

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА

НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ, ІНФОРМАЦІЙНОЇ
ТА ТРАНСПОРТНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

Кафедра електричного транспорту

**АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ V2G ДЛЯ ОЦІНКИ ВПЛИВУ
ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ НА ЕЛЕКТРИЧНУ МЕРЕЖУ ТА АКУМУЛЯТОРИ**

Бакалаврська кваліфікаційна робота

Здобувач:

Андрій КРУГЛОВ

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

« 19 » червня 2026 р.

ЗАВДАННЯ

до бакалаврської кваліфікаційної роботи

Круглову Андрію Павловичу

прізвище, ім'я, по батькові

1. Тема роботи: Аналіз технологій V2G для оцінки впливу електромобілів на електричну мережу та акумулятори

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 15.06.2026 р.

3. Вихідні дані до бакалаврської кваліфікаційної роботи *Матеріали переддипломної практики; технічні параметри електромобілів та їх акумуляторних батарей; режими роботи G2V і V2G; нормативні вимоги до якості електроенергії; науково-технічна література з питань інтеграції електромобілів у електричні мережі.*

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

1. Аналіз розвитку електромобілів та технологій V2G.

2. Оцінка впливу електромобілів на електричну мережу та акумулятори із застосуванням V2G.






3. Розрахунок енергетичного потенціалу електромобілів у режимі V2G.

4. Охорона праці.

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

Конфігурації електромобілів. Зарядні станції електромобілів. Структура системи V2G. Схеми систем V2G. Вплив V2G на енергосистему. Проблеми використання V2G. Підвищення ефективності систем V2G.


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)

Андрій КРУГЛОВ

(прізвище та ініціали)

Керівник бакалаврської кваліфікаційної роботи



(підпис)

Наталя ЛУКАШОВА

(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

У бакалаврській кваліфікаційній роботі розглянуто питання застосування технології Vehicle-to-Grid для оцінки впливу електромобілів на режими роботи електричних мереж та акумуляторні батареї транспортних засобів. Проаналізовано сучасний стан розвитку електромобілів, зарядної інфраструктури та принципи функціонування технології двонаправленого обміну енергією між електромобілем і мережею.

В роботі розглянуто можливі режими взаємодії електромобілів з електричною мережею, зокрема режими заряджання та віддачі енергії в мережу. Виконано оцінювання впливу електромобілів на параметри електричної мережі та визначено можливості використання їх акумуляторних батарей як розподілених накопичувачів енергії.

Проведено розрахунок енергетичного потенціалу електромобілів у режимі V2G для умовного парку транспортних засобів та визначено можливу потужність підтримки електричної мережі. Розглянуто вплив режимів заряджання та розряджання на ресурс акумуляторних батарей.

У розділі з охорони праці проаналізовано небезпечні та шкідливі фактори під час експлуатації електромобілів та запропоновано організаційно-технічні заходи забезпечення безпечних умов праці.

Ключові слова: електромобіль, акумуляторна батарея, електрична мережа, технологія Vehicle-to-Grid.

ЗМІСТ

	стор
ВСТУП.....	6
1 АНАЛІЗ РОЗВИТКУ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ ТА ТЕХНОЛОГІЙ V2G.....	7
1.1 Розвиток технологій електромобілів.....	7
1.2 Зарядні станції для електромобілів.....	11
1.3 Система V2G.....	14
2 ОЦІНКА ВПЛИВУ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ НА ЕЛЕКТРИЧНУ МЕРЕЖУ ТА АКУМУЛЯТОРИ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ V2G.....	20
2.1 Вплив V2G на енергосистему.....	20
2.2 Проблеми використання технології V2G.....	24
2.3 Запропоновані рішення для подолання проблем V2G.....	29
3 РОЗРАХУНОК ЕНЕРГЕТИЧНОГО ПОТЕНЦІАЛУ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ У РЕЖИМІ V2G.....	38
3.1 Вихідні дані для розрахунку.....	38
3.2 Розрахунок доступної енергії електромобілів у режимі V2G....	39
3.3 Розрахунок сумарної потужності системи V2G.....	39
3.4 Тривалість підтримки мережі.....	40
3.5 Вплив режиму V2G на ресурс акумуляторної батареї.....	40
4 ОХОРОНА ПРАЦІ.....	43
4.1 Вступ.....	43
4.2 Аналіз небезпечних та шкідливих факторів.....	43
4.3 Організаційно-технічні заходи забезпечення безпеки.....	46
4.4 Висновки по розділу.....	48
ВИСНОВКИ.....	49
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	50

ВСТУП

Активний розвиток електромобільного транспорту є одним із важливих напрямів модернізації транспортної та енергетичної інфраструктури. Збільшення кількості електромобілів призводить до зростання навантаження на електричні мережі та потребує впровадження нових підходів до організації процесів заряджання та керування енергоспоживанням.

Однією з перспективних технологій інтеграції електромобілів у енергосистему є Vehicle-to-Grid, яка передбачає двонаправлений обмін електроенергією між електромобілем і електричною мережею. У такому режимі акумуляторні батареї електромобілів можуть використовуватися не лише для забезпечення руху транспортного засобу, але й як розподілені накопичувачі енергії для підтримки роботи електричних мереж, зменшення пікових навантажень та підвищення гнучкості енергосистеми.

Разом з тим використання режимів заряджання та розряджання акумуляторних батарей у технології V2G пов'язане з додатковими циклами роботи акумуляторів, що може впливати на їх технічний стан, ефективність використання енергії та строк служби. Крім того, значна кількість підключених електромобілів може змінювати режими роботи електричних мереж, впливаючи на навантаження, втрати електроенергії та показники якості електроенергії.

Актуальність теми роботи обумовлена необхідністю оцінювання впливу електромобілів у режимі V2G на параметри електричної мережі та ресурс акумуляторних батарей.

Метою роботи є оцінка впливу електромобілів на електричну мережу та акумуляторні батареї із застосуванням технології V2G.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно вирішити такі завдання:

1. Провести аналіз розвитку електромобілів та технологій V2G.
2. Визначити вплив електромобілів на параметри електричної мережі та акумуляторні батареї із застосуванням технології V2G.
3. Розрахувати енергетичний потенціал електромобілів у режимі V2G.
4. Розробити організаційно-технічні заходи з охорони праці під час експлуатації та обслуговуванні електромобілів.

1 АНАЛІЗ РОЗВИТКУ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ ТА ТЕХНОЛОГІЙ V2G

1.1 Розвиток технологій електромобілів

Електромобілі є транспортними засобами, у яких для створення тягового зусилля використовується електрична енергія та електродвигуни, що передають крутний момент на колеса автомобіля. Основними елементами конструкції електромобіля є електродвигун, трансмісія, редуктор, система акумуляторного накопичення енергії, бортовий зарядний пристрій, а також блок керування енергетичними потоками. Структура основних компонентів електромобіля наведена на рисунку 1.1.

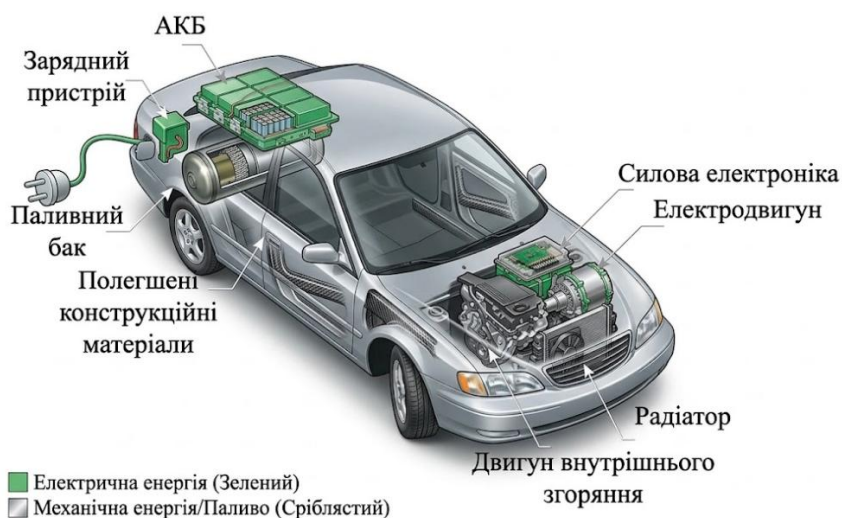


Рисунок 1.1 – Основні компоненти електромобіля

Електрична енергія від мережі змінного струму надходить до бортового зарядного пристрою, де перетворюється на постійний струм і використовується для заряджання акумуляторної батареї транспортного засобу [1]. Під час руху електроенергія від акумулятора у вигляді постійного струму через інвертор перетворюється на змінний струм, який подається до електродвигуна. Керування частотою та параметрами напруги інвертора здійснюється контролером, що дозволяє регулювати швидкість обертання двигуна і, відповідно, швидкість руху транспортного засобу.

Під час гальмування або руху на спуску застосовується режим рекуперативного гальмування, за якого електродвигун переходить у генераторний режим. У цьому випадку механічна енергія руху перетворюється на електричну, що повертається до акумуляторної батареї, підвищуючи загальну енергоефективність транспортного засобу. Інтенсивність рекуперації може регулюватися водієм за допомогою підрульових перемикачів.

У транспортних засобах із двигунами постійного струму інвертор не застосовується. Натомість використовується перетворювач постійної напруги, який знижує високу напругу тягового акумулятора до рівня приблизно 12 В для живлення допоміжних електронних систем автомобіля. Загальне керування роботою силової установки, потоками потужності, навантаженнями та процесами рекуперації здійснюється блоком керування транспортним засобом.

Одним із ключових елементів електромобіля є система накопичення енергії на основі акумуляторної батареї. Підвищення питомої енергоемності акумуляторів дозволяє збільшити запас ходу транспортного засобу, підвищити енергоефективність та зменшити масу і габарити системи зберігання енергії. Однак термін служби акумуляторів значною мірою залежить від режимів їх заряджання та розряджання.

Зменшення енергетичної щільності акумулятора призводить до погіршення динамічних характеристик транспортного засобу, зокрема зниження прискорення, а також може вимагати заміни батареї або її подальшого використання у вторинних енергетичних системах.

На ефективність роботи акумуляторів також суттєво впливають температурні умови. За температур нижчих за оптимальний робочий діапазон зменшується доступна ємність батареї та обмежується швидкість заряджання. Для усунення цієї проблеми у сучасних електромобілях застосовуються системи підігріву батарей. Контроль стану акумуляторних елементів здійснює система керування акумулятором, яка контролює рівень заряду окремих елементів та забезпечує їх балансування за допомогою відповідних керувальних механізмів [2].

Оскільки швидкість обертання електродвигуна значно перевищує допустиму швидкість обертання коліс, у конструкції електромобіля використовується редуктор. Він забезпечує зниження частоти обертання та одночасне збільшення крутного моменту, що передається на колеса транспортного засобу [3].

Залежно від архітектури силової установки електромобілі можна поділити на кілька основних типів, що показано на рисунку 1.2. Найпоширеніші варіанти внутрішньої конфігурації електромобілів наведені на рисунку 1.3.



Рисунок 1.2 – Типи електромобілів залежно від архітектури конструкції

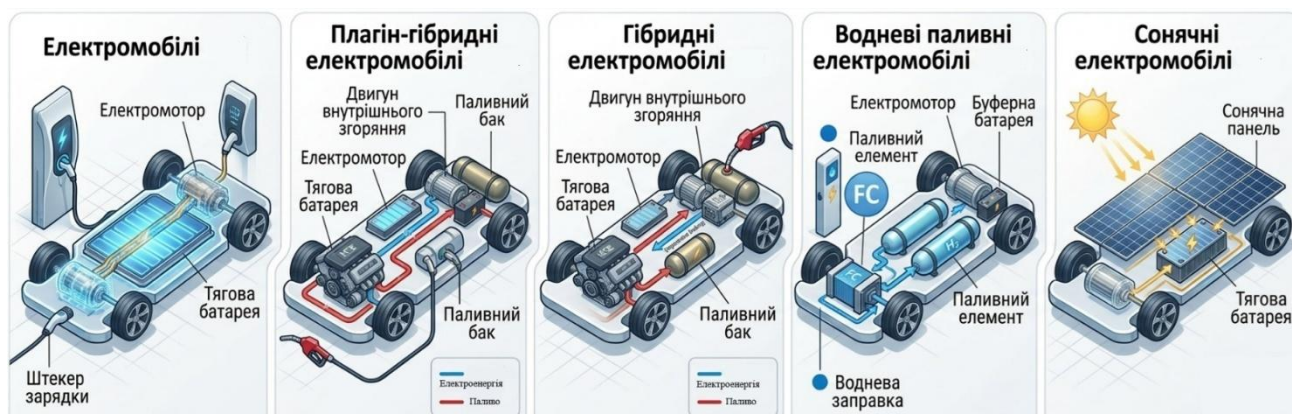


Рисунок 1.3 – Внутрішня конфігурація п'яти переважно використовуваних архітектур електромобілів

До основних типів належать:

Електромобілі на акумуляторах. Використовують лише електричний привід без двигуна внутрішнього згорання. Основними елементами є електродвигун, акумуляторна батарея та трансмісія. Зарядження батареї здійснюється від зовнішньої електромережі через зарядну станцію. Енергія акумулятора через інвертор перетворюється на змінну напругу для живлення електродвигуна. Додаткове підзарядження відбувається під час рекуперативного гальмування.

Гібридні електромобілі. Поєднують двигун внутрішнього згорання та електродвигун. Крутний момент на колеса може передаватися від обох приводів. Зарядження акумулятора відбувається за рахунок роботи двигуна внутрішнього згорання або рекуперативного гальмування, підключення до електромережі не передбачене.

Гібридні електромобілі з можливістю зарядження від мережі. Поєднують електричний і традиційний привід. На відміну від гібридних електромобілів, акумулятор може заряджатися від зовнішньої електромережі. Автомобіль може рухатися у повністю електричному режимі, після розрядження батареї активується двигун внутрішнього згорання. Ємність батареї становить близько 14 кВт·год, а запас ходу на електротязі – 40-60 км [4].

Електромобілі на паливних елементах. Електроенергія виробляється на борту за допомогою водневих паливних елементів. Водень зберігається у спеціальних баках і під час електрохімічної реакції генерує електричну енергію. ККД таких систем може досягати 40–80 %. Розвиток електромобілів на паливних елементах обмежується недостатньою кількістю водневих заправних станцій [4].

Сонячні електромобілі. Оснащуються фотоелектричними панелями, розміщеними на кузові або даху автомобіля. Вони забезпечують додаткове зарядження акумуляторної батареї та живлення електродвигуна і допоміжних систем.

Електромобілі також можна класифікувати за рівнем електрифікації силової установки. На рисунку 1.4 показано співвідношення між потужністю

тягового двигуна, рівнем електрифікації (від 0 % для традиційних автомобілів до 100 % для повністю електричних) та підвищенням паливної ефективності різних типів транспортних засобів [5].

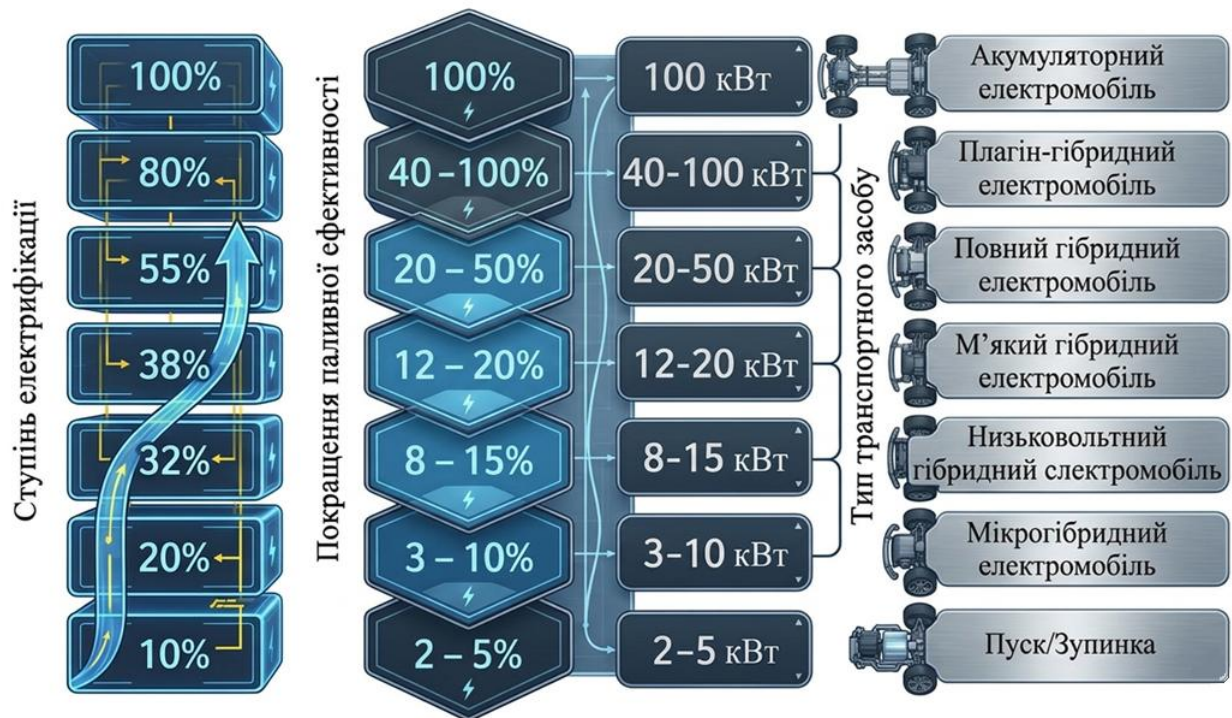


Рисунок 1.4 – Ступінь електрифікації, потужність тягового двигуна та покращення паливної ефективності поширених типів електромобілів

Окремим різновидом є електромобілі з подовженим запасом ходу, у яких основним джерелом енергії є акумуляторна батарея великої ємності, а невеликий двигун-генератор використовується для її підзарядження під час руху. Така система дозволяє збільшити запас ходу приблизно на 100 км при використанні близько двох літрів палива.

1.2 Зарядні станції для електромобілів

Зарядні станції для електромобілів є одним із ключових елементів інфраструктури, необхідної для широкого впровадження електромобільного транспорту.

Процес заряджання електромобіля зазвичай здійснюється шляхом підключення зарядного кабелю до роз'єму транспортного засобу. Один кінець кабелю під'єднується до зарядної станції або електричної розетки, а інший – до зарядного входу електромобіля, через який здійснюється заряджання акумуляторної батареї.

Залежно від призначення та умов використання зарядні станції для електромобілів поділяються на кілька основних категорій:

- *Домашні зарядні станції.* Використовуються для заряджання електромобілів у житлових будинках. Найчастіше заряджання відбувається в нічний час, коли автомобіль знаходиться на парковці або в гаражі та підключається до стандартної електричної розетки.

- *Комерційні зарядні станції.* Розміщуються на парковках, біля торгових центрів, офісних будівель та в інших громадських місцях. Вони призначені для заряджання транспортних засобів під час їх стоянки.

- *Станції швидкого заряджання.* Такі станції мають потужність понад 40 кВт і здатні забезпечити запас ходу приблизно 100 км за 10–30 хвилин заряджання. Вони особливо актуальні для електромобілів із високими показниками продуктивності.

- *Зарядні станції для транспортних засобів із нульовими викидами.* Такі системи можуть забезпечувати заряджання приблизно 15 хвилин, що дозволяє автомобілю подолати до 320 км.

У світі розроблено кілька стандартів, що регламентують параметри заряджання електромобілів, зокрема рівні потужності та режими передачі енергії. До них належать:

- північноамериканський стандарт SAE-K17 [6];
- китайський стандарт GB/T 20234 [7];
- міжнародний стандарт IEC 62196 [8], який широко застосовується в країнах Європи та Китаю.

Останнім часом значну увагу привертають бездротові зарядні системи для електромобілів, які забезпечують підвищений рівень безпеки та зручності порівняно з традиційними кабельними системами.

У бездротових зарядних станціях передача енергії здійснюється за принципом електромагнітної індукції, аналогічно роботі трансформатора. Проте, на відміну від звичайних силових трансформаторів, у таких системах частоти на первинній та вторинній сторонах можуть відрізнятись. Напруга мережі з частотою 50 Гц перетворюється у високочастотний сигнал, який подається на передавальну котушку. У результаті формується електромагнітне поле, що індукує напругу в приймальній котушці, розташованій на транспортному засобі, після чого енергія використовується для заряджання акумулятора [17].

Найефективніша передача енергії досягається на резонансній частоті системи, тому для стабільної роботи використовуються спеціальні компенсаційні схеми на передавальній і приймальній сторонах.

Схематичне зображення дротових та бездротових методів заряджання електромобілів наведено на рисунку 1.5.



Рисунок 1.5 – Схематичне зображення дротового та бездротового способів заряджання

У статичних бездротових зарядних системах автомобіль залишається нерухомим під час заряджання. Передавальна котушка розташовується під поверхнею дороги або парковки, тоді як приймальна котушка встановлюється на нижній частині транспортного засобу.

У динамічних бездротових системах заряджання може відбуватися безпосередньо під час руху транспортного засобу. Такий підхід дозволяє зменшити необхідну ємність акумулятора, оскільки батарея може поповнювати заряд у процесі руху.

Залежно від принципу роботи бездротові зарядні системи поділяються на:

- індуктивні бездротові зарядні системи;
- ємнісні бездротові системи;
- системи на основі постійних магнітів і механічних передач;
- резонансні індуктивні системи.

1.3 Система V2G

Подальший розвиток електромобільних технологій тісно пов'язаний із розвитком інтелектуальних енергетичних систем, цифрових технологій керування та засобів комунікації. Поява концепцій Smart Grid та мікромереж сприяла формуванню нових підходів до інтеграції електромобілів в енергосистему, одним із яких є технологія Vehicle-to-Grid.

Технологія V2G передбачає можливість двостороннього обміну електричною енергією між електромобілем та електричною мережею. Для реалізації цієї концепції застосовуються сучасні системи керування, комунікаційні протоколи та алгоритми координації роботи електромобілів у мережі. У науковій літературі поряд із V2G також розглядаються інші схеми взаємодії електромобіля з енергетичною інфраструктурою, зокрема:

- Vehicle-to-Home (V2H) – живлення будинку від електромобіля;
- Vehicle-to-Vehicle (V2V) – обмін енергією між транспортними засобами;

- Vehicle-to-Grid (V2G) – передача енергії між електромобілем та електромережею [9].

Типову структуру системи V2G показано на рисунку 1.6. У рамках цієї технології електромобіль може виступати не лише споживачем електроенергії, але й її джерелом. За потреби електроенергія з акумулятора транспортного засобу може передаватися до електричної мережі, що сприяє підвищенню гнучкості енергосистеми, покращенню стабільності роботи та ефективнішому використанню енергетичних ресурсів.

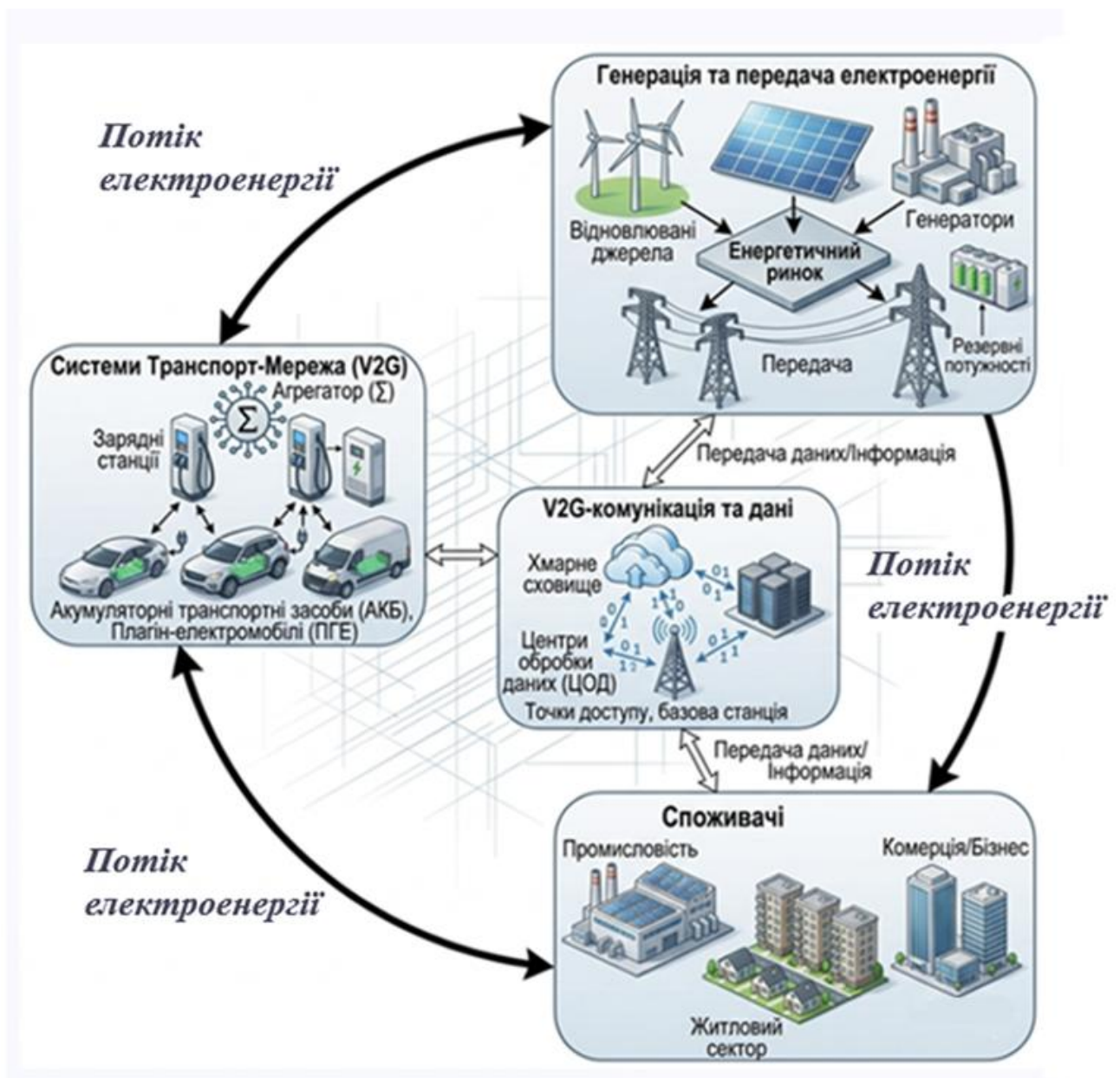


Рисунок 1.6 – Типова структура системи V2G

Особливо актуальним використання технології V2G є для країн, де значна частина електроенергії виробляється з викопного палива. У таких умовах застосування електромобілів та їх інтеграція в енергосистему можуть сприяти зменшенню екологічного навантаження та оптимізації використання енергетичних ресурсів.

Дослідження показують, що протягом доби автомобіль перебуває в русі лише близько 5 % часу [10]. У решту часу транспортний засіб знаходиться на парковці або в гаражі, де може бути підключений до електромережі. У такому режимі електромобіль може виконувати функцію розподіленого джерела енергії для живлення будівель або підтримки роботи енергосистеми.

Зокрема, технологія V2G може забезпечувати:

- підтримку реактивної потужності;
- регулювання активної потужності;
- балансування навантаження;
- інтеграцію відновлюваних джерел енергії;
- компенсацію гармонічних спотворень струму.

Крім цього, електромобілі можуть надавати допоміжні послуги енергосистемі, зокрема регулювання напруги, підтримання частоти мережі та забезпечення резерву потужності [11].

Для реалізації технології V2G транспортний засіб повинен мати три основні функціональні компоненти:

1. джерело електричної енергії;
2. систему зв'язку для обміну інформацією з енергомережою;
3. систему точного вимірювання для контролю потоків потужності.

У системах V2G потоки електроенергії між мережею та електромобілем контролюються та регулюються з метою підвищення економічної ефективності, оптимізації роботи енергосистеми та зменшення викидів парникових газів [23].

Залежно від напрямку передачі енергії розрізняють односпрямований та двонаправлений режими роботи V2G.

У односпрямованому режимі енергія передається лише від електромережі до електромобіля. Для реалізації такого режиму достатньо простого зарядного контролера, який забезпечує заряджання акумулятора. Схема такого підходу наведена на рисунку 1.7.



Рисунок 1.7 – Схема односпрямованого та двонаправленого потоку потужності в технології V2G з номінальною потужністю зарядного пристрою

У цьому режимі парк електромобілів може використовуватися для підвищення резерву потужності енергосистеми, а також для часткового регулювання параметрів мережі, зокрема напруги та частоти.

Попри простоту реалізації, односпрямований режим має обмежені можливості щодо надання допоміжних послуг енергосистемі.

У двонаправленому режимі V2G електроенергія може передаватися як від мережі до електромобіля, так і у зворотному напрямку. Це дозволяє використовувати акумулятори електромобілів для зменшення пікових навантажень, регулювання напруги та компенсації змін у генерації відновлюваних джерел енергії.

Реалізація такого режиму потребує складнішої силової електроніки, зокрема додаткових перетворювачів AC/DC та DC/DC, що забезпечують керування потоками енергії (рисунок 1.8). Перетворювач AC/DC працює в обох

напрямках під час процесів заряджання та розряджання, тоді як перетворювач DC/DC забезпечує регулювання струму та напруги акумулятора.

Застосування двонаправлених систем дозволяє ефективніше інтегрувати відновлювані джерела енергії в енергосистему. У разі нестабільної генерації від сонячних або вітрових електростанцій акумулятори електромобілів можуть виконувати роль буферного накопичувача енергії.

Разом з тим часті цикли заряджання та розряджання можуть скорочувати термін служби акумуляторних батарей, а також потребують більш складних алгоритмів керування [12].

Загалом технологія V2G може суттєво вплинути на функціонування сучасних енергетичних систем. Електромобілі підключаються до мережі через домашні або комерційні зарядні станції, де можуть використовуватися різні режими заряджання. У житловому секторі найчастіше застосовується повільне заряджання (рівні 1 і 2), тоді як у громадських мережах широко використовується швидке заряджання (рівень 3) або заряджання постійним струмом.

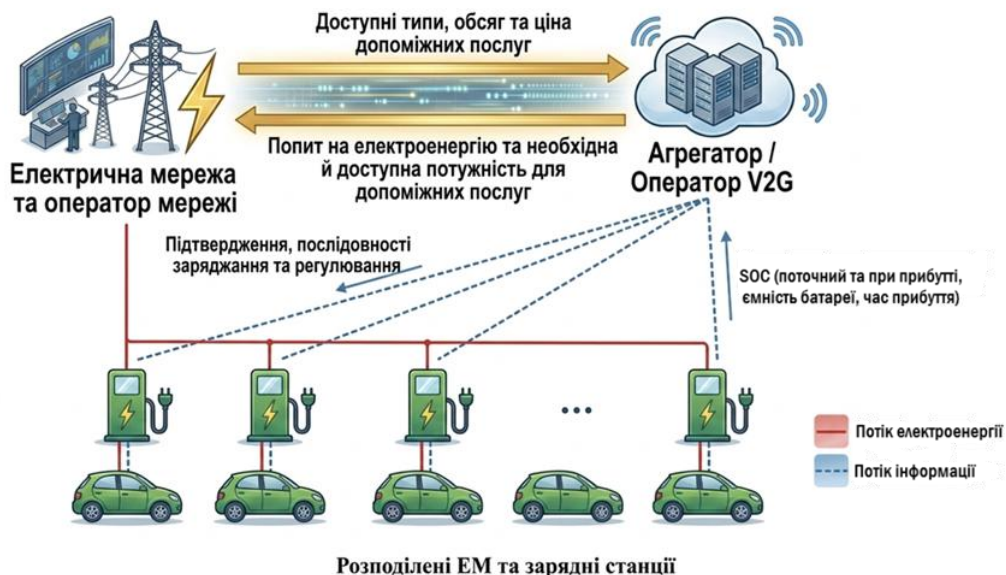


Рисунок 1.8 – Компоненти та потік потужності системи V2G

Важливим аспектом застосування технології V2G є аналіз режимів заряджання та розряджання акумуляторних батарей, а також оцінка їх ресурсу.

Висновки до розділу

У розділі проведено аналіз сучасного розвитку електромобільного транспорту та основних технологічних рішень, що використовуються для його інтеграції в енергетичні системи. Розглянуто конструктивні особливості електромобілів та їх основні енергетичні компоненти, зокрема електродвигун, акумуляторні батареї та бортові зарядні пристрої.

Проаналізовано розвиток зарядної інфраструктури електромобілів, типи зарядних станцій та стандарти, що регламентують режими та параметри заряджання. Показано, що розвиток швидких та інтелектуальних зарядних систем є важливим фактором розширення використання електромобілів.

Особливу увагу приділено технології двонаправленого енергетичного обміну V2G, яка забезпечує можливість взаємодії електромобіля з електричною мережею. Встановлено, що застосування V2G дозволяє використовувати електромобілі не лише як споживачів електроенергії, але й як розподілені накопичувачі енергії, здатні брати участь у регулюванні режимів роботи енергосистеми.

Таким чином, результати проведеного аналізу підтверджують перспективність застосування технологій V2G та необхідність дослідження впливу електромобілів на електричні мережі та акумуляторні батареї.

2 ОЦІНКА ВПЛИВУ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ НА ЕЛЕКТРИЧНУ МЕРЕЖУ ТА АКУМУЛЯТОРИ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ V2G

2.1 Вплив V2G на енергосистему

Покращене управління енергоспоживанням

Однією з ключових переваг застосування технології V2G є можливість керування процесами заряджання та розряджання електромобілів відповідно до оптимального графіка. У періоди низького навантаження, коли виробництво електроенергії перевищує споживання, електромобілі можуть заряджатися від мережі, використовуючи надлишкову електроенергію. У свою чергу, під час пікових навантажень накопичена в акумуляторах енергія може передаватися назад до електричної мережі за допомогою відповідних силових перетворювачів та алгоритмів керування.

Такий підхід дозволяє частково компенсувати пікові навантаження та зменшити необхідність використання дорогих резервних генеруючих потужностей. Крім того, організація заряджання електромобілів у періоди мінімального споживання сприяє вирівнюванню графіка навантаження енергосистеми та зменшує витрати на виробництво електроенергії [13].

Технологія V2G забезпечує широкі можливості керування навантаженням енергосистеми, включаючи такі функції, як:

- переміщення навантаження у часі;
- гнучке керування споживанням;
- заповнення провалів навантаження;
- обмеження пікових навантажень;
- акумулявання енергії;
- поступове нарощування навантаження.

Перспективний вплив технології V2G на зниження пікових навантажень показано на рисунку 2.1.

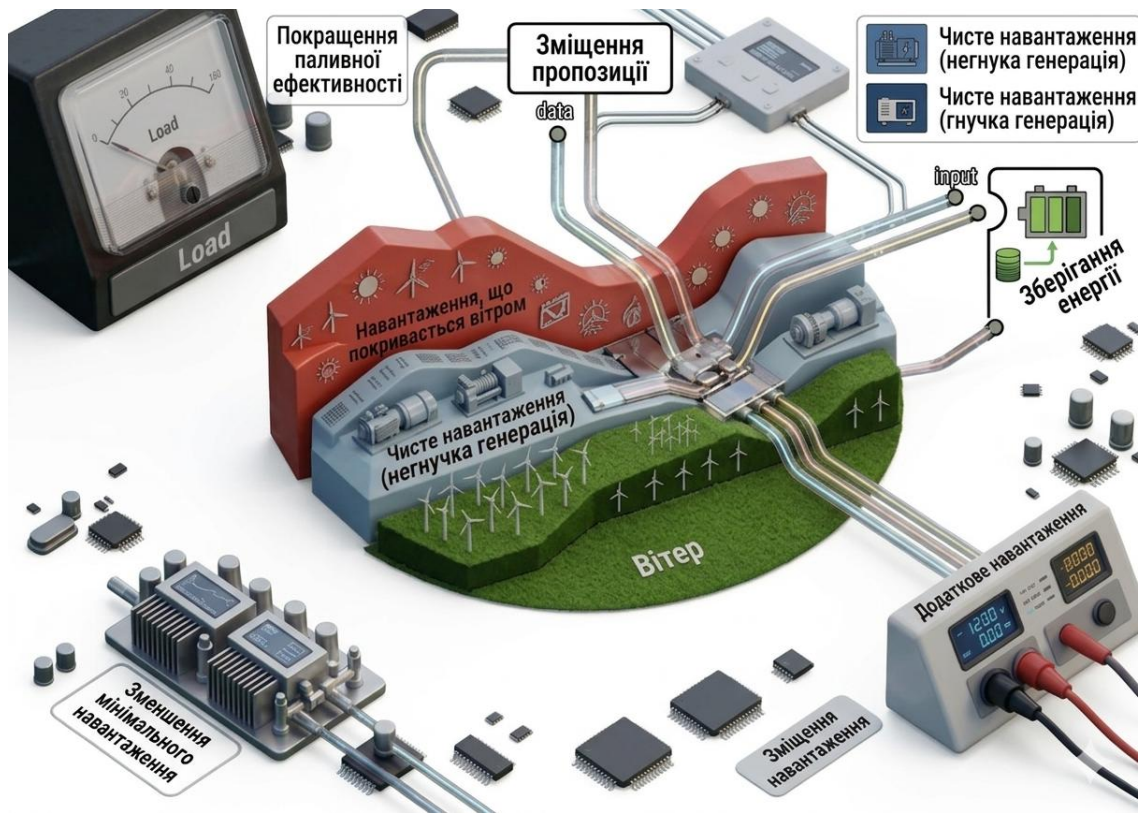


Рисунок 2.1 – Технологія «від транспортного засобу до мережі»

Дослідження, представлені в [14], демонструють, що стратегічне використання акумуляторів електромобілів у системах V2G, разом із застосуванням динамічних алгоритмів керування, дозволяє зменшити пікове споживання електроенергії приблизно на 37 %. Такий підхід частково замінює використання окремих систем накопичення енергії та робить управління енергоспоживанням більш економічно ефективним.

Коли попит на електроенергію зростає, додаткову потужність можна забезпечити за рахунок інтеграції груп електромобілів, які знаходяться у режимі очікування. Це дозволяє покращити керування потоками потужності в енергосистемі. Використання двонаправлених перетворювачів AC/DC та DC/DC із загальною ланкою постійного струму дає можливість інтегрувати електромобілі до структури мікромереж. У таких випадках часто застосовуються координовані стратегії керування невеликими групами електромобілів, наприклад на парковках [15].

Крім того, технологія V2G може сприяти розвитку мікромереж на основі відновлюваних джерел енергії. У роботі [16] розглянуто малу мікромережу, що включає парковку електромобілів, фотоелектричні панелі та змінні навантаження, підключені через точку спільного приєднання. Використання методів динамічного програмування дозволило підвищити ефективність роботи систем керування електромобілями та систем управління енергією для прогнозування та оптимізації режимів V2G та G2V.

Застосування економічно орієнтованої оптимізаційної моделі для гібридної енергосистеми, яка включає фотоелектричні установки, вітрові турбіни, водневі паливні елементи, системи накопичення енергії, парк електромобілів та розподілену генерацію, дозволяє знизити загальні витрати на енергопостачання приблизно на 39 %.

Покращення якості електроенергії

Застосування технології V2G відкриває нові можливості для покращення якості електроенергії в сучасних енергетичних системах, особливо в умовах використання мікромереж та розподілених відновлюваних джерел енергії. Відомо, що робота таких джерел характеризується нестабільністю генерації, що може призводити до появи гармонічних спотворень, коливань напруги та інших порушень якості електроенергії.

Окрім цього, змінний характер потоків реактивної потужності може спричинити дисбаланс напруги та ефект мерехтіння. Для вирішення цих проблем можуть застосовуватися відповідні алгоритми керування електромобілями, які дозволяють використовувати бортові силові перетворювачі як пристрої компенсації. Зокрема, зарядні пристрої електромобілів можуть виконувати функції STATCOM або активних фільтрів потужності [17].

Завдяки правильному керуванню такими системами можна значною мірою зменшити негативний вплив відновлюваних джерел енергії на параметри електричної мережі.

Крім того, у разі інтеграції електромобілів до локальної побутової мережі двонаправлений зарядний пристрій може виконувати функцію активного фільтра, що сприяє підтриманню стабільної якості електроенергії.

Регулювання частоти живлення, введення реактивної потужності та напруги системи

Ще однією важливою перевагою інтеграції електромобілів у мережу є їх здатність швидко реагувати на зміни параметрів електроенергії. Завдяки технології V2G електромобілі можуть використовуватися для регулювання частоти та напруги в енергосистемі.

Зокрема, електромобілі здатні компенсувати відхилення частоти та напруги від встановлених значень шляхом оперативної зміни режиму заряджання або розряджання. Енергія, накопичена в акумуляторних батареях транспортних засобів, може використовуватися для підтримання необхідного рівня напруги та регулювання потоків реактивної потужності у двох напрямках.

Крім того, електромобілі можуть поглинати надлишкову потужність або, навпаки, забезпечувати додаткову генерацію, що особливо важливо для ізольованих або автономних енергосистем.

Підтримка відновлюваних джерел енергії

Акумуляторні системи електромобілів можуть відігравати важливу роль у підтримці роботи відновлюваних джерел енергії. Завдяки можливості накопичення електроенергії вони можуть виконувати функцію буферного накопичувача для джерел із нестабільною генерацією.

У випадках, коли генерація відновлюваних джерел зменшується через погодні умови, енергія з акумуляторів електромобілів може використовуватися для компенсації дефіциту потужності та забезпечення необхідного рівня навантаження.

З технічної точки зору для отримання постійної напруги з акумуляторної батареї електромобіля використовується підвищувальний DC/DC перетворювач, який подає напругу на інверторний каскад H-моста. Далі за допомогою алгоритмів керування на основі пропорційно-резонансних регуляторів формується необхідна вихідна напруга та частота [18].

Додатково може використовуватися понижувальний перетворювач для формування стабільної напруги постійного струму 5 В, яка необхідна для роботи допоміжних електронних систем транспортного засобу.

У структурі мікромереж точки підключення відновлюваних джерел енергії можуть бути інтегровані з парковками електромобілів, де реалізується двонаправлений обмін енергією. Це дозволяє більш ефективно розподіляти навантаження та підвищувати стабільність роботи енергосистеми.

Подібно до інших розподілених джерел енергії, передача електроенергії від електромобілів до мережі може бути описана за допомогою залежності вартості енергії від рівня використання технології V2G.

2.2 Проблеми використання технології V2G

2.2.1 Навантаження на електричну мережу

Підключення значної кількості електромобілів до електричної мережі є базовою ідеєю технології V2G. Зазвичай застосовується тарифікація за часом доби, яка передбачає поділ на пікові та позапікові періоди. У ранкові та вечірні години попит на електроенергію є максимальним, тому в цей час доцільно використовувати режим V2G, тоді як у періоди низького навантаження доцільним є заряджання електромобілів у режимі G2V [19].

Однак у разі відсутності належного планування масове підключення електромобілів може створювати значне навантаження на електричну мережу. Некоординована інтеграція великої кількості транспортних засобів здатна змінювати основні електричні параметри системи, зокрема викликати падіння

напруги, збільшення струмів у лініях, підвищення втрат електроенергії та появу гармонічних спотворень. Рівень такого впливу залежить від кількості електромобілів, їх потужності, режимів заряджання та розряджання, а також часу підключення до мережі.

Передача енергії від акумуляторів електромобілів до розподільчої мережі повинна здійснюватися лише за потреби та у контрольованому обсязі. Різке зростання напруги або потужності може негативно впливати на роботу захисних пристроїв мережі та підключених споживачів. Крім того, використання акумуляторів електромобілів у позапікові періоди може створювати додаткові труднощі для розподільчої мережі, оскільки її інфраструктура часто не розрахована на покриття навантаження, яке становить 20–30 % від загального попиту електромобілів.

У системах V2G також можливі аварійні ситуації. Наприклад, у разі відмови центральної станції управління значна частина навантаження може бути перенесена на парк електромобілів, що призведе до різкого збільшення попиту на електроенергію через зарядні роз'єми [20]. За відсутності належних механізмів захисту це може призвести до пошкодження або навіть руйнування акумуляторів електромобілів.

Ще однією проблемою є можливість утворення так званих енергетичних петель між електромобілями, коли енергія від акумулятора одного транспортного засобу використовується для заряджання іншого. Така ситуація є економічно неефективною та знижує загальну ефективність системи V2G [20]. З огляду на те, що стандартний час заряджання електромобілів може становити близько 12 годин, неправильна координація підключення транспортних засобів до мережі може значно зменшити переваги технології V2G.

У двонаправлених системах V2G кількість електромобілів, які можуть одночасно брати участь у розряджанні, також обмежена. Дослідження показують, що в режимі віддачі енергії до мережі зазвичай може бути задіяно близько 10 % електромобілів, тоді як у режимі інтелектуального заряджання можливе підключення до 40 % транспортних засобів [21].

Крім того, використання різних алгоритмів заряджання та розряджання може призводити до нерівномірного розподілу напруги між електромобілями. Оскільки електромобілі мають значно більший вплив на енергосистему порівняно з традиційними навантаженнями, така нерівномірність може спричинити дисбаланс напруги, зниження резервів потужності, погіршення надійності системи та нестабільність режимів роботи мережі [40]. Тому для забезпечення стабільної роботи системи необхідно використовувати контрольовані режими розряджання.

2.2.2 Зростання гармонічних спотворень у мережі

Хоча координоване підключення електромобілів може сприяти стабілізації енергосистеми, його нерегулярне або неконтрольоване використання може призвести до протилежного ефекту. Більшість електромобілів підключаються до мережі через однофазні зарядні пристрої, що створює додаткове навантаження на окремі фази трифазної системи.

У разі значного навантаження на одну фазу виникає дисбаланс між фазами, що може спричинити провали напруги, коливання струму та інші порушення параметрів електроенергії. Додатково гармонічні спотворення можуть виникати через роботу силових перетворювачів зарядних пристроїв електромобілів.

Гармоніки, що генеруються каскадами силової електроніки, здатні проникати в електромережу та впливати на стабільність частоти. Дослідження показали, що максимальний коефіцієнт гармонічних спотворень, створений контролером заряджання електромобіля, може досягати приблизно 0,37 % у літній період [22].

Крім того, одночасне підключення або відключення великої кількості електромобілів може спричинити різкі зміни напруги. Такі коливання не завжди можуть бути оперативно компенсовані системами керування мережі, що створює додаткові ризики для її стабільності.

Також необхідно контролювати обсяг енергії, яка подається до мережі в режимі V2G. Надлишкова потужність може призвести до перевантаження трансформаторів, ліній електропередачі та захисного обладнання енергосистеми.

2.2.3 Скорочення терміну служби акумуляторів

Незважаючи на значні переваги технології V2G, її використання пов'язане з додатковим навантаженням на акумуляторні системи електромобілів. Більшість допоміжних функцій, які може забезпечувати V2G (регулювання частоти, згладжування пікового навантаження, резервні потужності та підтримка розподілених енергетичних ресурсів), безпосередньо залежать від стану та довговічності акумуляторів транспортних засобів.

У системах V2G процеси заряджання та розряджання можуть змінюватися досить швидко, оскільки рівень навантаження в енергосистемі постійно коливається. Через це акумуляторні батареї змушені частіше працювати у циклічному режимі. Інтенсивне перемикання між режимами заряджання та розряджання прискорює деградацію акумуляторів, що може призводити до зменшення їх ресурсу та зниження економічної ефективності використання електромобілів.

Крім того, утилізація зношених акумуляторів та управління батареями з низькою ємністю створюють додаткові економічні витрати. Акумулятор електромобіля відіграє ключову роль у забезпеченні роботи силового приводу, тому його стан повинен постійно контролюватися системами управління.

Для забезпечення ефективної роботи зарядні пристрої повинні використовувати складні алгоритми керування, які оптимізують режими заряджання та розряджання. Однак реалізація таких алгоритмів у випадку великої кількості електромобілів, що підключаються до мережі у випадковий момент часу, є досить складним завданням.

2.2.4 Система зв'язку та кібербезпека

Технологія V2G потребує високоефективної системи обміну даними між електромобілями, зарядною інфраструктурою та енергетичною мережею. На відміну від традиційних систем зв'язку, у V2G необхідно враховувати динамічні параметри транспортних засобів, такі як швидкість, місцезнаходження та режим роботи в реальному часі.

Процес взаємодії між електромобілем та мережею передбачає обмін великою кількістю інформації: дані про заряджання та розряджання, стан акумулятора, параметри електромережі та команди управління. Тому система зв'язку повинна бути швидкою, надійною та захищеною від несанкціонованого доступу.

Сучасні дослідження розглядають використання кіберфізичних систем, які поєднують фізичну інфраструктуру електромережі з цифровими технологіями керування. Такі системи можуть виконувати три основні функції:

- застосування блокчейн-технологій для безпечних енергетичних транзакцій [23];
- використання штучного інтелекту для оптимізації графіків заряджання та розряджання електромобілів [24];
- застосування Інтернету речей (IoT) для обміну даними між транспортними засобами, зарядними станціями та користувачами [25].

Усі ці технології потребують швидкого обміну даними та працюють із конфіденційною інформацією, що створює додаткові вимоги до захисту інформаційних систем [26].

Для забезпечення безпечного обміну даними використовуються криптографічні протоколи, зокрема протокол TLS із автентифікацією серверів відповідно до стандарту IEC 15118-2. Однак одностороння автентифікація не завжди забезпечує достатній рівень безпеки, оскільки існує ризик атак підміни або перенаправлення даних. У зв'язку з цим дедалі частіше застосовується взаємна автентифікація, яка перевіряє як сервер, так і транспортний засіб.

Ще однією проблемою є кіберзагрози. Інфраструктура V2G може бути вразливою до шкідливого програмного забезпечення, яке здатне порушувати роботу енергосистеми. Наприклад, зловмисники можуть змінювати профіль навантаження або перехоплювати сигнали керування потоками потужності.

Оскільки електромобілі постійно переміщуються та підключаються до різних зарядних станцій, вони можуть стати каналом поширення комп'ютерних вірусів або інших кіберзагроз. У разі масштабної атаки це може призвести до серйозних наслідків, зокрема до відключення електроенергії або порушення роботи енергетичних компаній.

2.3 Запропоновані рішення для подолання проблем V2G

2.3.1 Оптимальний розподіл навантаження в електромережі

Для мінімізації негативного впливу електромобілів на електромережу необхідно впроваджувати системи керування, які координують процеси заряджання та розряджання. Неконтрольоване підключення великої кількості електромобілів може погіршувати якість електроенергії, впливаючи на активну та реактивну потужність, коефіцієнт потужності та гармонічний склад струму.

Одним із рішень є використання інтелектуальних систем вимірювання та управління, які дозволяють збирати дані про навантаження мережі в режимі реального часу. Це дає можливість планувати роботу парку електромобілів з урахуванням поточного стану енергосистеми.

У дослідженні [27] запропоновано застосування тарифної системи Time-of-Use (TOU), яка стимулює заряджання електромобілів у позапікові періоди. Такий підхід дозволяє зменшити навантаження на енергосистему та підвищити ефективність її роботи.

Важливу роль відіграє також прогнозування навантаження. Сучасні методи прогнозування на основі нейронних мереж LSTM дозволяють зменшити

пікове навантаження приблизно на 30 %, що значно покращує стабільність енергосистеми [28].

У системах V2G можуть використовуватися два основні підходи до керування:

1. Централізоване керування. У цьому випадку спеціальний оператор-агрегатор збирає інформацію від усіх підключених електромобілів та формує оптимальний графік заряджання і розряджання. Агрегатор визначає обсяг потужності, який повинен бути переданий до мережі або отриманий від неї, а також встановлює тарифи на електроенергію.

2. Децентралізоване керування. У цьому підході кожен електромобіль або локальна група транспортних засобів приймає рішення про режим роботи на основі локальної інформації та сигналів від енергосистеми. Така схема дозволяє розглядати парк електромобілів як розподілений енергетичний ресурс, подібний до відновлюваних джерел енергії.

На рисунку 2.2 показано структуру системи управління, яка забезпечує ефективну інтеграцію електромобілів в енергосистему та координацію потоків енергії між транспортними засобами та мережею.

Крім того, для оптимізації режимів роботи можуть застосовуватися математичні методи, зокрема лінійне програмування зі змішаними цілими змінними або алгоритми пошуку піків та спадів навантаження.

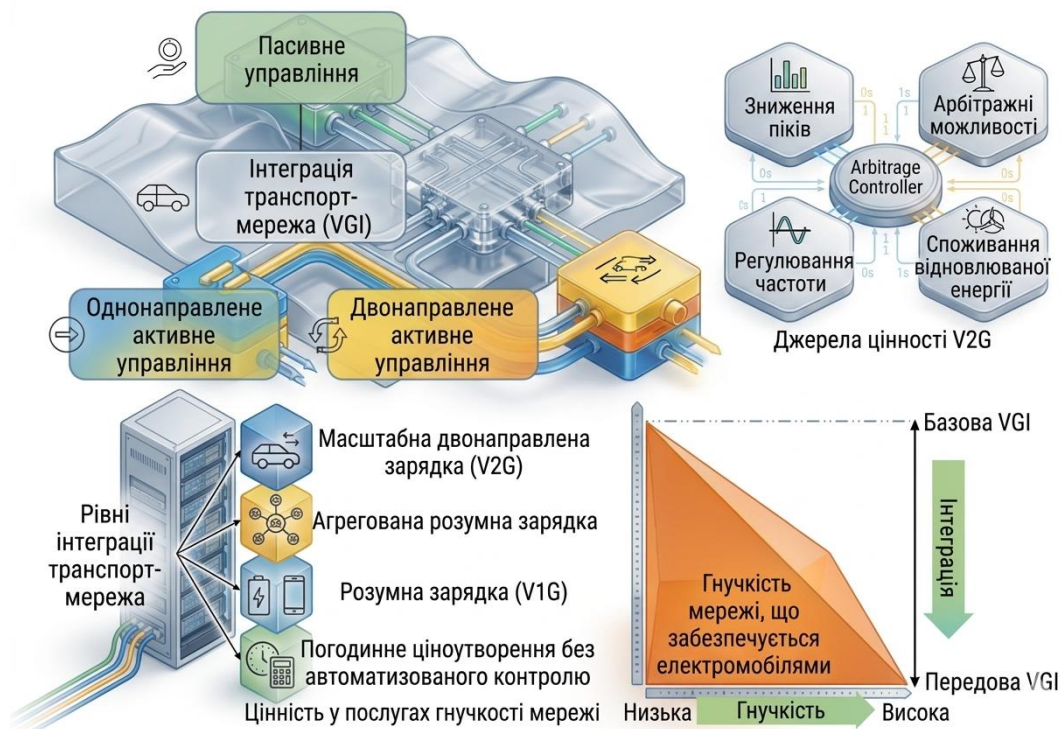


Рисунок 2.2 – Структура для ефективного управління схемою «транспортний засіб-мережа» та її безперебійної інтеграції

2.3.2 Збереження системних гармонік

Однією з важливих технічних проблем при впровадженні технологій електромобілів та концепції V2G є виникнення гармонічних спотворень, що формуються в силових перетворювачах зарядних пристроїв і бортових електронних системах транспортного засобу [29]. Погіршення якості електроенергії через гармонічне забруднення стає особливо відчутним у режимах високого навантаження мережі, коли зарядна потужність досягає приблизно 18-24 кВт·год.

Для кількісної оцінки гармонічних складових зазвичай аналізують амплітуду та фазові кути гармонік струму і напруги. Найчастіше використовуються показники загального гармонічного спотворення (THD) та загального спотворення навантаження (TDD). За результатами досліджень, третя гармоніка може становити приблизно 50 % від загального спектра гармонічних складових струму, причому її величина значною мірою визначається

індуктивністю зарядного кола: зменшення індуктивності призводить до погіршення гармонічного профілю.

Під час планування та реалізації V2G необхідно забезпечувати відповідність показників THD і TDD вимогам міжнародних стандартів, зокрема IEEE 519 (до 5 %) та IEC 61000 (3–5 %). При цьому TDD оцінює гармонічний спектр з урахуванням номінального струму лінії, тоді як THD базується на максимальному струмі. Як зазначено у [29], саме TDD забезпечує більш точну характеристику гармонічного режиму.

У роботі [30] запропоновано дев'ятифазний перетворювач із трьома ізольованими дев'ятифазними електромобілями, оснащеними вбудованими зарядними пристроями акумуляторів. У такій системі використано алгоритм керування напругою на основі нечіткої логіки, який дозволяє стабілізувати параметри напруги і струму як на стороні електромережі, так і на стороні акумуляторної батареї під час роботи в режимі V2G. Застосування такої конфігурації забезпечує значне зниження показника THD та зменшення пульсацій навантаження акумуляторного блоку.

Окрім гармонік, що виникають у мережі, під час роботи електродвигуна можуть формуватися просторові гармоніки магніторушійної сили статора, які викликають додаткові втрати на вихрові струми в роторі. У двигунах з внутрішніми постійними магнітами ці гармоніки можуть призводити до підвищених втрат у залізі ротора та магнітів. Як зазначено в [31], застосування кількох трифазних обмоток у дев'ятифазній машині з 18 пазами та 14 полюсами дозволяє компенсувати більшість субгармонік і частину гармонік вищих порядків.

Для синхронних двигунів з постійними магнітами ефективним підходом є використання шестифазних обмоток, розташованих у двох трифазних системах пазів, що дозволяє практично повністю усунути п'яту гармоніку. Сучасні дослідження також розглядають оптимізацію конфігурацій обмоток, кількості полюсів та пазів, а також застосування дробового розподілу пазів на фазу для зменшення третьої, п'ятої та інших непарних гармонік і мінімізації гармонік

вищих порядків. Такий підхід може бути використаний у різних типах електромашин, включаючи синхронні реактивні машини та синхронні машини з обмоткою збудження.

2.3.3 Поводження з накопиченням енергії в акумуляторах

У режимі двонаправленого обміну енергією між електромобілем і мережею необхідно забезпечити коректне керування процесами заряджання та розряджання, щоб запобігти прискореній деградації акумулятора та зниженню його ємності. Інтенсивна експлуатація V2G із використанням батарей великої ємності може призводити до збільшення глибини розряду та додаткового навантаження на силову установку електромобіля.

У межах концепції V2G широко застосовуються алгоритми багатокритеріальної оптимізації, що дозволяють планувати роботу парку електромобілів таким чином, щоб мінімізувати деградацію батарей і підвищити економічну ефективність системи. Основними матеріалами для виготовлення сучасних акумуляторів є літій, нікель, кобальт, мідь та графіт. Дослідження [55] показали, що використання свинцево-кислотних та нікель-металогідридних батарей для реалізації V2G є економічно недоцільним.

У роботі [32] проаналізовано життєвий цикл акумуляторів електромобілів з урахуванням необхідності забезпечення крутного моменту для руху транспортного засобу та можливості передачі енергії назад у розподільчу мережу в режимі V2G. Для електромобілів другого покоління, оснащених літій-іонними батареями ємністю близько 60 кВт·год, рівень технічного стану батареї повинен перевищувати приблизно 75 % для забезпечення належної експлуатації. За таких умов запас ходу може становити близько 350–500 км, а термін служби батареї – приблизно 14-20 років.

Крім того, використання проміжного накопичення енергії під час реалізації V2G може сприяти збільшенню навантаження енергосистеми, якщо рівень використання не перевищує приблизно 25 % від загального обсягу

накопичувальної ємності. Таким чином, акумулятори другого покоління достатньо добре інтегруються в системи електроприводу електромобілів і можуть використовуватися в технології V2G без необхідності частих заміन.

Оцінювання ресурсу літій-іонних акумуляторів зазвичай базується на аналізі таких факторів, як підвищення температури, неконтрольований рівень заряду, нерегулярні цикли заряджання і розряджання та глибина розряду. Для стандартних досліджень часто використовується модель життєвого циклу батареї, розроблена Національною лабораторією відновлюваної енергії. У [57] запропоновано емпіричну модель втрат заряду, яка поєднується з електротермічною моделлю для аналізу літій-іонних елементів типів LFP/C та NCA/C. Результати показали, що при роботі в режимі V2G елементи NCA/C деградують швидше, ніж LFP/C.

Крім того, сучасні алгоритми керування дозволяють підключати лише частину елементів батарейного блоку до навантаження, що забезпечує оптимальний розподіл струму між осередками та покращує електрохімічні характеристики акумулятора.

Цикли заряджання впливають на внутрішній опір батареї та можуть прискорювати втрату її ємності. Тому кожен акумуляторний модуль має оптимальні межі заряджання та струму розряджання, які повинні підтримуватися під час експлуатації. Подача високих пікових струмів у режимах G2V або V2G також може негативно впливати на довговічність батареї.

Ефективність роботи батареї також значною мірою залежить від системи терморегуляції. За результатами досліджень, удосконалення систем вентиляції та клімат-контролю може підвищити ресурс батареї приблизно на 14 % та одночасно зменшити споживання енергії транспортним засобом на 39 % [33]. Застосування систем термокерування на основі нечіткої логіки дозволяє підтримувати оптимальний тепловий режим салону та акумулятора, що знижує загальні витрати життєвого циклу батареї приблизно на 3 % [34].

Для зменшення навантаження на батарею також пропонуються гібридні системи накопичення енергії, що поєднують літій-іонні акумулятори та

ультраконденсатори. У [35] описано систему з керованим двонаправленим перетворювачем на базі програмованої вентиляційної матриці, який регулює передачу енергії між акумуляторами та ультраконденсаторами. У такій конфігурації низькочастотні струми забезпечуються батареєю, тоді як високочастотні імпульси компенсуються ультраконденсаторами, що зменшує перевантаження акумулятора.

2.3.4 Вразливості систем зв'язку та кібербезпеки

Функціонування системи V2G передбачає динамічні процеси заряджання та розряджання електромобілів, що потребує ефективної системи керування та надійної комунікаційної інфраструктури. Така інфраструктура повинна забезпечувати обмін інформацією між енергетичною мережею, обладнанням живлення електромобілів, зарядними станціями та кінцевими користувачами для досягнення економічної та енергетичної ефективності. Особливістю інформаційних потоків у системах V2G є те, що вони безпосередньо впливають на алгоритми керування та планування роботи фізичної енергетичної інфраструктури. Тому будь-які порушення або збої в системі зв'язку можуть призвести до пошкодження енергетичних систем та значних втрат.

Для забезпечення швидкого та надійного обміну даними у транспортному середовищі застосовуються комунікаційні стандарти IEEE 802.11p та IEEE 1609, які формують базові рівні бездротової взаємодії між транспортними засобами та інфраструктурою. Крім того, у системах V2G, V2V та V2I може використовуватися протокол Dedicated Short Range Communication (DSRC). У межах V2G цей протокол забезпечує швидке отримання інформації від мережі, автентифікацію сигналів та стабільну передачу даних між енергосистемою і транспортним засобом навіть за високих швидкостей руху транспортних засобів (понад 500 км/год) та за відсутності прямої видимості між пристроями. Додатковими перевагами DSRC є його стійкість до несприятливих погодних умов та низька затримка передачі даних, що робить цей протокол ефективним для застосування у V2G-системах.

Важливим аспектом функціонування V2G є забезпечення кібербезпеки та захисту від несанкціонованого доступу. У зв'язку з активним використанням технологій блокчейну, штучного інтелекту та Інтернету речей зростає необхідність захисту інформаційних потоків від кібератак. Комунікація між електромобілями, зарядними станціями та енергетичною мережею повинна гарантувати конфіденційність персональних даних користувачів, інформації про процедури заряджання і розряджання, а також відомостей про надані енергетичні послуги.

Одним із поширених методів підвищення рівня безпеки є застосування взаємної автентифікації між учасниками мережі, що дозволяє зменшити ризик атак типу підміни або перенаправлення мережевого трафіку. Перед початком процесу заряджання або розряджання електромобілі повинні бути зареєстровані в системі агрегатора та пройти процедуру перевірки автентичності. Для цього можуть використовуватися фізично неклоновані функції, які застосовуються в протоколах безпечного обміну ключами. У межах такого підходу дані про транспортний засіб та місцезнаходження користувача кодуються у вигляді псевдоідентичності, що дозволяє запобігати викраденню особистих даних та витоку конфіденційної інформації.

Електромобілі та агрегатори можуть також оснащуватися унікальними секретними ідентифікаційними ключами, які дозволяють відфільтровувати шкідливі або підроблені інформаційні пакети, що надходять через мережу. Крім того, сучасні технології блокчейну, криптографії та штучного інтелекту сприяють підвищенню ефективності управління енергетичними потоками, одночасно зменшуючи навантаження на комунікаційну інфраструктуру.

Додаткову загрозу для системи V2G становить поширення шкідливого програмного забезпечення, зокрема мережевих черв'яків або вірусів. Інфікування одного електромобіля може призвести до подальшого поширення шкідливого коду через мережу зарядних станцій. Для запобігання таким ситуаціям можуть застосовуватися методи оптимізації, зокрема алгоритми змішаного цілочисельного лінійного програмування, які дозволяють обмежувати

поширення кіберзагроз у мережі [36]. Крім того, використання моделей оцінювання рівня небезпеки дає змогу своєчасно виявляти заражені вузли та активувати механізми захисту.

Висновки до розділу

У розділі розглянуто вплив електромобілів на режими роботи електричних мереж із використанням технології V2G. Проаналізовано можливості застосування електромобілів для керування навантаженням енергосистеми, зокрема шляхом регулювання процесів заряджання та розряджання акумуляторних батарей.

Встановлено, що застосування технології V2G дозволяє ефективніше використовувати електроенергію, зменшувати пікові навантаження та підвищувати гнучкість роботи енергосистеми. Разом з тим неконтрольоване підключення значної кількості електромобілів може призводити до зростання навантаження на розподільчі мережі, нерівномірності фазних навантажень та появи гармонічних спотворень струму.

Показано, що електромобілі можуть виконувати функцію розподілених накопичувачів енергії, забезпечуючи підтримку енергосистеми у періоди пікового споживання. Водночас часті цикли заряджання та розряджання можуть впливати на технічний стан і ресурс акумуляторних батарей, що необхідно враховувати при використанні режимів V2G.

Отже, застосування технології V2G створює можливості для більш ефективної інтеграції електромобілів у сучасні енергетичні системи, однак потребує врахування їх впливу на параметри електричних мереж та акумуляторні системи.

3 РОЗРАХУНОК ЕНЕРГЕТИЧНОГО ПОТЕНЦІАЛУ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ У РЕЖИМІ V2G

3.1 Вихідні дані для розрахунку

Для оцінки можливостей використання електромобілів у режимі V2G необхідно визначити сумарний енергетичний потенціал акумуляторних батарей та можливу потужність, яка може бути передана в електричну мережу.

Розглянемо умовний міський район, у якому експлуатується парк електромобілів. Основні вихідні дані наведені у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Вихідні параметри для розрахунку

Параметр	Позначення	Значення
Кількість електромобілів	N_{EV}	100
Середня ємність акумулятора	C_{bat}	60 кВт·год
Середній рівень заряду	SOC	70 %
Допустима глибина розряду для V2G	DOD	20 %
Потужність двонаправленого зарядного пристрою	P_{ch}	10 кВт

Такі параметри відповідають типовим сучасним електромобілям (Nissan Leaf, Hyundai Kona Electric, Tesla Model 3) [37–39].

3.2 Розрахунок доступної енергії електромобілів у режимі V2G

Енергія, яка може бути передана від одного електромобіля до мережі, визначається [40]:

$$E_{V2G} = C_{bat} \cdot DOD, \quad (3.1)$$

де C_{bat} – ємність акумулятора, кВт·год;
 DOD – допустима глибина розряду.

Підставляємо значення:

$$E_{V2G} = 60 \cdot 0,2 = 12 \text{ кВт} \cdot \text{год}.$$

Отже один електромобіль може передати до мережі 12 кВт·год енергії без суттєвого впливу на запас ходу.

Сумарна енергія всіх електромобілів:

$$E_{tot} = N_{EV} \cdot E_{V2G}. \quad (3.2)$$

$$E_{tot} = 100 \cdot 12 = 1200 \text{ кВт} \cdot \text{год}.$$

Отже сумарний енергетичний потенціал становить 1200 кВт·год.

3.3 Розрахунок сумарної потужності системи V2G

Потужність, яка може передаватися до мережі, визначається:

$$P_{V2G} = N_{EV} \cdot P_{ch}, \quad (3.3)$$

де P_{ch} – потужність двонаправленого зарядного пристрою.

$$P_{V2G} = 100 \cdot 10 = 1000 \text{ кВт}.$$

Отже максимальна потужність системи $P_{V2G} = 1 \text{ МВт}$.

Це означає, що парк із 100 електромобілів може працювати як розподілене джерело потужністю 1 МВт.

3.4 Тривалість підтримки мережі

Час роботи системи визначається:

$$t = \frac{E_{tot}}{P_{V2G}}. \quad (3.4)$$

$$t = \frac{1200}{1000} = 1,2 \text{ год}.$$

Отже система може підтримувати електричну мережу протягом приблизно 1,2 години.

3.5 Вплив режиму V2G на ресурс акумуляторної батареї

Термін служби літій-іонних акумуляторів визначається кількістю циклів заряд-розряд [41].

Середній ресурс сучасних батарей:

$$N_{cycle} = 3000$$

При використанні V2G частина циклів витрачається на передачу енергії в мережу.

Еквівалентна кількість циклів визначається:

$$N_{eq} = \frac{E_{V2G}}{C_{bat}}. \quad (3.5)$$

$$N_{eq} = \frac{12}{60} = 0,2$$

Отже один цикл V2G відповідає 0,2 повного циклу батареї.

Якщо V2G використовується один раз на добу:

$$N_{year} = 365 \cdot 0,2 = 73 \quad (3.6)$$

Тоді ресурс батареї:

$$T = \frac{3000}{73} \approx 41 \text{ рік} \quad (3.7)$$

Таким чином вплив режиму V2G на деградацію батареї є відносно незначним, якщо глибина розряду обмежена.

Порівняння енергетичного потенціалу V2G

Таблиця 3.2 – Енергетичний потенціал V2G

Кількість електромобілів	Сумарна енергія	Потужність
50	600 кВт·год	0,5 МВт
100	1,2 МВт·год	1 МВт
500	6 МВт·год	5 МВт

З таблиці видно, що навіть невелика кількість електромобілів може створити значний резерв потужності для підтримки електричної мережі.

Висновки до розділу

У розділі виконано розрахунок енергетичного потенціалу електромобілів при використанні технології V2G. Визначено, що один електромобіль із акумуляторною батареєю ємністю 60 кВт·год при допустимій глибині розряду 20 % може передати до електричної мережі близько 12 кВт·год енергії.

Показано, що парк із 100 електромобілів здатний забезпечити сумарний енергетичний резерв 1,2 МВт·год та передавати в мережу потужність до 1 МВт, що дозволяє використовувати їх як розподілене джерело енергії для підтримки режимів роботи електроенергетичної системи. Встановлено, що при зазначених параметрах система може підтримувати роботу мережі протягом приблизно 1,2 години.

Також проведено оцінку впливу режиму V2G на ресурс акумуляторних батарей. Визначено, що один цикл передачі енергії до мережі відповідає приблизно 0,2 повного циклу батареї, тому при обмеженні глибини розряду негативний вплив на деградацію акумулятора є відносно незначним.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Вступ

Експлуатація, технічне обслуговування та діагностика електромобілів і зарядної інфраструктури пов'язані з використанням високовольтного електрообладнання, силових електронних перетворювачів та акумуляторних батарей великої ємності. У зв'язку з цим під час виконання робіт можуть виникати небезпечні та шкідливі виробничі фактори, які здатні негативно впливати на здоров'я та безпеку працівників. Забезпечення безпечних умов праці під час роботи з електромобілями є важливим завданням сучасних ремонтно-експлуатаційних підприємств міського електричного транспорту [42].

Особливістю електромобілів є наявність високовольтної тягової батареї, напруга якої може досягати 400–800 В. Така напруга значно перевищує безпечні для людини значення і вимагає дотримання суворих правил електробезпеки під час проведення ремонтних або діагностичних робіт. Крім того, у складі електромобіля використовуються силові електронні перетворювачі, інвертори та бортові зарядні пристрої, які працюють із великими струмами та можуть створювати додаткові ризики для персоналу [43].

Метою цього розділу є аналіз небезпечних і шкідливих факторів, що виникають під час експлуатації та обслуговування електромобілів, а також розроблення організаційно-технічних заходів для забезпечення безпечних умов праці.

4.2 Аналіз небезпечних та шкідливих факторів

Під час технічного обслуговування електромобілів працівники можуть піддаватися дії небезпечних і шкідливих виробничих факторів. До найбільш небезпечних належать фактори, пов'язані з використанням високовольтного електрообладнання.

Основні елементи високовольтної системи електромобіля наведено на рисунку 4.1.

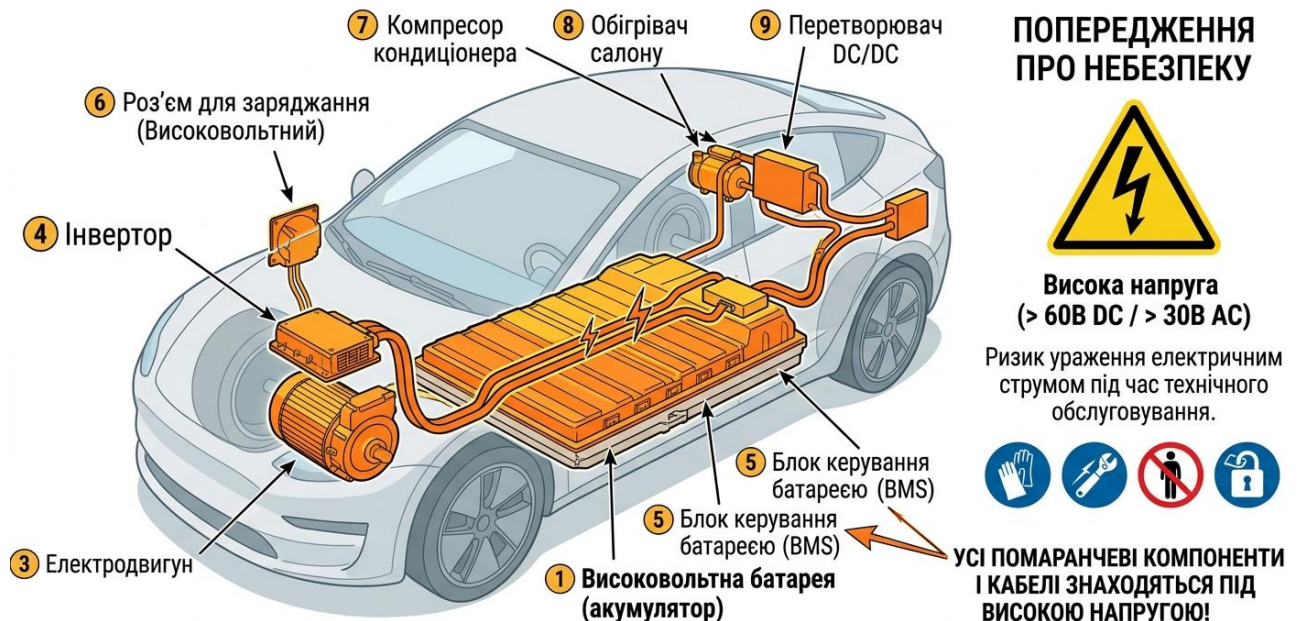


Рисунок 4.1 – Основні високовольтні системи електромобіля

До основних високовольтних компонентів електромобіля належать:

- тяговий акумулятор;
- інвертор;
- електродвигун;
- бортовий зарядний пристрій;
- DC/DC перетворювач;
- високовольтні кабелі.

Напруга в цих елементах може становити 400–800 В, що створює небезпеку ураження електричним струмом під час технічного обслуговування або ремонту [44].

До основних небезпечних факторів належать:

- ураження електричним струмом;
- коротке замикання у високовольтних колах;
- можливість займання акумуляторних батарей;

- механічні травми при роботі з обладнанням.

Крім небезпечних факторів існують і шкідливі виробничі фактори, які можуть впливати на стан здоров'я працівників протягом тривалого часу.

До них належать:

- електромагнітні поля;
- підвищений рівень шуму;
- недостатнє освітлення робочих місць;
- можливе виділення шкідливих речовин у разі пошкодження акумуляторних батарей [45].

Особливу увагу слід приділяти освітленню робочих місць. Недостатній рівень освітленості може призводити до зниження точності виконання робіт, підвищення втомлюваності працівників і збільшення ризику виробничого травматизму [46].

4.3 Організаційно-технічні заходи забезпечення безпеки

Для забезпечення безпечних умов праці під час експлуатації та обслуговування електромобілів необхідно застосовувати комплекс організаційних і технічних заходів.

До організаційних заходів належать:

- проведення вступного та первинного інструктажу з охорони праці;
- навчання персоналу правилам електробезпеки;
- допуск до роботи працівників, які мають відповідну групу з електробезпеки;
- використання засобів індивідуального захисту.

Засоби індивідуального захисту при роботі з високовольтним обладнанням включають:

- діелектричні рукавички;
- діелектричне взуття;
- ізольований інструмент;

- захисні окуляри.

До технічних заходів належать:

- захисне заземлення електрообладнання;
- використання автоматичних вимикачів;
- застосування систем контролю температури акумуляторних батарей;
- встановлення систем аварійного відключення.

Схему захисного заземлення зарядної станції наведено на рисунку 4.2.

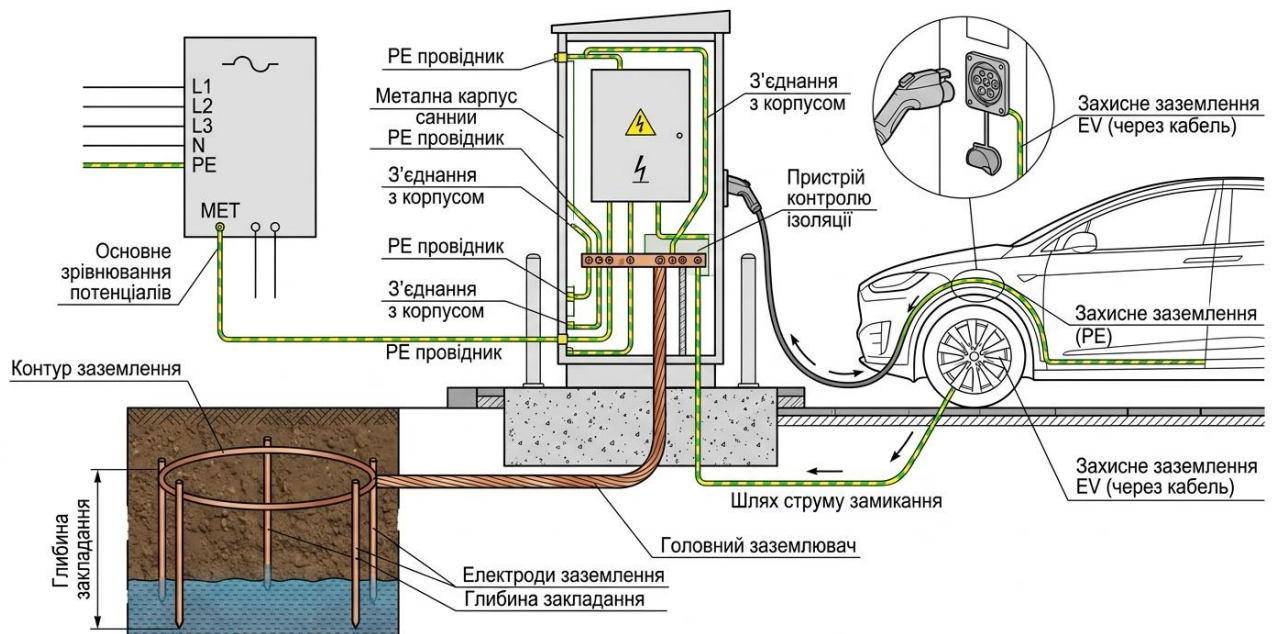


Рисунок 4.2 – Схема захисного заземлення зарядної станції електромобіля

Розрахунок освітлення робочого місця

Одним із важливих факторів забезпечення безпечних умов праці є достатній рівень освітлення робочих місць. Відповідно до нормативних вимог, освітленість ремонтних і виробничих приміщень повинна становити 300–500 лк [47].

Розрахунок освітлення виконується методом світлового потоку.

Необхідний світловий потік визначається за формулою:

$$\Phi = (E \cdot S \cdot k) / \eta, \quad (4.1)$$

де E – нормована освітленість, лк;
 S – площа приміщення, м²;
 k – коефіцієнт запасу;
 η – коефіцієнт використання світлового потоку.

Для розрахунку приймаємо:

площа приміщення – 40 м²;
нормована освітленість – 300 лк;
коефіцієнт запасу – 1,5;
коефіцієнт використання – 0,6.

Тоді

$$\Phi = (300 \cdot 40 \cdot 1,5) / 0,6 = 30000 \text{ лм.}$$

Отже сумарний світловий потік повинен становити 30000 лм.

Якщо використовуються світлодіодні світильники зі світловим потоком 4000 лм, необхідна кількість світильників визначається:

$$N = \Phi / \Phi_1 = 30000 / 4000 \approx 8. \quad (4.2)$$

Отже для забезпечення нормативної освітленості необхідно встановити 8 світлодіодних світильників.

Схему їх розміщення у приміщенні наведено на рисунку 4.3.

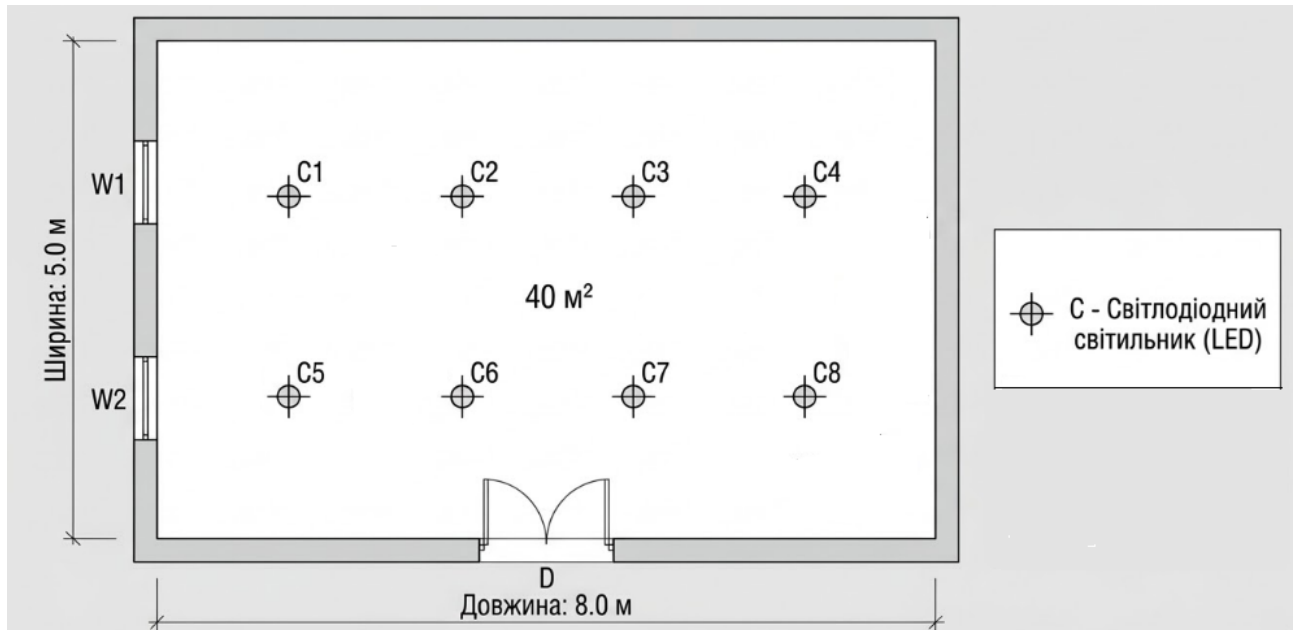


Рисунок 4.3 – Схема розміщення світильників

4.4 Висновки по розділу

У розділі розглянуто питання забезпечення безпечних умов праці під час експлуатації та обслуговування електромобілів. Проведено аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів, серед яких найбільш небезпечними є ураження електричним струмом та можливість займання акумуляторних батарей.

Запропоновано комплекс організаційних і технічних заходів щодо забезпечення безпечних умов праці. Також виконано розрахунок освітлення робочого місця, який показав необхідність встановлення восьми світлодіодних світильників для забезпечення нормативної освітленості виробничого приміщення.

ВИСНОВКИ

В першому розділі проведено аналіз розвитку електромобільного транспорту, зарядної інфраструктури та технології V2G. Встановлено перспективність використання V2G для інтеграції електромобілів в електричні мережі та необхідність оцінювання їх впливу на режими роботи енергосистеми та акумулятори.

В другому розділі виконано оцінку впливу електромобілів на параметри електричної мережі та акумуляторні батареї із застосуванням технології V2G. Показано, що використання двонаправленого енергетичного обміну може підвищити ефективність роботи енергосистеми, але потребує врахування впливу на режими мережі та ресурс акумуляторів.

В третьому розділі виконано розрахунок енергетичного потенціалу електромобілів у режимі V2G, який показав, що парк із 100 електромобілів може забезпечити передачу до електричної мережі потужності до 1 МВт та енергетичний резерв 1,2 МВт·год. Встановлено, що використання обмеженої глибини розряду (20 %) дозволяє мінімізувати вплив режиму V2G на ресурс акумуляторних батарей.

У четвертому розділі проведено аналіз небезпечних і шкідливих факторів під час експлуатації та обслуговуванні електромобілів і розроблено організаційно-технічні заходи забезпечення безпечних умов праці, а також виконано розрахунок освітлення робочого приміщення відповідно до нормативних вимог.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Zahedmanesh, A.; Muttaqi, K.M.; Sutanto, D. Direct Control of Plug-In Electric Vehicle Charging Load Using an In-House Developed Intermediate Control Unit. *IEEE Trans. Ind. Appl.* 2019, 55, 2208–2218.
2. Li, S.G.; Sharkh, S.M.; Walsh, F.C.; Zhang, C.N. Energy and Battery Management of a Plug-In Series Hybrid Electric Vehicle Using Fuzzy Logic. *IEEE Trans. Veh. Technol.* 2011, 60, 3571–3585.
3. Tang, Z.; Li, X. Gear Ratio Distribution of Electric Vehicle Reducer. *J. Phys. Conf. Ser.* 2020, 1654, 012011.
4. IEA. Global EV Outlook 2021. 2021. Available online: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2021>
5. Bilgin, B.; Magne, P.; Malysz, P.; Yang, Y.; Pantelic, V.; Preindl, M.; Korobkine, A.; Jiang, W.; Lawford, M.; Emadi, A. Making the Case for Electrified Transportation. *IEEE Trans. Transp. Electrif.* 2015, 1, 4–17.
6. International, S. Vehicle Architecture for Data Communications Standards—Class B Data Communications Network Interface; SAE International: Warrendale, PA, USA, 2009.
7. GB/T. Комплект з'єднань для кондуктивної зарядки електромобілів — Частина 1: Загальні вимоги. 2015. Доступно онлайн: <https://www.cec.org.cn/upload/1/editor/1649832337218.pdf>
8. IEC. Вилки, розетки, з'єднувачі для транспортних засобів та входні розетки для транспортних засобів – Кондуктивна зарядка електромобілів – Частина 1: Загальні вимоги; IEC: Женева, Швейцарія, 2014; Доступно онлайн: <https://webstore.iec.ch/publication/59922>
9. Islam, F.R.; Cirrincione, M. Vehicle to grid system to design a centre node virtual unified power flow controller. *Electron. Lett.* 2016, 52, 1330–1332.
10. Mendoza-Araya, P.A.; Kollmeyer, P.J.; Ludois, D.C. V2G integration and experimental demonstration on a lab-scale microgrid. In *Proceedings of the 2013*

IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, Denver, CO, USA, 15–19 September 2013; pp. 5165–5172.

11. IRENA. Аналітика щодо відновлюваних джерел енергії – набір даних. 2021. Доступно онлайн: <https://www.irena.org/publications/2021/March/Renewable-Capacity-Statistics-2021>
12. Dogger, J.D.; Roossien, B.; Nieuwenhout, F.D.J. Characterization of Li-Ion Batteries for Intelligent Management of Distributed Grid-Connected Storage. *IEEE Trans. Energy Convers.* 2011, 26, 256–263.
13. Heydt, G.T. The Impact of Electric Vehicle Deployment on Load Management Strategies. *IEEE Trans. Power Appar. Syst.* 1983, PAS-102, 1253–1259.
14. Mahmud, K.; Morsalin, S.; Kafle, Y.R.; Town, G.E. Improved peak shaving in grid-connected domestic power systems combining photovoltaic generation, battery storage, and V2G-capable electric vehicle. In *Proceedings of the 2016 IEEE International Conference on Power System Technology (POWERCON)*, Wollongong, Australia, 28 September–1 October 2016; pp. 1–4.
15. Shumei, C.; Xiaofei, L.; Dewen, T.; Qianfan, Z.; Liwei, S. The construction and simulation of V2G system in micro-grid. In *Proceedings of the 2011 International Conference on Electrical Machines and Systems*, Beijing, China, 20–23 August 2011; pp. 1–4.
16. Salvatti, G.A.; Carati, E.G.; Cardoso, R.; da Costa, J.P.; Stein, C.M. Electric Vehicles Energy Management with V2G/G2V Multifactor Optimization of Smart Grids. *Energies* 2020, 13, 1191.
17. Taghizadeh, S.; Hossain, M.J.; Lu, J.; Water, W. A unified multi-functional on-board EV charger for power-quality control in household networks. *Appl. Energy* 2018, 215, 186–201.
18. Hsu, Y.; Kao, S.; Ho, C.; Jhou, P.; Lu, M.; Liaw, C. On an Electric Scooter with G2V/V2H/V2G and Energy Harvesting Functions. *IEEE Trans. Power Electron.* 2018, 33, 6910–6925.

19. Tan, K.M.; Ramachandaramurthy, V.K.; Yong, J.Y. Integration of electric vehicles in smart grid: A review on vehicle to grid technologies and optimization techniques. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2016, 53, 720–732.
20. Noel, L.; Zarazua de Rubens, G.; Kester, J.; Sovacool, B.K. The Technical Challenges to V2G. In *Vehicle-to-Grid: A Sociotechnical Transition Beyond Electric Mobility*; Noel, L., Zarazua de Rubens, G., Kester, J., Sovacool, B.K., Eds.; Springer International Publishing: Cham, Switzerland, 2019; pp. 65–89.
21. Pillai, J.R.; Bak-Jensen, B. Impacts of electric vehicle loads on power distribution systems. In *Proceedings of the 2010 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, Lille, France, 1–3 September 2010; pp. 1–6.
22. Alghsoon, E.; Harb, A.; Hamdan, M. Power quality and stability impacts of Vehicle to grid (V2G) connection. In *Proceedings of the 2017 8th International Renewable Energy Congress (IREC)*, Amman, Jordan, 21–23 March 2017; pp. 1–6.
23. Kapassa, E.; Themistocleous, M.; Christodoulou, K.; Iosif, E. Blockchain Application in Internet of Vehicles: Challenges, Contributions and Current Limitations. *Future Internet* 2021, 13, 313.
24. Liu, D.; Li, D.; Liu, X.; Ma, L.; Yu, H.; Zhang, H. Research on a Cross-Domain Authentication Scheme Based on Consortium Blockchain in V2G Networks of Smart Grid. In *Proceedings of the 2018 2nd IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2)*, Beijing, China, 20–22 October 2018; pp. 1–5.
25. 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.
26. Au, M.H.; Liu, J.K.; Fang, J.; Jiang, Z.L.; Susilo, W.; Zhou, J. A New Payment System for Enhancing Location Privacy of Electric Vehicles. *IEEE Trans. Veh. Technol.* 2014, 63, 3–18.
27. Dubey, A.; Santoso, S.; Cloud, M.P.; Waclawiak, M. Determining Time-of-Use Schedules for Electric Vehicle Loads: A Practical Perspective. *IEEE Power Energy Technol. Syst. J.* 2015, 2, 12–20.

28. Li, S.; Gu, C.; Li, J.; Wang, H.; Yang, Q. Boosting Grid Efficiency and Resiliency by Releasing V2G Potentiality Through a Novel Rolling Prediction-Decision Framework and Deep-LSTM Algorithm. *IEEE Syst. J.* 2021, 15, 2562–2570.
29. Lucas, A.; Bonavitacola, F.; Kotsakis, E.; Fulli, G. Grid harmonic impact of multiple electric vehicle fast charging. *Electr. Power Syst. Res.* 2015, 127, 13–21.
30. De Luca, F.; Calderaro, V.; Galdi, V. A Fuzzy Logic-Based Control Algorithm for the Recharge/V2G of a Nine-Phase Integrated On-Board Battery Charger. *Electronics* 2020, 9, 946.
31. Chen, X.; Wang, J.; Patel, V.I.; Lazari, P. A Nine-Phase 18-Slot 14-Pole Interior Permanent Magnet Machine with Low Space Harmonics for Electric Vehicle Applications. *IEEE Trans. Energy Convers.* 2016, 31, 860–871.
32. Darcovich, K.; Laurent, T.; Ribberink, H. Improved prospects for V2X with longer range 2nd generation electric vehicles. *eTransportation* 2020, 6, 100085.
33. Vatanparvar, K.; Faruque, M.A.A. Battery lifetime-aware automotive climate control for Electric Vehicles. In *Proceedings of the 2015 52nd ACM/EDAC/IEEE Design Automation Conference (DAC)*, San Francisco, CA, USA, 8–12 June 2015; pp. 1–6.
34. Min, H.; Zhang, Z.; Sun, W.; Min, Z.; Yu, Y.; Wang, B. A thermal management system control strategy for electric vehicles under low-temperature driving conditions considering battery lifetime. *Appl. Therm. Eng.* 2020, 181, 115944.
35. Blanes, J.M.; Gutiérrez, R.; Garrigós, A.; Lizán, J.L.; Cuadrado, J.M. Electric Vehicle Battery Life Extension Using Ultracapacitors and an FPGA Controlled Interleaved Buck–Boost Converter. *IEEE Trans. Power Electron.* 2013, 28, 5940–5948.
36. Mousavian, S.; Erol-Kantarci, M.; Ortmeier, T. Cyber Attack Protection for a Resilient Electric Vehicle Infrastructure. In *Proceedings of the 2015 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, San Diego, CA, USA, 6–10 December 2015; pp. 1–6.

37. Kempton W., Tomić J. Vehicle-to-grid power implementation: From stabilizing the grid to supporting large-scale renewable energy // *Journal of Power Sources*. – 2005. – Vol. 144. – P. 280–294.
38. Lund H., Kempton W. Integration of renewable energy into the transport and electricity sectors through V2G // *Energy Policy*. – 2008. – Vol. 36. – P. 3578–3587.
39. *Global EV Outlook 2023*. – Paris: International Energy Agency, 2023. – 320 p.
40. Sortomme E., El-Sharkawi M. Optimal charging strategies for electric vehicles // *IEEE Transactions on Smart Grid*. – 2011. – Vol. 2. – No. 1. – P. 131–138.
41. Habib S., Kamran M., Rashid U. Impact analysis of vehicle-to-grid technology and charging strategies of electric vehicles on distribution networks // *Energy*. – 2015. – Vol. 82. – P. 459–469.
42. Закон України «Про охорону праці»: Закон України від 14.10.1992 № 2694-ХІІ.
43. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів. – Київ : Міненерго України, 2018. – 308 с.
44. Правила улаштування електроустановок. – 7-ме вид. – Київ : Міненерго України, 2017. – 617 с.
45. Жидецький В. Ц. Основи охорони праці : підручник. – 5-те вид., перероб. і доп. – Львів : Афіша, 2018. – 376 с.
46. Гандзюк М. П., Желібо Є. П., Халімовський М. О. Основи охорони праці : підручник. – Київ : Каравела, 2020. – 408 с.
47. *Природне і штучне освітлення* : ДБН В.2.5-28:2018. – Київ : Мінрегіон України, 2018. – 133 с.