

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА

НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ, ІНФОРМАЦІЙНОЇ
ТА ТРАНСПОРТНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

Кафедра електричного транспорту

**ВПЛИВ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ НА ПРОПУСКНУ ЗДАТНІСТЬ ТА
СТАБІЛЬНІСТЬ РОЗПОДІЛЕНОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ**

Бакалаврська кваліфікаційна робота

Здобувач:

Олексій ВЕЛИКИЙ
гр. СТ2023-1у

Керівник:

Микола ХВОРОСТ
професор, д.т.н.

Харків – 2026

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА
імені О. М. Бекетова

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ЕТ

 Микола ХВОРОСТ

« 18 » червня 2026 р.

ЗАВДАННЯ

до бакалаврської кваліфікаційної роботи

Великому Олексію Дмитровичу

прізвище, ім'я, по батькові

1. Тема роботи: Вплив електромобілів на пропускну здатність та стабільність розподіленого електропостачання

керівник бакалаврської

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

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

2. Строк подання студентом бакалаврської кваліфікаційної роботи 15.06.2026 р.

3. Вихідні дані до бакалаврської кваліфікаційної роботи *Матеріали переддипломної практики; дані щодо потужності та режимів роботи електромобілів (G2V, V2G); нормативні вимоги до якості електроенергії та науково-технічна література з оцінки пропускну здатності мереж.*

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

1. Сучасний стан електромобілів та їх вплив на пропускну здатність розподільчих мереж.

2. Методи оцінки та оптимізації пропускну здатності розподільчих мереж за участю електромобілів.







3. Розрахунок впливу електромобілів на пропускну здатність та стабільність розподільчої мережі.

4. Охорона праці.

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

Пропускна здатність розподільчої мережі. Фактори впливу на пропускну здатність. Показники оцінювання пропускну здатності. Традиційні методи оцінювання. Урахування стохастичності процесів заряджання. Методи підвищення пропускну здатності.

6. Консультанти розділів бакалаврської кваліфікаційної роботи

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

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

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

Здобувач




(підпис)

Олексій ВЕЛИКИЙ

(прізвище та ініціали)

Керівник бакалаврської кваліфікаційної роботи



(підпис)

Микола ХВОРОСТ

(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

У бакалаврській кваліфікаційній роботі досліджено вплив масового підключення електромобілів на пропускну здатність та стабільність роботи системи розподіленого електропостачання. Проаналізовано особливості формування навантаження в мережах низької напруги при одночасному заряджанні електромобілів та визначено їх вплив на режимні параметри електричної мережі.

У роботі виконано розрахунок навантаження трансформаторної підстанції 0,4 кВ при підключенні групи електромобілів, визначено рівень перевантаження, відхилення напруги та зміну втрат потужності. Проведено оцінку ефективності застосування технології V2G для зниження пікових навантажень і підвищення стабільності функціонування мережі.

ЗМІСТ

	стор
ВСТУП.....	6
1 СУЧАСНИЙ СТАН ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ ТА ЇХ ВПЛИВ НА ПРОПУСКНУ ЗДАТНІСТЬ РОЗПОДІЛЬЧИХ МЕРЕЖ.....	8
1.1 Сучасний стан розвитку електротранспорту.....	8
1.2 Взаємодія електромобілів із електричною мережею.....	10
1.3 Основи технології V2G.....	11
2 МЕТОДИ ОЦІНКИ ТА ОПТИМІЗАЦІЇ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ РОЗПОДІЛЬЧИХ МЕРЕЖ ЗА УЧАСТЮ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ.....	15
2.1 Підключення електромобілів до мережі.....	18
2.2 Традиційні методи оцінки пропускної здатності розподільчої мережі.....	20
2.3 Метод оцінки пропускної здатності з урахуванням невизначеності.....	25
2.4 Методи підвищення пропускної здатності для електромобілів, підключених до розподільчої мережі.....	29
2.5 Вплив режиму V2G на ресурс акумуляторних батарей.....	32
3 РОЗРАХУНОК ВПЛИВУ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ НА ПРОПУСКНУ ЗДАТНІСТЬ ТА СТАБІЛЬНІСТЬ РОЗПОДІЛЬЧОЇ МЕРЕЖІ.....	34
3.1 Вихідні дані та постановка задачі розрахунку.....	34
3.2 Розрахунок додаткового навантаження в режимі G2V.....	35
3.3 Оцінка відхилення напруги.....	36
3.4 Аналіз зростання втрат потужності.....	37
3.5 Розрахунок ефекту впровадження V2G.....	37
3.6 Оцінка впливу V2G на ресурс акумуляторних батарей.....	38
4 ОХОРОНА ПРАЦІ.....	39
Вступ.....	39
Аналіз небезпечних та шкідливих факторів.....	39
Організаційно-технічні заходи забезпечення безпеки.....	42
Висновки до розділу.....	43
ВИСНОВКИ.....	44
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	45

ВСТУП

Сучасний етап розвитку електроенергетики характеризується глибокими трансформаційними процесами, пов'язаними з активною інтеграцією відновлюваних джерел енергії, впровадженням концепції розподіленої генерації та стрімким зростанням кількості електромобілів. Електротранспорт поступово переходить із категорії альтернативного до масового виду транспорту, що обумовлює необхідність переосмислення підходів до функціонування розподільчих електричних мереж.

Зростання кількості електромобілів призводить до формування нового типу навантаження в мережах низької та середньої напруги. Процеси заряджання акумуляторних батарей мають значну потужність і часто відбуваються у години пікового споживання, що може спричиняти перевантаження трансформаторів, зростання втрат потужності, відхилення напруги та погіршення показників якості електроенергії. Водночас електромобілі, оснащені сучасними бортовими зарядними пристроями та системами двостороннього обміну енергією, здатні працювати не лише як споживачі, а й як мобільні накопичувачі електроенергії, реалізуючи режими Grid-to-Vehicle (G2V) та Vehicle-to-Grid (V2G).

Технологія V2G відкриває можливості для згладжування пікових навантажень, балансування потужності та підвищення гнучкості розподільчих мереж. Однак її впровадження потребує детальної оцінки впливу електромобілів на пропускну здатність і стабільність системи електропостачання, а також врахування обмежень, пов'язаних із технічними параметрами мережі та ресурсом акумуляторних батарей.

Умови стохастичного характеру заряджання електромобілів, нерівномірність їх просторового розміщення та взаємодія з розподіленою генерацією ускладнюють процес планування розвитку електричних мереж. Саме тому визначення допустимого рівня інтеграції електромобілів без порушення нормативних режимів роботи мережі є актуальною науково-прикладною задачею.

Актуальність теми бакалаврської кваліфікаційної роботи обумовлена необхідністю забезпечення надійного та стабільного функціонування розподільчих мереж в умовах зростання частки електромобілів, а також потребою розроблення підходів до оцінки їх впливу на пропускну здатність і режимні параметри системи електропостачання.

Метою роботи є визначення впливу електромобілів на пропускну здатність та стабільність розподіленого електропостачання.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно виконати такі завдання:

1. Проаналізувати сучасний стан розвитку електромобілів, їх взаємодію з розподільчими мережами та вплив на пропускну здатність системи електропостачання.

2. Розглянути методи оцінки пропускну здатності розподільчих мереж з урахуванням інтеграції електромобілів та технології V2G.

3. Розрахувати вплив електромобілів на параметри та пропускну здатність розподільчої мережі.

4. Розробити організаційно-технічні заходи з охорони праці при експлуатації бортових зарядних пристроїв електромобілів.

Таким чином, виконання поставлених завдань дозволить обґрунтувати допустимий рівень інтеграції електромобілів у розподільчі мережі та визначити умови їх ефективної та безпечної експлуатації в сучасних енергетичних системах.

1 СУЧАСНИЙ СТАН ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ ТА ЇХ ВПЛИВ НА ПРОПУСКНУ ЗДАТНІСТЬ РОЗПОДІЛЬЧИХ МЕРЕЖ

1.1. Сучасний стан розвитку електротранспорту

Електромобілі стають одним із ключових напрямів розвитку сучасного транспорту, оскільки вони дозволяють зменшити шкідливі викиди у містах, знизити рівень шуму та підвищити ефективність використання електроенергії [1]. Окрім екологічних переваг, електромобілі відкривають можливості для інтеграції в розподілені енергетичні системи, де вони виконують роль мобільних акумуляторів, здатних акумулювати та віддавати енергію у мережу.

За даними International Energy Agency, на кінець 2022 року у світі експлуатувалося понад 20 млн електромобілів, а прогноз на 2030 рік передбачає подвоєння цього показника (рис. 1.1) [1]. Основними факторами зростання є розвиток акумуляторних технологій, державні програми підтримки електротранспорту, а також підвищена увага до кліматичних змін і інтеграції відновлюваної енергетики.

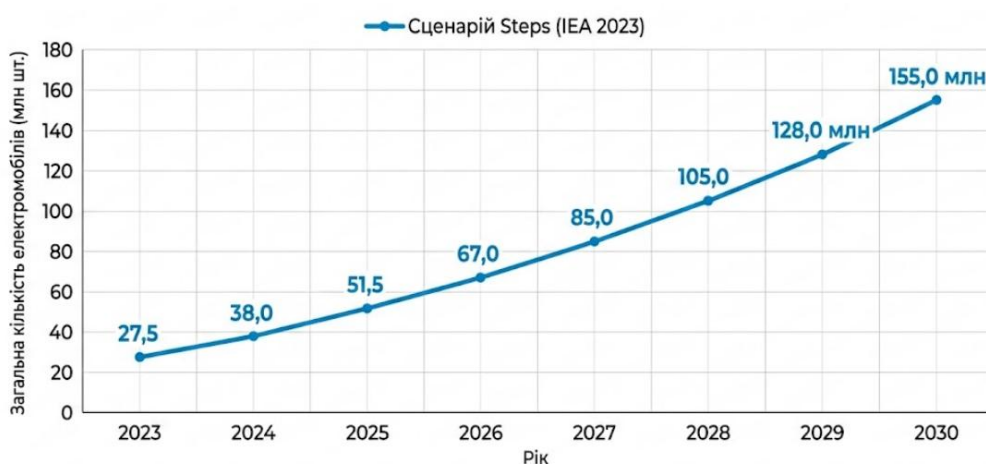


Рисунок 1.1 – Прогноз зростання кількості електромобілів у світі до 2030 року

В Україні розвиток електротранспорту також відбувається швидкими темпами. Згідно з даними Державної служби статистики України, кількість

zareєстрованих електромобілів зросла на 40 % за останні два роки [2]. Серед основних типів транспортних засобів, що експлуатуються в Україні, виділяють:

- Повністю електричні автомобілі – відзначаються великою ємністю батарей та високою потенційною участю у V2G.
- Гібридні автомобілі з можливістю підключення до мережі – обмежено використовуються для двостороннього обміну через меншу ємність акумулятора.
- Легкі комерційні електротранспортні засоби – застосовуються для доставки вантажів і можуть брати участь у балансуванні енергії мережі.

Таблиця 1.1 демонструє порівняльні характеристики електромобілів, включно з ємністю батарей, пробігом на одній зарядці, часом зарядки та потенційною інтеграцією у V2G.

Таблиця 1.1 – Основні характеристики електромобілів

Тип ЕМ	Ємність батареї, кВт·год	Пробіг на одній зарядці, км	Час зарядки (стандартна розетка), год	Потенційна інтеграція у V2G
Електромобіль	40-100	250-550	6-12	Висока
Гібридний електромобіль	10-20	50-100	2-4	Середня
Комерційний електротранспорт	20-80	150-300	7-8	Висока

Таким чином, розвиток електротранспорту створює необхідність адаптації міських і регіональних мереж до нових умов навантаження, а також інтеграції додаткових сервісів для забезпечення стабільної пропускної здатності та ефективного використання енергоресурсів.

Зростання кількості електромобілів у світі та Україні підкреслює потребу в оцінці їхнього впливу на мережу та визначенні критеріїв для підвищення її пропускної здатності.

1.2. Взаємодія електромобілів із електричною мережею

Електромобілі можна розглядати не лише як транспортні засоби, а й як розподілені енергетичні ресурси. Вони здатні споживати електроенергію для зарядки батарей, а в разі впровадження технології V2G – віддавати енергію назад у розподільчу мережу [3,4]. Така двостороння взаємодія створює нові виклики для операторів мереж: по-перше, одночасна зарядка багатьох електромобілів у години пікового навантаження може призвести до перевантаження ліній та трансформаторів, що потребує оцінки пропускної здатності мереж. По-друге, інтеграція електромобілів у поєднанні з відновлюваними джерелами енергії (сонячними та вітровими станціями) дозволяє акумулювати надлишкову електроенергію і підвищувати стабільність системи [5].

Крім того, часті цикли заряд/розряд батарей електромобілів можуть призводити до прискореної деградації акумуляторів, що необхідно враховувати при плануванні циклів участі у V2G [3]. Для ефективного управління інтеграцією електромобілів також потрібні стандартизовані протоколи зарядки, які забезпечують безпеку та сумісність між різними виробниками електромобілів та енергетичними мережами [4].

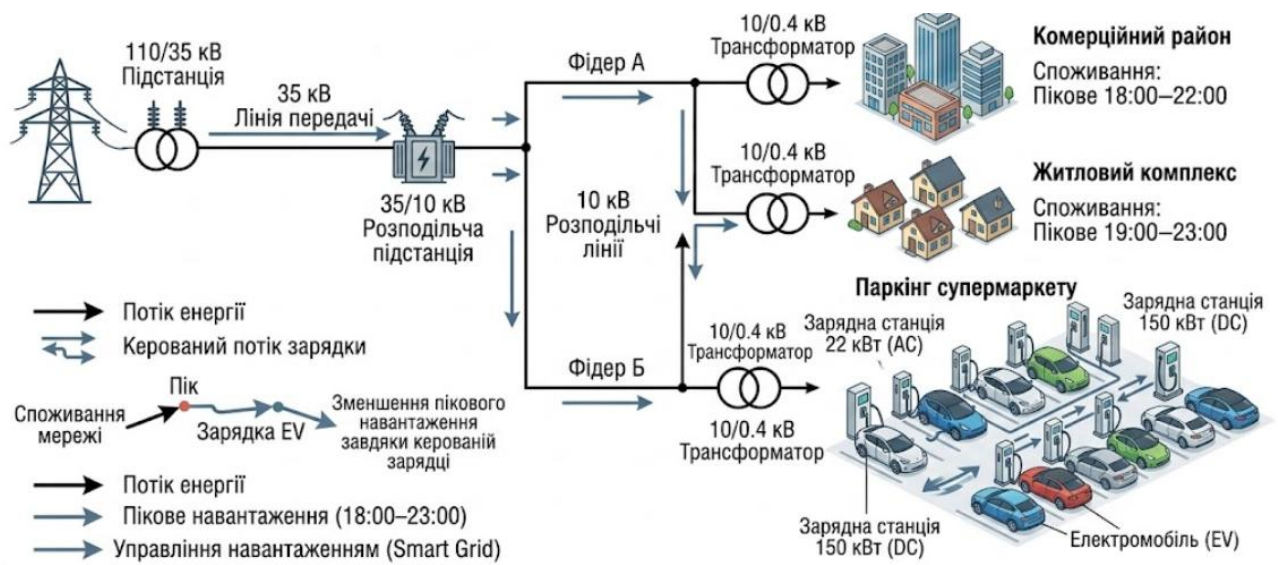


Рисунок 1.2 – Схема інтеграції електромобіля у розподільчу мережу

з урахуванням пікових навантажень

Таким чином, електромобілі можуть виконувати роль мобільних акумуляторів, але їхня взаємодія з мережею потребує ретельного аналізу пропускної здатності та моделювання навантажень для уникнення перевантажень.

1.3. Основи технології V2G

Технологія Vehicle-to-Grid виникла на початку 2000-х років як концепція використання електромобілів не лише для пересування, а й як розподілених енергетичних ресурсів для підтримки стабільності електричних мереж [3,5]. Ідея полягає в двосторонньому обміні електроенергією між автомобілем і мережею: під час низького навантаження електромобіль заряджається від мережі (G2V – Grid-to-Vehicle), а під час пікового навантаження може повертати накопичену енергію назад у мережу (V2G – Vehicle-to-Grid). Також існують режими локального живлення, коли електромобіль забезпечує електроенергією окремі навантаження або будинки (V2L / V2H – Vehicle-to-Load / Vehicle-to-Home).

Архітектура V2G включає такі основні компоненти [3,4]:

1. Електромобіль з батареєю певної ємності та контролером енергоспоживання.
2. Зарядна станція, здатна підтримувати двосторонній потік енергії і передавати інформацію про стан батареї та напругу в мережі.
3. Програмне забезпечення для управління мережею, що дозволяє координувати зарядку і віддачу енергії з великої кількості електромобілів, враховуючи поточне навантаження, доступність відновлюваної енергії та пріоритети користувачів.
4. Комунікаційні протоколи (наприклад, ISO 15118, OCPP), які забезпечують безпечну та стандартизовану взаємодію між мережею та електромобілем.

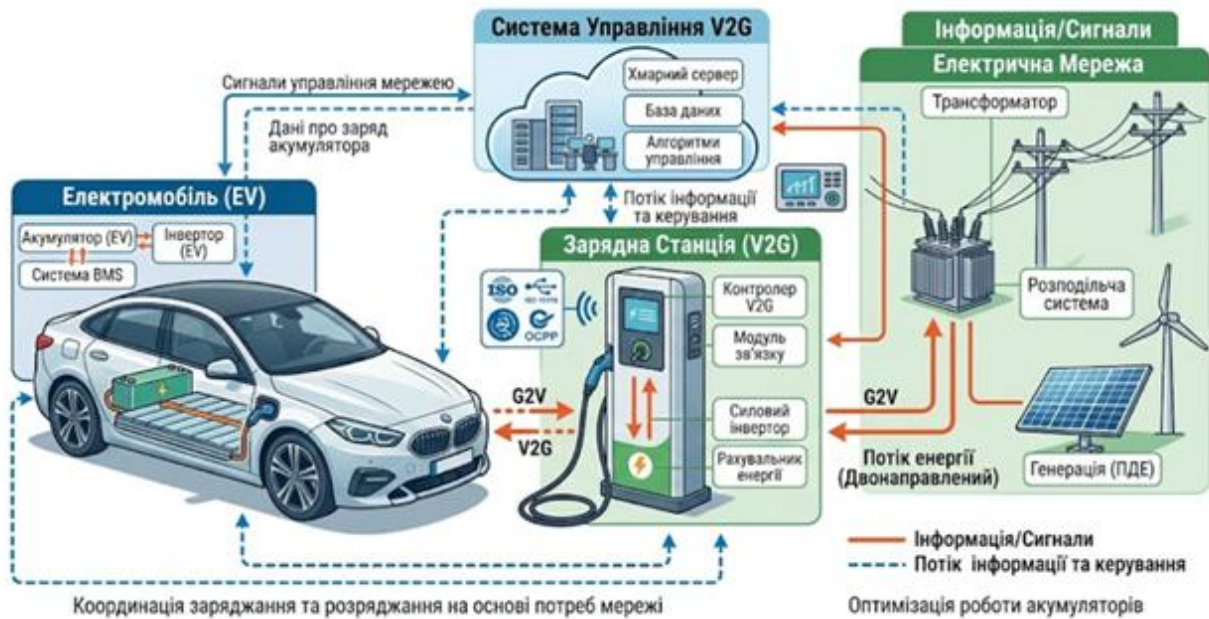


Рисунок 1.3 – Архітектура системи V2G, що включає електромобіль, зарядну станцію, мережу та систему управління

Режими роботи V2G можна класифікувати за призначенням:

- Регулювання пікового навантаження – електромобіль віддає енергію під час піків споживання, що зменшує перевантаження мережі і дозволяє економити на розширенні інфраструктури [3].
- Балансування частоти та напруги – швидкі цикли заряд/розряд допомагають підтримувати стабільну частоту та напругу в мережі [5].
- Акумуляування надлишкової відновлюваної енергії – у години надлишкової генерації від сонячних або вітрових станцій батареї електромобілів накопичують енергію, яку потім можна використати під час піків споживання [4].

Впровадження технології V2G має кілька важливих переваг [3,5]:

1. Покращення стабільності мережі – розподілені ресурси допомагають уникнути локальних перевантажень.
2. Економічна вигода для власників електромобілів – можливість заробітку за віддачу енергії в пікові години або участь у ринку балансуєчих послуг.

3. Стимулювання використання відновлюваної енергетики – накопичення надлишкової енергії підвищує ефективність інтеграції сонячних та вітрових джерел.

Разом з тим, існують і проблеми, що обмежують широке впровадження V2G [3,4]:

- Деградація акумуляторів через часті цикли заряд/розряд.
- Високі капітальні витрати на зарядні станції з підтримкою двостороннього потоку.
- Необхідність стандартизації протоколів та комунікацій для забезпечення сумісності між різними виробниками електромобілів та операторів мережі.

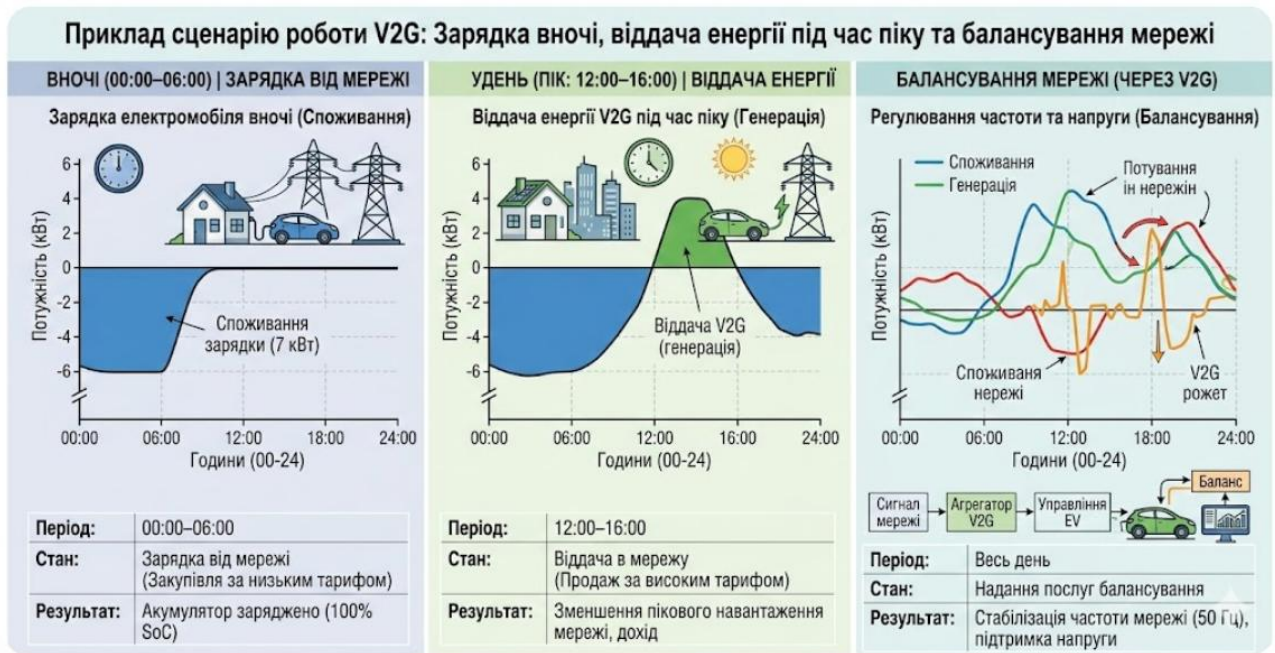


Рисунок 1.4 – Приклад сценарію роботи V2G: зарядка вночі, віддача енергії під час піку та балансування мережі

Впровадження технології V2G дозволяє не лише підвищити стабільність мережі, але й оптимізувати пропускну здатність, зменшити перевантаження і ефективно використовувати акумуляторні ресурси електромобілів.

Висновки розділу

У першому розділі було розглянуто сучасний стан розвитку електромобілів та їх взаємодію з розподільчими мережами, проаналізовано вплив на навантаження і пропускну здатність мережі, а також висвітлено основи технології V2G, її архітектуру та режими роботи. Було підкреслено, що електромобілі та V2G можуть виступати розподіленими енергетичними ресурсами для підвищення стабільності та ефективності розподільчого електропостачання.

2. МЕТОДИ ОЦІНКИ ТА ОПТИМІЗАЦІЇ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ РОЗПОДІЛЬЧИХ МЕРЕЖ ЗА УЧАСТЮ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ

Електромобілі розглядаються як перспективний напрям розвитку сучасного транспорту завдяки низькому рівню шуму, високій енергоефективності та відсутності локальних викидів шкідливих речовин. У контексті трансформації енергетики вони виступають не лише як споживачі електроенергії, а й як активні елементи енергосистеми. Саме тому електромобілі визначаються як один із ключових чинників розвитку нової енергетики [6].

З позиції енергосистеми електромобіль є особливою формою розподіленого накопичувача енергії. Завдяки специфічним характеристикам процесів заряду та розряду акумуляторної батареї, він може функціонувати не тільки як електричне навантаження, а й як джерело живлення для мережі. Реалізація технології Vehicle-to-Grid дає змогу повертати електроенергію з акумулятора транспортного засобу до мережі у періоди підвищеного попиту. У такому режимі електромобілі виконують функцію згладжування графіка навантаження – зменшення пікових значень та компенсації провалів споживання, що сприяє підтриманню балансу активної потужності та стабільності напруги в розподільчих мережах.

Стрімкий розвиток розподіленої генерації та електромобільного транспорту формує нову архітектуру електроенергетичної системи, у якій значна кількість джерел та накопичувачів енергії підключається безпосередньо до розподільчих мереж. Масове впровадження розподіленої генерації та електромобілів стає об'єктивною тенденцією розвитку енергетики майбутнього. На рисунку 2.1 наведено схему розподіленого електропостачання та підключення електромобілів до розподільчої мережі.



Рисунок 2.1 – Схема розподіленого електропостачання та підключення електромобілів до розподільчої мережі

Водночас інтеграція великої кількості розподіленої генерації та електромобілів супроводжується рядом технічних викликів. Невизначеність режимів роботи розподілених джерел, стохастичний характер процесів заряджання електромобілів, а також обмежена пропускну здатність елементів розподільчої мережі можуть призводити до перевантаження ліній, відхилень напруги, погіршення якості електроенергії та зниження надійності електропостачання.

У зв'язку з цим особливої актуальності набуває комплексна кількісна оцінка пропускну здатності розподільчої мережі щодо підключення електромобілів із реалізацією технології V2G. Така оцінка дозволяє:

- визначити гранично допустиму кількість електромобілів у вузлах мережі;
- обґрунтувати режими їх роботи (заряд/розряд);
- мінімізувати негативний вплив на параметри мережі;
- забезпечити безпечну експлуатацію обладнання;
- підвищити ефективність використання акумуляторних батарей.

Таким чином, дослідження застосування технологій V2G для оцінки впливу електромобілів на електричну мережу та акумулятори є необхідною передумовою раціонального планування розвитку розподільчих систем і забезпечення їх надійної та економічно ефективної роботи.

Продовжуючи розгляд питань інтеграції електромобілів та розподіленої генерації до розподільчих мереж, доцільно детальніше зупинитися на понятті пропускної здатності системи.

Під пропускною здатністю розподіленого електропостачання та електромобілів, підключених до мережі, слід розуміти такий граничний рівень їх потужності, за якого забезпечується виконання всіх технічних вимог до режимів роботи мережі та гарантується її безпечне й стабільне функціонування. Максимальна потужність розподіленої генерації та електромобілів, яку може прийняти електроенергетична система без порушення нормативних обмежень, є ключовим критерієм для визначення допустимого масштабу їх інтеграції [8].

Масштабне підключення розподілених джерел енергії та електромобілів, у тому числі з використанням технології V2G, з одного боку, підвищує гнучкість та адаптивність мережі, створює додаткові резерви регулювання потужності та сприяє покращенню надійності електропостачання. З іншого боку, за відсутності належного планування це може призвести до перевантаження ліній і трансформаторів, зростання втрат потужності, відхилень напруги та прискореного зносу обладнання.

Складність оцінювання пропускної здатності зумовлена стохастичним характером як розподіленої генерації (фотоелектричної та вітрової), так і процесів заряджання та розряджання електромобілів. Невизначеність погодних умов впливає на обсяги генерації, а поведінкові особливості користувачів – на графіки заряджання та можливості реалізації режиму V2G. У зв'язку з цим підходи до оцінювання пропускної здатності для розподілених генераторів і електромобілів мають багато спільних рис і можуть розглядатися комплексно.

Узагальнений підхід до дослідження включає такі етапи:

- аналіз особливостей підключення розподіленої генерації та електромобілів до розподільчої мережі з урахуванням можливості двонаправленого обміну енергією;
- формування системи індикаторів оцінювання пропускної здатності (відхилення напруги, перевантаження елементів мережі, втрати потужності, показники якості електроенергії) та вибір відповідних методів розрахунку;
- проведення аналізу невизначеної пропускної здатності з урахуванням випадковості генерації та режимів роботи електромобілів;
- розроблення заходів щодо підвищення пропускної здатності, зокрема шляхом оптимізації алгоритмів керування зарядом і розрядом у режимі V2G.

Таким чином, логічним продовженням попереднього аналізу є обґрунтування методів оцінювання пропускної здатності розподільчої мережі, що дозволяє визначити допустимий рівень інтеграції електромобілів і оцінити їх вплив як на параметри електричної мережі, так і на режими роботи акумуляторних батарей.

2.1 Підключення електромобілів до мережі

Сучасний стан розвитку розподіленої генерації та електромобілів, а також оцінка їх фактичного впливу на режими роботи мережі, саме ці чинники формують вихідні умови для застосування технологій V2G і визначення допустимого рівня інтеграції електромобілів.

Розподілена генерація охоплює відносно невеликі енергоустановки (до 50 МВт), що розміщуються поблизу споживача або безпосередньо на його території та можуть працювати автономно або паралельно з мережею. До основних видів розподіленої генерації належать вітрові установки, фотоелектричні системи, малі гідроелектростанції та установки на паливних елементах.

Вплив розподіленої генерації та електромобілів на розподільчу мережу

Інтеграція розподілених джерел енергії змінює традиційну структуру розподільчої мережі, яка історично функціонувала за радіальною схемою з одностороннім потоком потужності. Підключення розподіленої генерації здатне зменшувати навантаження на лінії електропередач, брати участь у регулюванні реактивної потужності та сприяти стабілізації напруги у вузлах мережі. Крім того, зростає рівень короткозамикальної потужності у точці приєднання, що може позитивно впливати на стійкість системи.

Водночас застосування силової електроніки у складі розподіленої генерації супроводжується появою гармонічних складових струму та напруги, що здатні погіршувати якість електроенергії та викликати резонансні явища [9]. Додатковим фактором є стохастичний характер генерації з відновлюваних джерел, який спричиняє коливання потужності та напруги.

Щодо електромобілів, їх масове підключення до мережі формує значний керований ресурс. За умови впорядкованого керування процесами заряджання та розряджання електромобілі можуть виконувати функції регулювання пікових навантажень і брати участь у балансуванні системи через реалізацію технології V2G [11]. Це відкриває можливості для використання електромобілів як розподілених накопичувачів енергії та резервних джерел живлення.

Однак у разі неконтрольованого заряджання великої кількості транспортних засобів можливе виникнення локальних піків навантаження, перевантаження трансформаторів і ліній, а також зниження економічної надійності мережі [12]. Додатково однофазні зарядні пристрої змінного струму можуть спричинити дисбаланс фаз і погіршення симетрії напруги.

Таким чином, сучасний стан розвитку розподіленої генерації та електромобілів створює передумови для активного застосування технологій V2G, однак одночасно потребує детальної оцінки їх впливу на режими роботи мережі та ресурс акумуляторних батарей.

2.2 Традиційні методи оцінки пропускної здатності розподільчої мережі

Подальшим етапом дослідження впливу електромобілів та розподіленої генерації на електричну мережу є аналіз підходів до визначення граничного рівня їх інтеграції. У відносно простих умовах функціонування мережі, коли частка розподілених джерел та електромобілів є невеликою, для оцінювання допустимого рівня підключення можуть застосовуватися традиційні методи, що базуються на спрощених розрахунках і забезпечують оперативне отримання результатів.

Пропускна здатність розподільчої мережі є багатофакторною характеристикою, яку неможливо коректно визначити на основі одного показника. Її оцінювання потребує комплексного підходу з урахуванням технічних, експлуатаційних та економічних критеріїв. Вибір методики та системи показників безпосередньо впливає на точність і достовірність отриманих результатів, що є особливо важливим у задачах оцінки впливу технологій V2G на мережу та акумуляторні батареї.

Система показників оцінки пропускної здатності

Інтеграція розподіленої генерації та електромобілів змінює структуру навантаження і режими живлення розподільчої мережі, що впливає на показники якості електроенергії, надійності та економічності. У практиці оцінювання пропускної здатності зазвичай розглядають дві групи показників:

- ✓ експлуатаційні показники, які відображають рівень надійності електропостачання та ступінь задоволеності споживачів;
- ✓ професійні (технічні) показники, що характеризують режими роботи мережі.

До основних технічних критеріїв належать показники якості електроенергії, пропускної здатності ліній, адаптивності мережі та надійності електропостачання. На практиці найчастіше застосовують чотири базові

індикатори: відхилення напруги, коливання напруги, гармонічні спотворення та трифазний дисбаланс.

Відхилення напруги

Після підключення розподілених джерел або електромобілів відбувається зміна потоків потужності, що безпосередньо впливає на рівень напруги у вузлах мережі [13]. Розподілена генерація може спричинити підвищення напруги та навіть реверсивні потоки потужності, тоді як масове заряджання електромобілів – її зниження.

Відхилення напруги визначається як відносна різниця між фактичним значенням напруги в точці контролю та її номінальним значенням:

$$\delta U = \frac{U_{re} - U_N}{U_N} \cdot 100\%, \quad (2.1)$$

де U_{re} – фактичне значення напруги;

U_N – номінальна напруга мережі.

Граничні значення відхилення регламентуються стандартом GB/T 12325-2008 та залежать від класу напруги мережі [14]. Дотримання цих меж є обов'язковою умовою визначення допустимого рівня інтеграції електромобілів.

Колівання напруги

На відміну від статичного відхилення, коливання напруги характеризують динамічні зміни її рівня, що виникають через зміну генерації або навантаження. Інтеграція розподіленої генерації та електромобілів може спричинити швидкоплинні зміни амплітуди напруги.

Колівання напруги визначаються як відношення різниці між максимальним і мінімальним значенням напруги протягом періоду до номінального значення:

$$d = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{U_N} \cdot 100\%, \quad (2.2)$$

Частота змін визначається як:

$$r = 2f_N, \quad (2.3)$$

де U_{\min} – мінімальне середньоквадратичне значення напруги;
 f_N – основна частота мережі [14].

Допустимі межі коливань регламентуються стандартом GB/T 12326-2008 і враховуються при оцінці допустимої частки електромобілів у мережі.

Гармонічні спотворення

Робота інверторів, випрямлячів та іншого силового електронного обладнання у складі розподіленої генерації та зарядних пристроїв електромобілів зумовлює появу вищих гармонік [15]. Надлишкові гармонічні складові призводять до додаткових втрат, перегріву обладнання та погіршення якості електроенергії [16].

Для оцінки рівня гармонічних спотворень зазвичай використовують коефіцієнт повних гармонічних спотворень напруги (THD_U):

$$THD_U = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^M U_h^2}}{U_1} \cdot 100\%, \quad (2.4)$$

де U_1 – діюче значення основної гармоніки;
 U_h – діюче значення h-ї гармоніки;
 M – максимальний порядок гармоніки.

Граничні значення встановлені стандартом GB/T 14549-1993.

Трифазний дисбаланс

При симетричному режимі роботи трифазної мережі напруги мають однакові амплітуди та зсув фаз 120° . Масове підключення однофазних зарядних пристроїв або нерівномірний розподіл генерації можуть порушувати цю симетрію.

Згідно з GB/T 12343-2008, допустимий рівень напруги зворотної послідовності не повинен перевищувати 2 % у нормальному режимі та 4 % короткочасно.

Для оцінювання дисбалансу використовують алгоритм відповідно до IEEE Std 1159 [17]:

$$U_{av} = \frac{U_{ab} + U_{bc} + U_{ca}}{3}. \quad (2.5)$$

$$\Delta U_i = \max \{|U_{ab} - U_{av}|, |U_{bc} - U_{av}|, |U_{ca} - U_{av}|\}. \quad (2.6)$$

$$\delta_U = \frac{\Delta U_l}{U_{av}} \cdot 100\%. \quad (2.7)$$

Традиційні методи оцінювання пропускної здатності

Задача визначення пропускної здатності є складною нелінійною багатоцільовою оптимізаційною проблемою [18]. Існуючі підходи можна умовно поділити на чотири основні групи.

Класичні математичні методи

Базуються на формалізації задачі у вигляді оптимізаційної моделі з подальшим застосуванням методів лінійного, квадратичного програмування або градієнтних алгоритмів. Наприклад, у [13] оптимізуються втрати в мережі та економічні показники, а у [19] пропускна здатність електромобілів визначається з урахуванням обмеження трансформаторної потужності.

Недоліком є необхідність спрощень (лінійність, фіксовані режими), що може знижувати точність при моделюванні стохастичного заряджання електромобілів або змінної генерації.

Метод аналізу чутливості

Оцінювання проводиться шляхом визначення впливу зміни вхідних параметрів на вихідні показники мережі. Такий підхід дозволяє виявити найбільш критичні вузли або параметри системи [20].

Метод є корисним для планування розміщення розподіленої генерації або визначення допустимого рівня проникнення електромобілів з урахуванням показників надійності.

Моделювання та імітаційні розрахунки

Передбачають створення детальної моделі розподільчої мережі з поступовим збільшенням частки розподіленої генерації або електромобілів до досягнення граничних значень показників [19, 21].

Перевагою є висока точність і можливість врахування складних режимів. Недоліком – обмежена універсальність, оскільки модель розробляється для конкретної мережі.

Методи комплексної оцінки

Передбачають багатокритеріальний аналіз із застосуванням зважування показників [22].

Такий підхід дозволяє поєднати технічні та експлуатаційні критерії, однак результати можуть залежати від суб'єктивності вибору вагових коефіцієнтів.

Кожен із розглянутих методів має власні переваги та недоліки. Класичні математичні методи забезпечують аналітичну строгість, але потребують спрощень. Методи чутливості дозволяють визначити критичні параметри, однак не завжди враховують взаємодію факторів. Імітаційні моделі дають детальну картину режимів роботи, проте є ресурсомісткими. Комплексні методи підходять для порівняльного аналізу альтернатив, але частково залежать від експертних оцінок.

2.3 Метод оцінки пропускної здатності з урахуванням невизначеності

Зі зростанням частки розподіленої генерації та електромобілів їх вплив на режими роботи мережі стає дедалі більш варіативним і складним для прогнозування. Невизначеність виробітку ВДЕ, стохастичний характер заряджання електромобілів, а також похибки прогнозування навантаження суттєво впливають на результати розрахунків [23].

За таких умов детерміновані підходи, що базуються на фіксованих параметрах, не забезпечують достатньої точності. Тому для коректної оцінки пропускної здатності розподільчої мережі необхідно застосовувати методи, які враховують імовірнісний характер генерації та споживання. Це особливо актуально в контексті технології V2G, де електромобілі виконують не лише функцію навантаження, а й джерела енергії, що додатково підвищує складність моделювання.

Моделювання невизначеностей розподіленої генерації

Вихідна потужність фотоелектричних та вітрових установок визначається метеорологічними умовами, сезонністю та добовими змінами. Для фотоелектричних систем характерне значне зростання виробітку в ясну погоду та різке зниження при хмарності або опадах. Вітрові установки, у свою чергу, залежать від швидкості та стабільності повітряних потоків.

Для опису невизначеності генерації застосовують:

- нечіткі моделі;
- ймовірнісні розподіли
- сценарний підхід.

Такі моделі дозволяють отримати більш реалістичну оцінку граничної частки інтеграції розподіленої генерації у мережу.

Моделювання невизначеностей електромобілів

Навантаження електромобілів формується під впливом технічних характеристик акумуляторів та поведінкових особливостей користувачів. Час

підключення, тривалість заряджання та просторовий розподіл транспортних потоків мають випадковий характер. У центральних районах міст електромобілі довше перебувають на стоянках і частіше підключаються до мережі, тоді як у приміських зонах потреба в заряджанні є менш інтенсивною.

Для прогнозування зарядного навантаження використовуються три основні підходи.

Метод Монте-Карло

Метод Монте-Карло базується на статистичному моделюванні великої кількості випадкових сценаріїв. Його блок-схема наведена на рисунку 2.2.

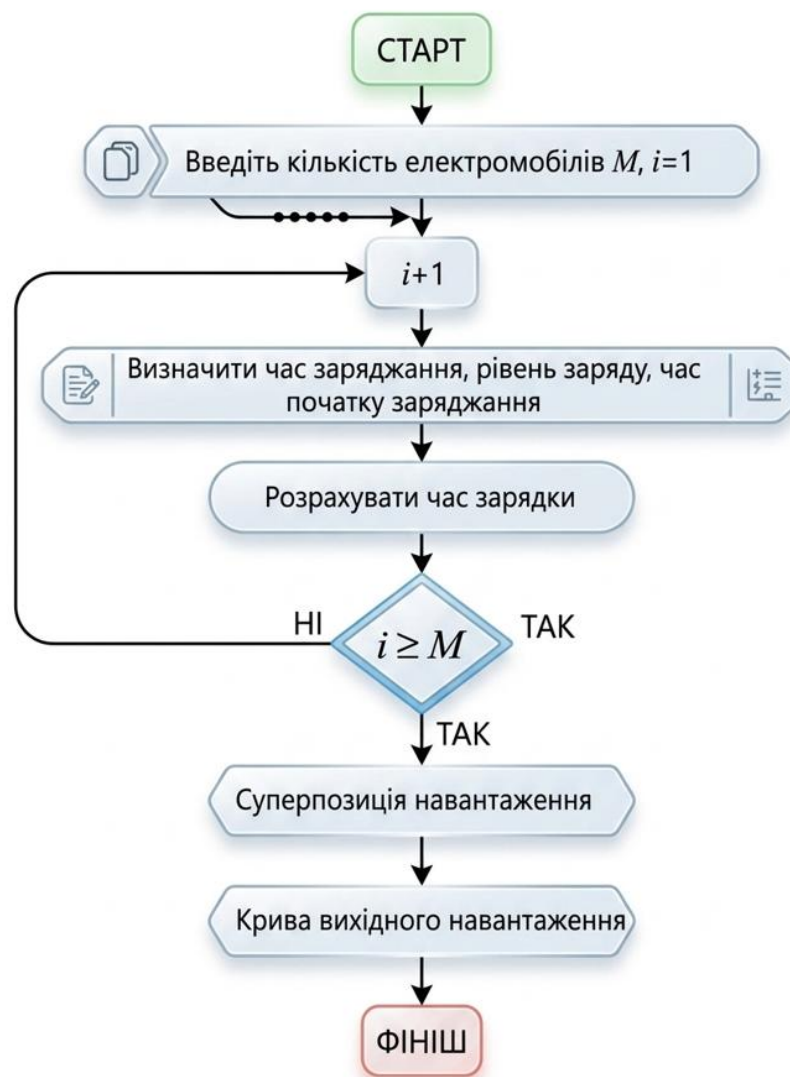


Рисунок 2.2 – Блок-схема методу Монте-Карло

Підхід дозволяє враховувати випадковість часу підключення, початкового рівня заряду та тривалості заряджання [24]. Перевагою є універсальність, однак точність результатів значною мірою залежить від обсягу статистичних даних.

Просторово-часова модель на основі ланцюга поїздок

Цей підхід описує добову активність водія як послідовність станів «рух-паркування-заряджання». Модель дозволяє визначити просторово-часовий розподіл навантаження з урахуванням маршрутів переміщення [25]. На рисунку 2.3 показано приклад добового ланцюга поїздок електромобіля.



Рисунок 2.3 – Діаграма щоденного ланцюга подорожей електромобіля

Порівняно з методом Монте-Карло, цей підхід точніше враховує просторову концентрацію зарядного навантаження.

Модель «транспортний засіб-дорога-мережа»

У межах цієї концепції розглядається взаємодія транспортної системи та електричної мережі. Враховується вплив дорожніх умов, маршрутів і структури міської інфраструктури на формування зарядного навантаження. Уніфікована схема такого моделювання наведена на рисунку 2.4.

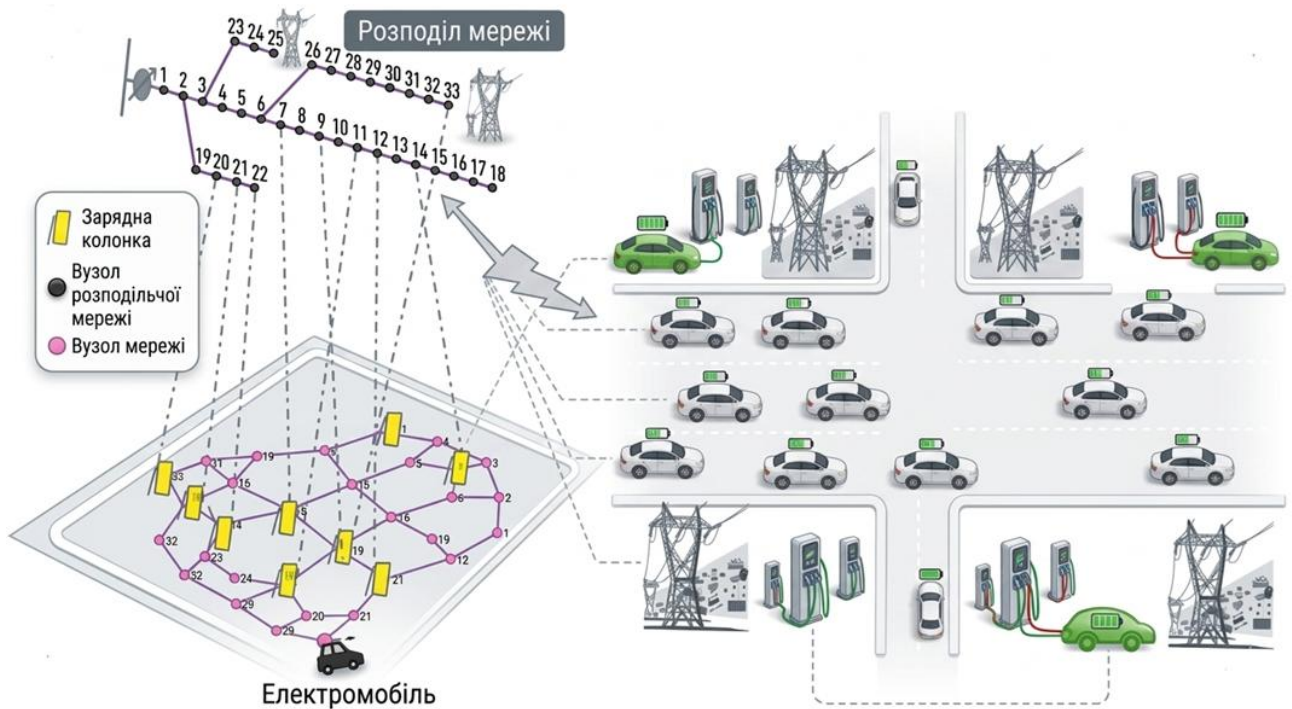


Рисунок 2.4 – Уніфікована схема моделювання режиму
«транспортний засіб-дорога-мережа»

Модель забезпечує високу деталізацію, проте потребує значних обчислювальних ресурсів.

Методи оцінки пропускної здатності в умовах невизначеності

З урахуванням стохастичних факторів методи оцінки пропускної здатності можна поділити на три групи.

1. Методи математичної оптимізації. Перевага – формалізованість і швидкість, недолік – похибки через спрощення.

2. Інтелектуальні алгоритми оптимізації. Вони дозволяють працювати з нелінійними моделями без лінеаризації, але можуть збігатися до локальних оптимумів.

3. Стохастичні методи аналізу. Базуються на випадковому генеруванні сценаріїв та статистичній обробці результатів [26]. Забезпечують адекватне врахування невизначеності, однак є обчислювально затратними.

Таким чином, перехід від детерміністичних до ймовірнісних методів є закономірним етапом розвитку підходів до оцінки пропускної здатності

розподільчої мережі в умовах зростання частки розподіленої генерації та електромобілів.

Математичні методи доцільні для задач планування за помірної невизначеності. Інтелектуальні алгоритми ефективні при складних нелінійних обмеженнях. Стохастичні підходи найбільш придатні для аналізу високої проникності електромобілів і режимів V2G.

Отже, врахування невизначеності є необхідною умовою об'єктивної оцінки впливу електромобілів та технологій V2G на режими роботи розподільчої мережі та ресурс акумуляторних батарей.

2.4 Методи підвищення пропускної здатності для електромобілів, підключених до розподільчої мережі

Визначення граничного рівня інтеграції є лише першим етапом. Наступним логічним кроком є розроблення та впровадження технічних і організаційних заходів, спрямованих на підвищення цієї пропускної здатності без зміни схеми мережі та без порушення умов її безпечної експлуатації.

У новій структурі розподільчої мережі неконтрольована інтеграція розподілених генераторів і електромобілів неминуче призводить до проблем якості електроенергії, перевантаження ліній і трансформаторів, відхилень напруги та зниження надійності електропостачання. Тому підвищення пропускної здатності повинно базуватися на комплексному управлінні режимами роботи електромобілів та локальних джерел енергії.

Основними напрямками підвищення пропускної здатності є:

- оптимізація стратегій заряджання та розряджання електромобілів;
- інтеграція електромобілів із розподіленими фотоелектричними системами;
- застосування технологій V2G;
- використання допоміжних технічних засобів регулювання режимів мережі.

Оптимізація стратегії заряджання електромобілів

Зарядне навантаження електромобілів має керований характер, що відрізняє його від традиційних споживачів. Це створює можливість активного впливу на графік навантаження розподільчої мережі.

У наукових дослідженнях запропоновано різні підходи до впорядкованого заряджання:

- Багатоцільова оптимізація, спрямована на мінімізацію коливань навантаження та вартості заряджання.
- Попереднє планування заряджання з урахуванням заявок користувачів і тарифів типу TOU (Time-of-Use).
- Двоетапні моделі заряджання-розряджання, де на першому етапі мінімізується максимальне добове навантаження, а на другому – оптимізується форма кривої навантаження з урахуванням участі електромобілів у регулюванні енергосистеми.
- Інтелектуальні алгоритми керування, зокрема евристичні методи та алгоритми оптимізації для великих груп електромобілів.

Використання технології V2G дозволяє електромобілям не лише споживати, а й віддавати енергію в мережу, що створює додатковий резерв гнучкості. При цьому ефективність реалізації таких стратегій значною мірою залежить від врахування інтересів користувачів, зокрема вартості заряджання, рівня заряду та стану акумулятора.

Попри значну кількість досліджень, більшість із них базується на якісному аналізі впливу впорядкованого заряджання. Кількісна оцінка підвищення пропускної здатності зазвичай виконується на основі таких показників:

- відхилення напруги у вузлах мережі;
- коефіцієнт перевантаження трансформаторів;
- пропускна здатність ліній;
- втрати активної потужності;
- зсув напруги та зміна профілю навантаження.

Комплексне врахування цих критеріїв дозволяє об'єктивніше оцінити ефективність впорядкованого заряджання порівняно з випадковим або тарифно-орієнтованим режимом.

Інтеграція електромобілів із розподіленими фотоелектричними системами

Одним із перспективних напрямів підвищення пропускної здатності є використання відновлюваних джерел енергії для локального живлення зарядної інфраструктури. Поєднання електромобілів із розподіленими фотоелектричними системами забезпечує такі переваги:

- зменшення навантаження на розподільчу мережу;
- підвищення рівня локального споживання сонячної енергії;
- зменшення необхідності встановлення дорогих систем накопичення енергії;
- зниження екологічного впливу.

Сонячна фотоелектрична зарядка передбачає перетворення постійного струму, що генерується сонячними панелями, в змінний струм за допомогою інвертора, після чого електроенергія може безпосередньо використовуватись для заряджання електромобілів або подаватися до мережі.

Інтегрована система «розподілена генерація – електромобіль» дозволяє:

- використовувати електромобілі як гнучкий споживач для згладжування коливань фотоелектричної генерації;
- реалізувати концепцію віртуальної електростанції;
- досягти ефекту «зрізання піків та заповнення провалів» у добовій кривій навантаження.

Крім фотоелектричних систем, можливе застосування змішаних відновлюваних джерел енергії та автономних зарядних станцій, що працюють у мережевому або ізольованому режимі.

Додаткові технічні заходи підвищення пропускної здатності

Окрім оптимізації заряджання та інтеграції з фотоелектричними системами, можливе застосування додаткових інженерних рішень:

1. Компенсація реактивної потужності. Використання статичних компенсаторів реактивної потужності або регулювання коефіцієнта потужності інверторів дозволяє зменшити перенапругу та стабілізувати профіль напруги.
2. Системи накопичення енергії. Акумуляторні системи можуть знижувати пікові навантаження, однак їх широке впровадження стримується високою вартістю.
3. Регулювання відгалужень трансформаторів під навантаженням. Гнучке керування коефіцієнтом трансформації дозволяє підтримувати допустимий рівень напруги при високій частці розподіленої генерації та електромобілів.
4. Державна підтримка та стимулювання інфраструктури. Субсидування будівництва зарядних станцій та розвиток технологій акумуляторів сприяють підвищенню рівня інтеграції електромобілів без перевантаження мережі.

Разом із підвищенням пропускної здатності розподільчої мережі та зростанням її гнучкості застосування технології V2G супроводжується додатковими режимами роботи акумуляторних батарей електромобілів. Двонаправлений обмін енергією змінює характер циклічності заряду та розряду, що потребує окремої оцінки впливу на ресурс та довговічність акумуляторної системи.

2.5 Вплив режиму V2G на ресурс акумуляторних батарей

Акумуляторна батарея є одним із найбільш вартісних і технічно відповідальних елементів електромобіля. Її експлуатаційний ресурс визначається кількістю повних та еквівалентних циклів заряд-розряд, глибиною розряду, температурним режимом та величиною струмових навантажень.

У традиційному режимі експлуатації електромобіль переважно працює за схемою «заряд від мережі-розряд під час руху». Реалізація технології V2G

змінює цю логіку, оскільки акумулятор додатково залучається до передачі електроенергії назад у мережу. Це призводить до збільшення кількості часткових циклів та зростання сумарної циклічної напрацювання батареї.

Деградація літій-іонних акумуляторів проявляється у зменшенні ємності та зростанні внутрішнього опору. Основними факторами, що впливають на швидкість деградації, є:

- глибина циклів заряд–розряд;
- середній рівень заряду (SOC);
- температура експлуатації;
- величина струму при заряджанні та розряджанні.

У режимі V2G особливого значення набуває глибина розряду, оскільки часті глибокі цикли можуть прискорювати втрату ємності. Водночас при обмеженні діапазону робочого SOC та застосуванні інтелектуальних алгоритмів керування негативний вплив може бути суттєво зменшений.

Таким чином, оцінка ефективності застосування технології V2G повинна враховувати не лише мережеві показники (відхилення напруги, перевантаження, втрати), але й зміну технічного стану акумуляторної батареї. Комплексний підхід дозволяє визначити оптимальний режим участі електромобілів у підтримці мережі без істотного скорочення їх ресурсу.

Висновки розділу

У розділі, відповідно до завдання, було розглянуто методи оцінки та оптимізації пропускної здатності розподільчих мереж за участю електромобілів, проаналізовано вплив електромобілів та технології V2G на параметри мереж і акумуляторних батарей, а також визначено підходи для підвищення ефективності інтеграції електромобілів у енергосистему та забезпечення стабільної пропускної здатності розподільчого електропостачання.

3 РОЗРАХУНОК ВПЛИВУ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ НА ПРОПУСКНУ ЗДАТНІСТЬ ТА СТАБІЛЬНІСТЬ РОЗПОДІЛЬЧОЇ МЕРЕЖІ

3.1 Вихідні дані та постановка задачі розрахунку

З метою кількісної оцінки впливу електромобілів на пропускну здатність розподільчої мережі розглядається типовий фрагмент міської мережі низької напруги 0,4 кВ, що живиться від трансформаторної підстанції 10/0,4 кВ. Такий вибір обумовлений тим, що саме мережі 0,4 кВ найбільш чутливі до масового підключення зарядних пристроїв електромобілів, оскільки мають відносно невелику потужність і обмежену допустиму перевантажувальну здатність.

Приймаємо, що підстанція обладнана силовим трансформатором номінальною потужністю $S_{mp} = 630 \text{ кВА}$ при номінальній напрузі низької сторони $U_n = 0,4 \text{ кВ}$.

Номінальний струм трансформатора визначається за відомим співвідношенням [27]:

$$I_{ном} = \frac{S_{mp}}{\sqrt{3}U_n}. \quad (3.1)$$

$$I_{ном} = \frac{630 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 400} = 909 \text{ А}.$$

З урахуванням допустимого тривалого завантаження (0,9 від номінального згідно з рекомендаціями [27, 29]) граничний робочий струм становить:

$$I_{доп} = 0,9I_{ном} = 818 \text{ А}. \quad (3.2)$$

У вечірній максимум навантаження базова повна потужність району без електромобілів приймається рівною $S_{баз} = 500 \text{ кВА}$.

Задача розрахунку полягає у визначенні:

- зміни завантаження трансформатора при масовому підключенні електромобілів;
- величини відхилення напруги в мережі 0,4 кВ;
- зростання втрат потужності;
- ефекту впровадження режиму V2G щодо зниження перевантаження;
- впливу додаткових циклів заряд–розряд на ресурс акумуляторних батарей.

3.2 Розрахунок додаткового навантаження в режимі G2V

Розглядається сценарій підключення 50 електромобілів із однофазними або трифазними зарядними пристроями потужністю 7 кВт. Оскільки одночасне підключення всіх транспортних засобів є малоімовірним, вводиться коефіцієнт одночасності $k_{od} = 0,6$ [28].

Сумарна активна потужність заряджання визначається:

$$P_{EM} = N \cdot P_{зар} \cdot k_{od}. \quad (3.3)$$

$$P_{EM} = 50 \cdot 7 \cdot 0,6 = 210 \text{ кВт}.$$

За коефіцієнта потужності $\cos \varphi = 0,95$ повна потужність становить:

$$S_{EM} = \frac{P_{EM}}{\cos \varphi} = 221 \text{ кВА}. \quad (3.4)$$

Сумарна потужність трансформатора в максимумі:

$$S_{\Sigma} = S_{баз} + S_{EM} = 500 + 221 = 721 \text{ кВА}. \quad (3.5)$$

Коефіцієнт завантаження трансформатора:

$$k_{зав} = \frac{721}{630} = 1,14. \quad (3.6)$$

Отже, трансформатор перевантажується на 14 %, що перевищує допустимі межі тривалої експлуатації [29] і може призвести до прискореного старіння ізоляції.

3.3 Оцінка відхилення напруги

Масове заряджання електромобілів викликає збільшення струму в лініях низької напруги, що призводить до падіння напруги.

Падіння напруги визначається за формулою [30]:

$$\Delta U = \frac{PR + QX}{U_n}, \quad (3.7)$$

де $R = 0,15 \text{ Ом}$; $X = 0,08 \text{ Ом}$; $Q = P \tan \varphi$; $\tan \varphi = 0,33$.

$$Q = 210 \cdot 0,33 = 69 \quad (3.8)$$

$$\Delta U = \frac{210 \cdot 0,15 + 69 \cdot 0,08}{400} = 9,2\%$$

Відповідно до стандарту EN 50160, допустиме відхилення напруги в мережах 0,4 кВ не повинно перевищувати ± 5 %. Отримане значення 9,2 % свідчить про вихід параметрів за нормативні межі.

3.4 Аналіз зростання втрат потужності

Втрати активної потужності пропорційні квадрату струму [31]:

$$\Delta P \sim I^2 \quad (3.9)$$

Збільшення струму з 909 А до 1040 А призводить до зростання втрат:

$$\left(\frac{1040}{909}\right)^2 = 1,31.$$

Таким чином, втрати зростають приблизно на 31 %, що негативно впливає на енергоефективність системи.

3.5 Розрахунок ефекту впровадження V2G

Передбачається, що 30 % електромобілів беруть участь у режимі V2G із потужністю віддачі 5 кВт кожний.

$$P_{V2G} = 15 \cdot 5 = 75 \text{ кВт}. \quad (3.10)$$

Ефективне навантаження:

$$P_{EM}^{ef} = 210 - 75 = 135 \text{ кВт} \quad (3.11)$$

$$S_{\Sigma}^{nog} = 500 + 142 = 642 \text{ кВА} \quad (3.12)$$

$$k_{зав}^{nog} = 1,02. \quad (3.13)$$

Таким чином, впровадження V2G практично усуває перевантаження трансформатора.

3.6 Оцінка впливу V2G на ресурс акумуляторних батарей

Для батареї ємністю $60 \text{ кВт} \cdot \text{год}$ при щоденному додатковому циклі глибиною 10 %:

$$E_{\text{рік}} = 60 \cdot 0,1 \cdot 365 = 2190 \text{ кВт} / \text{год}. \quad (3.14)$$

З урахуванням циклічної довговічності літій-іонних батарей 3000 циклів [32], додаткове використання ресурсу може зменшити строк служби на 12–15 %.

Висновки розділу

У третьому розділі виконано розрахункову оцінку впливу масового підключення електромобілів до мережі 0,4 кВ на її режимні параметри. Встановлено, що заряджання 50 електромобілів потужністю 7 кВт призводить до перевантаження трансформатора на 14 %, відхилення напруги до 9,2 % та зростання втрат потужності приблизно на 31 %. Показано, що застосування режиму V2G із залученням 30 % електромобілів дозволяє знизити навантаження та практично усунути перевантаження, однак супроводжується додатковим зменшенням ресурсу акумуляторних батарей на 12-15 %. Отже, ефективно впровадження V2G потребує комплексної оптимізації режимів роботи з урахуванням як мережевих параметрів, так і довговічності акумуляторів.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Вступ

Об'єктом дослідження в даній бакалаврській роботі є процеси підключення, експлуатації та дослідження режимів роботи бортових зарядних пристроїв електромобілів, зокрема в умовах їх взаємодії з розподільчими електричними мережами та реалізації режимів G2V і V2G. Виконання розрахунків, експериментальних досліджень і можливе впровадження відповідних технічних рішень передбачає роботу з електрообладнанням напругою до 1000 В, акумуляторними батареями високої енергоємності та силовими перетворювачами.

Експлуатація та обслуговування зарядної інфраструктури і бортових зарядних пристроїв пов'язані з підвищеною електронезбезпекою, ризиком виникнення коротких замикань, електричної дуги, пожежі, а також впливом електромагнітних полів і підвищених температур. За статистичними даними Державної служби України з питань праці, значна частка виробничого травматизму в електротехнічній галузі пов'язана саме з ураженням електричним струмом та порушенням правил безпечної експлуатації електроустановок [33].

Метою даного розділу є проведення аналізу небезпечних і шкідливих виробничих факторів при експлуатації та дослідженні бортових зарядних пристроїв електромобілів, а також розроблення організаційно-технічних заходів, спрямованих на забезпечення безпечних умов праці.

4.2 Аналіз небезпечних та шкідливих факторів

Аналіз безпеки об'єкта виконується відповідно до вимог ДСТУ 12.0.003.-74 «Небезпечні та шкідливі фактори. Класифікація» [34], згідно з яким усі фактори поділяються на фізичні, хімічні, біологічні та психофізіологічні.

Фізичні небезпечні та шкідливі фактори

Основними фізичними факторами при роботі із зарядними пристроями електромобілів є:

- підвищена напруга в електричних колах (до 400 В змінного струму та до 800 В постійного струму в сучасних електромобілях);
- можливість виникнення короткого замикання та електричної дуги;
- підвищена температура силових модулів;
- електромагнітне випромінювання від силових перетворювачів;
- шум від вентиляційних систем охолодження.

Найбільш небезпечним є ураження електричним струмом. Відповідно до Правил улаштування електроустановок (ПУЕ) [35], струм понад 50 мА змінного струму промислової частоти може становити смертельну небезпеку для людини.

На рисунку 4.1 наведено структурну схему зони потенційної електронебезпеки при підключенні електромобіля до мережі.

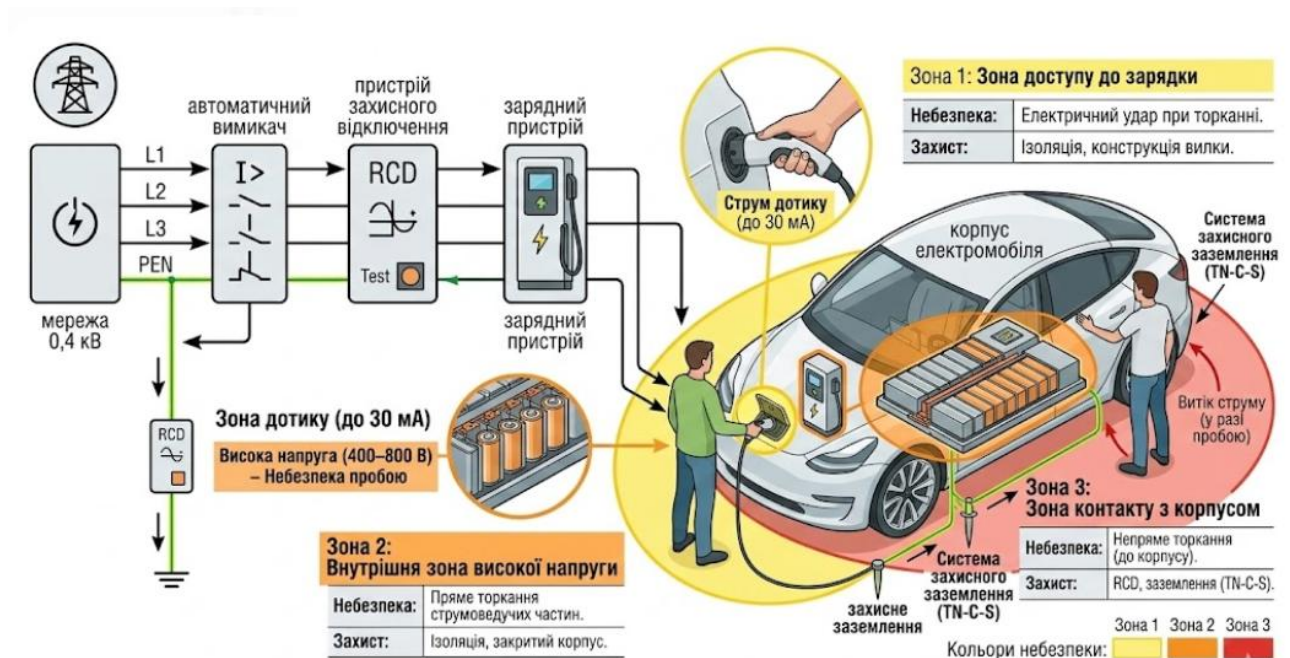


Рисунок 4.1 – Схема зон електронебезпеки при підключенні зарядного пристрою

Хімічні фактори

Акумуляторні батареї електромобілів містять літій-іонні елементи, які при пошкодженні можуть виділяти токсичні речовини або спричиняти термічний опік. У разі аварійної ситуації можливе виділення газів і займання електроліту.

Пожежна небезпека

Зарядні станції та бортові зарядні пристрої належать до електроустановок з підвищеною пожежною небезпекою. Згідно з ДБН В.1.1-7:2016, приміщення для розміщення електрообладнання повинні бути обладнані первинними засобами пожежогасіння та системами автоматичного відключення живлення при аварії.

На рисунку 4.2 наведено принципову схему протипожежного захисту робочої зони.



Рисунок 4.2 – Схема організації протипожежного захисту робочого місця

Психофізіологічні фактори

До психофізіологічних факторів належать підвищена відповідальність при роботі з електрообладнанням, нервово-емоційне навантаження, зорове напруження при проведенні вимірювань та аналізі параметрів мережі.

4.3 Організаційно-технічні заходи забезпечення безпеки

На основі проведеного аналізу пропонуються наступні заходи.

Електробезпека

1. Використання системи захисного заземлення відповідно до вимог ПУЕ [35].
2. Встановлення пристроїв захисного відключення (УЗО) з номінальним струмом спрацювання не більше 30 мА.
3. Застосування автоматичних вимикачів із характеристикою, що відповідає розрахунковим струмам короткого замикання.
4. Проведення періодичних вимірювань опору ізоляції та перевірки контуру заземлення.

Опір захисного заземлення повинен відповідати нормативу:

$$R_s \leq 4 \text{ Ом.}$$

для електроустановок до 1000 В [35].

Організаційні заходи

- допуск до роботи лише осіб з групою з електробезпеки не нижче III;
- проведення інструктажів з охорони праці;
- ведення журналу обліку перевірок електрообладнання;
- застосування знаків безпеки згідно ДСТУ ISO 7010.

Протипожежні заходи

- оснащення робочої зони порошковими або вуглекислотними вогнегасниками;
- заборона використання водяних засобів гасіння електрообладнання під напругою;
- встановлення систем автоматичного відключення живлення при перегріві.

4.4 Висновки до розділу

У розділі проведено аналіз небезпечних і шкідливих факторів, що виникають при експлуатації та дослідженні бортових зарядних пристроїв електромобілів, зокрема електронебезпеки, пожежної безпеки, впливу температурних і електромагнітних факторів. Встановлено, що основну небезпеку становить можливість ураження електричним струмом та виникнення коротких замикань.

На підставі аналізу запропоновано комплекс організаційно-технічних заходів, які включають застосування захисного заземлення, пристроїв захисного відключення, автоматичних вимикачів, протипожежних засобів, а також регламентування допуску персоналу до робіт. Реалізація зазначених заходів дозволяє забезпечити нормативний рівень безпеки праці при експлуатації та дослідженні зарядних пристроїв електромобілів.

ВИСНОВКИ

У першому розділі проаналізовано сучасний стан розвитку електромобілів та їх взаємодію з розподільчими мережами, показано вплив на навантаження і пропускну здатність мереж, а також висвітлено основи технології V2G як засобу підвищення стабільності та ефективності розподільчого електропостачання.

У другому розділі розглянуто методи оцінки та оптимізації пропускну здатності розподільчих мереж за участю електромобілів, проаналізовано вплив V2G на параметри мереж і акумуляторні батареї та визначено підходи для підвищення ефективності інтеграції електромобілів у енергосистему.

У третьому розділі виконано розрахункову оцінку впливу електромобілів на режим роботи розподільчої мережі та встановлено, що їх масове підключення може спричиняти перевантаження трансформаторів, наднормативні відхилення напруги та зростання втрат потужності.

У четвертому розділі проаналізовано небезпечні та шкідливі фактори, що виникають при експлуатації бортових зарядних пристроїв електромобілів, та розроблено комплекс організаційно-технічних заходів, спрямованих на забезпечення електробезпеки, пожежної безпеки та зниження виробничих ризиків.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. International Energy Agency (IEA). Global EV Outlook 2023: Accelerating EV Adoption. Paris: IEA, 2023.
2. Державна служба статистики України. Статистичний щорічник 2023. Київ, 2023.
3. Kempton, W., Tomić, J. Vehicle-to-Grid Fundamentals: Calculating Capacity and Net Revenue. *Journal of Power Sources*, 2005; 144: 268–279.
4. Lopes, J. A. P., Soares, F. J., Almeida, P. M. R. Integration of Electric Vehicles in the Electric Power System. *Proceedings of IEEE*, 2011; 99(1): 168–183.
5. Sioshansi, R. The Value of Vehicle-to-Grid (V2G) Integration with Renewable Energy. *Energy Economics*, 2012; 34(6): 2153–2163.
6. Zhou, Y.; Dai, J.; Yuan, H.; Lu, Y. Research on Demand Forecast and Planning Layout of Urban Electric Vehicle charging facilities. *Power Syst. Prot. Control* 2021, 49, 177–187.
7. Moloi, K.; Jordaan, J.A.; Hamam, Y. Optimal Power Grid Integration with Distributed Generation Using Genetic Algorithm. In *Proceedings of the 2021 Southern African Universities Power Engineering Conference/Robotics and Mechatronics/Pattern Recognition Association of South Africa (SAUPEC/RobMech/PRASA)*, Potchefstroom, South Africa, 27–29 January 2021; pp. 1–5.
8. Reddy, M.V.; Sodhi, R. A Modified S-Transform and Random Forests-Based Power Quality Assessment Framework. *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 2018, 67, 78–89.
9. Li, X.; Chen, H.; Du, D. Study on Influence of Electric Vehicle Charge/Discharge on Voltage Level of Active Distribution Network under Multi-period and variable Correlation. *Proc. CSEE* 2018, 38, 526–536.
10. Gong, Q.; Midlam-Mohler, S.; Marano, V.; Rizzoni, G. Study of PEV Charging on Residential Distribution Transformer Life. *IEEE Trans. Smart Grid* 2012, 3, 404–412.

11. Liu, X.; Zhou, R.; Zhang, Y.; Wu, S. Evaluation and Analysis of Electric Vehicle Charging Capability in Distribution Network. *Electr. Appl.* 2020, 39, 96–100.
12. GB/T 12326-2008; Power Quality Voltage Fluctuation and Flicker. The Standardization Administration of the People's Republic of China: Beijing, China, 2008; p. 20.
13. Zhao, Y.; Zhou, H.; Wang, Y.; Li, L.; Wei, C.; Wang, Z.; Zhuang, S. Research on Power quality of grid-connected wind power System Based on Fuzzy Comprehensive evaluation. *Renew. Energy* 2023, 41, 1368–1375.
14. Li, Q.; Dai, S.; Ding, T.; Chen, H.; Wang, Y.; Zeng, L. Comprehensive Evaluation of power quality and energy consumption of Low-voltage Distribution Network based on subjective and objective combination weighting Method. *Electr. Meas. Instrum.* 2020, 57, 52–59.
15. Qiu, J.; Chen, T. Review of Research on Distributed Power Planning in Distribution Network. *J. Northeast Dianli Univ.* 2017, 37, 89–92.
16. Li, S.; Ma, J.; Sun, Q.; Xu, H.; Huang, M. Capacity allocation of distributed power generation and energy storage in microgrids considering Uncertain output. *New Technol. Electr. Energy* 2016, 35, 21–28.
17. Murty, V.V.S.N.; Kumar, A. Optimal placement of DG in radial distribution systems based on new voltage stability index under load growth. *Int. J. Electr. Power Energy Syst.* 2015, 69, 246–256.
18. Zuo, Q.; He, H.; Liang, C.; Zhou, M.; Zhou, Q. A Quantitative Evaluation Method for Acceptance capacity of electric vehicles with Orderly Charging. *J. Power Syst. Autom.* 2017, 29, 6.
19. Huang, W.; Wu, J.; Lu, S.; Hao, L. Maximum photovoltaic penetration considering voltage deviation and harmonic constraints. *Power Syst. Prot. Control* 2016, 44, 49–55.
20. Li, X.; Wu, H.; Wang, W.; An, Q. Adaptability Evaluation of New Energy Grid Connection Based on Grid Carrying Capacity. *Proc. CSEE* 2023, 43, 107–113.

21. Hao, W.; Meng, Z.; Zhang, Y.; Xie, B.; Peng, P.; Wei, J. Research on Capacity evaluation Method of Distribution Network with Multi-distributed Power Supply Access in New power System. *Power Syst. Prot. Control* 2023, 51, 23–33.
22. Xu, S.; Li, Y. Optimal allocation of distributed wind generation including loads of electric vehicles. *Power Demand Side Manag.* 2019, 21, 11–15.
23. Xu, Q.; Cai, T.; Liu, Y.; Yao, L.; Zeng, P. Site planning of electric vehicle charging stations considering driver behavior and travel chain. *Power Syst. Autom.* 2016, 40, 59–65.
24. Hoke, A.; Butler, R.; Hambrick, J.; Kroposki, B. Steady-State Analysis of Maximum Photovoltaic Penetration Levels on Typical Distribution Feeders. *IEEE Trans. Sustain. Energy* 2013, 4, 350–357.
25. IEC 60076-7: Power transformers – Loading guide.
26. IEEE Std 1547-2018: Interconnection of Distributed Energy Resources.
27. ПУЕ. Правила улаштування електроустановок.
28. Kersting W. *Distribution System Modeling and Analysis*. CRC Press, 2012.
29. Grainger J., Stevenson W. *Power System Analysis*. McGraw-Hill, 1994.
30. Keil P., Jossen A. Aging of Lithium-Ion Batteries. *J. Electrochem. Soc.*, 2016.
31. Державна служба України з питань праці. Статистичні дані виробничого травматизму.
32. ДСТУ 12.0.003.-74 «Небезпечні та шкідливі фактори. Класифікація».
33. Правила улаштування електроустановок (ПУЕ).