправності обладнання. Особливу увагу необхідно приділяти безпеці обслуговування акумуляторних батарей електромобілів, які можуть бути джерелом підвищеної пожежної та хімічної небезпеки [29].

Згідно з даними з охорони праці, значна частина нещасних випадків у сфері електроенергетики пов'язана з порушенням правил електробезпеки, недостатнім рівнем підготовки персоналу та відсутністю ефективних технічних засобів захисту [30].

Метою даного розділу є аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів, що виникають при експлуатації сучасних зарядних станцій електромобілів, а також розробка організаційно-технічних заходів щодо забезпечення безпечних умов праці.

4.2 Аналіз небезпечних та шкідливих факторів

Аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів проведено відповідно до ДСТУ 12.0.003-74*, який передбачає їх класифікацію за природою впливу на людину [31].

Основні елементи зарядної інфраструктури електромобілів наведено на рисунку 4.1.



Рисунок 4.1 – Основні елементи зарядної станції електромобіля

До основних елементів належать:

- зарядна станція (АС або DC);
- силовий перетворювач;
- система керування;
- кабель заряджання;
- акумуляторна батарея електромобіля.

Небезпечні виробничі фактори

До найбільш небезпечних факторів належать:

Ураження електричним струмом. Є основним фактором ризику при роботі із зарядними станціями. Дотик до струмопровідних частин або пошкодженої ізоляції може призвести до важких електротравм. Особливо небезпечними є режими швидкісного заряджання постійним струмом [32].

Коротке замикання. Може виникати внаслідок пошкодження кабелів або помилок при експлуатації. Супроводжується значним тепловиділенням і може спричинити пожежу.

Пожежа акумуляторних батарей. Літій-іонні батареї при пошкодженні або перегріві можуть переходити в режим теплового розгону, що призводить до займання [29].

Механічні травми. Можуть виникати при роботі з обладнанням, кабелями або інструментами.

Шкідливі виробничі фактори

До шкідливих факторів, що діють протягом тривалого часу, належать:

Електромагнітні поля. Утворюються при роботі силових перетворювачів і можуть впливати на нервову систему людини [33].

Підвищений рівень шуму. Джерелами шуму є системи охолодження та силові трансформатори.

Недостатнє освітлення. Знижує точність виконання робіт і підвищує ризик травматизму.

Хімічні фактори. У разі пошкодження акумуляторів можливе виділення токсичних речовин.

4.3 Організаційно-технічні заходи забезпечення безпеки

Для забезпечення безпечних умов праці при експлуатації зарядної інфраструктури необхідно застосовувати комплекс організаційних та технічних заходів.

Організаційні заходи

До організаційних заходів належать:

- проведення інструктажів з охорони праці;
- навчання персоналу правилам електробезпеки;
- допуск до роботи працівників з відповідною групою з електробезпеки;
- використання наряду-допуску;

- контроль за технічним станом обладнання.

Засоби індивідуального захисту

При роботі із зарядними станціями необхідно використовувати:

- діелектричні рукавички;
- діелектричне взуття;
- захисні окуляри;
- ізольований інструмент.

Технічні заходи

До технічних заходів належать:

- застосування захисного заземлення;
- використання автоматичних вимикачів і ПЗВ;
- ізоляція струмопровідних частин;
- встановлення систем аварійного відключення;
- контроль температури обладнання.

Розрахунок захисного заземлення зарядної станції

Одним із найефективніших технічних заходів забезпечення електробезпеки при експлуатації зарядних станцій електромобілів є застосування захисного заземлення. Його призначення полягає у зниженні напруги дотику до безпечного рівня у разі пошкодження ізоляції струмопровідних частин [32].

При пошкодженні ізоляції корпус зарядної станції може опинитися під напругою, що створює небезпеку ураження електричним струмом. Наявність заземлення забезпечує відведення струму замикання в землю та спрацювання захисних апаратів (рис. 4.2).

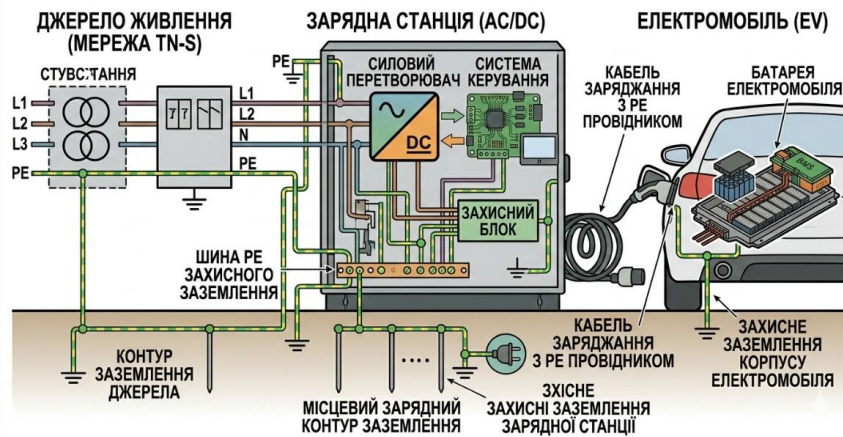


Рисунок 4.2 – Схема захисного заземлення зарядної станції

Опір заземлювального пристрою визначається за формулою:

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

де ρ – питомий опір ґрунту, $\rho = 100 \text{ Ом} \cdot \text{м}$;

L – довжина заземлювача, $L = 3 \text{ м}$;

d – діаметр електрода, $d = 0,02 \text{ м}$.

Тоді:

$$R = \frac{100}{2\pi \cdot 3} \ln\left(\frac{2 \cdot 3}{0,02}\right) = \frac{100}{18,85} \ln(300) \approx 5,3 \cdot 5,7 \approx 30 \text{ Ом}$$

Отримане значення перевищує допустиме (зазвичай не більше 4 Ом), тому необхідно застосувати групу заземлювачів.

Еквівалентний опір групи електродів визначається як:

$$R_{\text{екв}} = \frac{R}{n} \quad (4.2)$$

де n – кількість електродів.

Для досягнення нормативного значення:

$$n = \frac{30}{4} \approx 8$$

Отже, необхідно використати не менше 8 вертикальних заземлювачів, з'єднаних між собою сталевую смугою. Це забезпечить безпечний рівень напруги дотику та ефективну роботу захисних пристроїв.

4.4 Висновки по розділу

У даному розділі розглянуто питання забезпечення безпечних умов праці під час експлуатації та обслуговування зарядної інфраструктури електромобілів. Проведено аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів, що виникають при роботі із зарядними станціями, силовими перетворювачами та акумуляторними батареями електромобілів.

Для зниження рівня виробничих ризиків запропоновано комплекс організаційних і технічних заходів, що включає проведення інструктажів з охорони праці, допуск до роботи персоналу з відповідною групою з електробезпеки, застосування засобів індивідуального захисту, використання автоматичних систем захисту та аварійного відключення обладнання.

У межах розділу виконано розрахунок захисного заземлення зарядної станції електромобіля, який показав необхідність застосування групи вертикальних заземлювачів для забезпечення нормативного значення опору заземлювального пристрою. Реалізація запропонованих заходів дозволяє підвищити рівень електробезпеки та забезпечити безпечну експлуатацію зарядної інфраструктури електромобілів.

ВИСНОВКИ

У першому розділі проведено аналіз сучасних технологій заряджання електромобілів та тенденцій розвитку зарядної інфраструктури. Визначено основні типи та режими заряджання, а також встановлено їх ключову роль у формуванні ефективної та надійної зарядної інфраструктури електромобілів.

У другому розділі розглянуто застосування сучасних технологій заряджання електромобілів для розвитку зарядної інфраструктури. Встановлено, що їх використання забезпечує підвищення ефективності функціонування інфраструктури, оптимізацію навантаження на електричну мережу та сприяє її надійній інтеграції з електромобільним транспортом.

У третьому розділі виконано розрахунок параметрів зарядної інфраструктури електромобілів та оцінено її вплив на електричну мережу.

У четвертому розділі проведено аналіз небезпечних і шкідливих факторів під час експлуатації зарядної інфраструктури електромобілів та розроблено організаційно-технічні заходи забезпечення безпечних умов праці, а також виконано розрахунок захисного заземлення зарядної станції відповідно до нормативних вимог.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Sanguesa, J.A.; Torres-Sanz, V.; Garrido, P.; Martinez, F.J.; Marquez-Barja, J.M. A Review on Electric Vehicles: Technologies and Challenges. *Smart Cities* 2021, 4, 372–404.
2. Глобальний огляд електромобілів 2022. Забезпечення постачання для електричного майбутнього. 2022. Доступно онлайн: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2022>
3. Лай, Х.; Чен, К.; Тан, Х.; Чжоу, Ю.; Гао, Ф.; Го, Ю.; Бхагат, Р.; Чжен, Ю. Критичний огляд оцінки життєвого циклу літій-іонних акумуляторів для електромобілів: перспектива терміну служби. *eTransportation* 2022, 12, 100169.
4. Mahmud, K.; Town, G.E.; Morsalin, S.; Hossain, M.J. Integration of electric vehicles and management in the internet of energy. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2018, 82, 4179–4203.
5. García-Villalobos, J.; Zamora, J.; San Martín, J.I.; Asensio, F.J.; Aperribay, V. Plug-in electric vehicles in electric distribution networks: A review of smart charging approaches. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2014, 38, 717–731.
6. Дас, Х.С.; Рахман, М.М.; Лі, С.; Тан, К.В. Стандарти для електромобілів, зарядна інфраструктура та вплив на інтеграцію в мережу: технологічний огляд. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2020, 120, 109618.
7. Сінгх, Р.; Санджівікумар, П.; Кумар, Д.С.; Молінас, М.; Блааб'єрг, Ф. Системи заряджання на основі кабелів та бездротової мережі для електромобілів. *Технологія та контроль, управління та інтеграція мережі*, 1-ше видання; Інститут інженерії та технологій: Лондон, Велика Британія, 2021; с. 1–31.
8. Amry, Y.; Elbouchikhi, E.; Le Gall, F.; Ghogho, M.; El Hani, S. Electric Vehicle Traction Drives and Charging Station Power Electronics: Current Status and Challenges. *Energies* 2022, 15, 6037.

9. Feng, H.; Tavakoli, R.; Pantic, Z.; Onar, O.C. Advances in High-Power Wireless Charging Systems: Overview and Design Considerations. *IEEE Trans. Transp. Electrification*. 2020, 6, 886–919.
10. Musavi, F.; Eberle, W. Overview of wireless power transfer technologies for electric vehicle battery charging. *IET Power Electron.* 2014, 7, 60–66.
11. Triviño, A.; González, J.M.; Aguado, J.A. Wireless Power Transfer Technologies Applied to Electric Vehicles: A Review. *Energies* 2021, 14, 1547.
12. Triviño-Cabrera, A.; González-González, J.M.; Aguado, J.A. *Power Systems. Wireless Power Transfer for Electric Vehicles: Foundations and Design Approach*, 1st ed.; Springer Nature Switzerland AG: Cham, Switzerland, 2020; pp. 1–39.
13. Ahmad, A.; Alam, M.S.; Chabaan, R. A Comprehensive Review of Wireless Charging Technologies for Electric Vehicles. *IEEE Trans. Transp. Electrification*. 2017, 4, 38–63.
14. Niu, S.; Xu, H.; Sun, Z.; Shao, Z.; Jian, L. The state-of-the-arts of wireless electric vehicle charging via magnetic resonance: Principles, standards and core technologies. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2019, 114, 109302.
15. Патіл, Д.; Макдоноу, М.К.; Міллер, Дж.М.; Фахімі, Б.; Балсара, П.Т. Бездротова передача енергії для автомобільних застосувань: огляд та проблеми. *IEEE Trans. Transp. Electrification*. 2018, 4, 3–37.
16. Bandyopadhyay, S.; Venugopal, P.; Dong, J.; Bauer, P. Comparison of Magnetic Couplers for IPT-Based EV Charging Using Multi-Objective Optimization. *IEEE Trans. Veh. Technol.* 2019, 68, 5416–5429.
17. Hanif, M.; Ongayo, D. Comparison of circular and rectangular coil transformer parameters for wireless Power Transfer based on Finite Element Analysis. In *Proceedings of the COBEP/SPEC, Fortaleza, Brazil, 29 November–2 December 2015*.
18. Hsaini, S.; Ghogho, M.; Charaf, M.E.H. An OCPP-Based Approach for Electric Vehicle Charging Management. *Energies* 2022, 15, 6735.
19. Orcioni, S.; Conti, M. EV Smart Charging with Advance Reservation Extension to the OCPP Standard. *Energies* 2020, 13, 3263.

20. Kabalci, Y. A survey on smart metering and smart grid communication. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2016, 57, 302–318.
21. Kafle, Y.R.; Mahmud, K.; Morsalin, S.; Town, G.E. Towards an Internet of Energy. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Power System Technology (POWERCON)*, Wollongong, NSW, Australia, 28 September–1 October 2016.
22. Motlagh, N.H.; Mohammadrezaei, M.; Hunt, J.; Zakeri, B. Internet of Things (IoT) and the Energy Sector. *Energies* 2020, 13, 494.
23. Mahmood, A.; Javaid, N.; Razzaq, S. A review of wireless communications for smart grid. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2015, 41, 248–260.
24. International Energy Agency. *Global EV Outlook 2023*. Paris: IEA, 2023.
25. ДСТУ EN 61851-1:2017. Системи провідного заряджання електромобілів. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2017.
26. Kempton W., Tomic J. Vehicle-to-grid power fundamentals // *Journal of Power Sources*. 2005. Vol. 144. P. 268–279.
27. Luo Y., et al. Integration of electric vehicles into power grid: A review // *Energy*. 2020. Vol. 195.
28. Закон України «Про охорону праці». – Київ, 2020.
29. Battery safety in electric vehicles // *Journal of Power Sources*.
30. Жидецький В.Ц. Основи охорони праці. – Львів: Афіша, 2018.
31. ДСТУ 12.0.003-74 «Небезпечні та шкідливі виробничі фактори. Класифікація»
32. ДНАОП 0.00-1.21-98. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів.
33. ДСТУ EN 61140:2019 Захист проти ураження електричним струмом.