

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

магістр

(назва освітнього ступеня)

на тему: Моделювання та оптимізація процесу заряджання електро- і
гібридних транспортних засобів із використанням відновлювальної енергії

Виконав(ла): студент(ка) 6 курсу, групи МАм-62
спеціальності 274

«Автомобільний транспорт»

(шифр і назва спеціальності)

Ребеза М.А.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Керівник

(підпис)

Рогатинський Р.М.

(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

(підпис)

П'єнтак М.Д.

(прізвище та ініціали)

Зав. кафедри

(підпис)

Цьонь О.П.

(прізвище та ініціали)

Рецензент

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет Факультет інженерії машин, споруд та технологій
(повна назва факультету)
Кафедра Кафедра автомобілів
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Цьонь О.П.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

«17» листопада 2025 р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня магістр
(назва освітнього ступеня)
за спеціальністю 274 «Автомобільний транспорт»
(шифр і назва спеціальності)
студенту Ребезі Миколі Андрійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Моделювання та оптимізація процесу заряджання електро- і гібридних транспортних засобів із використанням відновлювальної енергії

Керівник роботи Рогатинський Роман Михайлович, д.т.н., професор
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від « 14 » листопада 2025 року № 4/7-972

2. Термін подання студентом завершеної роботи 19 грудня 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи Технічні характеристики електричних і гібридних автомобілів.

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

1 Загально-технічний розділ. 2 Технологічний розділ. 3 Конструкторський розділ.
4 Науково-дослідний розділ. 5 Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях.

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

Класифікація основних типів електро- і гібридних транспортних засобів – 2А1.

Схемотехнічні рішення реалізації зарядних станцій – 2А1.

Схемотехнічні рішення приєднання відновлювальних джерел до мережі – 2А1.

Моделі зарядної станції з живленням від відновлювального джерела – 2А1.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	к.т.н. доц. Ткаченко І.Г.		
Безпека в надзвичайних ситуаціях	ст. викл. Стручок В.С.		

7. Дата видачі
завдання

17.11.2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Загально-технічний розділ	21.11.2025	
2	Технологічний розділ	26.11.2025	
3	Конструкторський розділ	5.12.2025	
4	Науково-дослідний розділ	12.12.2025	
5	Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	17.12.2025	
6	Оформлення графічної частини	19.12.2025	
7	Захист кваліфікаційної роботи магістра	22.12.2025	

Студент

(підпис)

Ребеза М.А.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Рогатинський Р.М.

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційної роботи магістра на тему: «Моделювання та оптимізація процесу заряджання електро- і гібридних транспортних засобів із використанням відновлювальної енергії».

Метою кваліфікаційної роботи магістра є розробка та наукове обґрунтування математичної моделі й стратегій керованого заряджання електро- та гібридних транспортних засобів із використанням енергії сонячних панелей.

Основні завдання, які необхідно вирішити у роботі:

- Проаналізувати сучасний стан і тенденції розвитку електромобільності та гібридності у світі й Україні, визначивши ключові фактори, що впливають на темпи впровадження електротранспорту.
- Дослідити стан зарядної інфраструктури та сформулювати основні виклики інтеграції заряджання з електричною мережею, з урахуванням локальних обмежень розподільчих мереж і пікових навантажень.
- Проаналізувати сучасний стан відновлювальної енергетики в Україні та обґрунтувати доцільність використання сонячних панелей як джерела енергії для заряджання електро- і гібридних транспортних засобів.
- Провести класифікацію основних типів транспортних засобів NEV, PHEV та fully EV і визначити їхні вимоги до режимів та потужностей заряджання, а також обмеження, що накладаються акумуляторними системами.
- Розробити технічну концепцію зарядної станції на базі сонячної генерації та виконати розрахунок ключових параметрів силової частини електромобіля і зарядної інфраструктури з визначенням числових характеристик основних елементів системи.
- Виконати розрахунок параметрів джерела енергії на сонячних батареях для забезпечення заданого режиму заряджання, врахувавши профілі генерації, можливості точки приєднання та обмеження перетворювального обладнання.
- Математично описати процес заряджання в системі сонячна панель – перетворювачі – зарядна станція – акумулятор транспортного засобу та

запропонувати 2–3 стратегії керованого заряджання з розрахунковим порівнянням їхньої ефективності за енергетичними, економічними й мережевими показниками.

Перший розділ кваліфікаційної роботи магістра, «Загально-технічний розділ», включає огляд сучасного стану та тенденцій розвитку електромобільності й гібридних технологій у світі та в Україні, аналіз наявної зарядної інфраструктури й ключових викликів її інтеграції з електричними мережами, а також оцінку поточного стану відновлювальної енергетики України.

Другий розділ, «Технологічний розділ», містить класифікацію основних типів електро- та гібридних транспортних засобів (HEV, PHEV, BEV) і визначення вимог до процесу заряджання залежно від типу силової установки та умов експлуатації.

У третьому розділі, «Конструкторський розділ», сформовано вихідні дані, допущення та сценарій використання зарядного комплексу, виконано розрахунок силової частини електромобіля та параметрів зарядної станції з урахуванням обмежень точки приєднання, а також здійснено розрахунок параметрів джерела енергії на сонячних батареях.

Четвертий розділ, «Науково-дослідний розділ», містить математичний опис процесу заряджання електромобілів у системі «сонячна генерація – мережа – зарядна інфраструктура – транспортний засіб», а також розробку та обґрунтування стратегій реалізації заряджання з використанням сонячної енергії з позицій підвищення енергоефективності.

У розділі «Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях» розглянуто основні небезпеки та ризики під час експлуатації електрифікованих транспортних засобів і зарядної інфраструктури, а також концепцію захисту населення і територій у разі загрози чи виникнення надзвичайних ситуацій.

Пояснювальна записка складається з п'яти розділів і 71 сторінка формату А4 та 8 аркушів формату А1 графічної частини і 8 сторінок додатків.

Ключові слова: гібридний автомобіль, сонячна панель, АКБ, електромобіль, зарядна станція.

ЗМІСТ

РЕФЕРАТ	4
ВСТУП	7
1 ЗАГАЛЬНО-ТЕХНІЧНИЙ РОЗДІЛ	9
1.1 Поточний стан електромобільності та гібридності у світі й Україні	9
1.2 Інфраструктура заряджання: стан, виклики інтеграції з мережею	14
1.3 Сучасний стан відновлювальної енергетики в Україні	18
1.2 Висновки та постановка завдання на магістерську роботу	22
2 ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ	24
2.1 Основні типи електро- і гібридних транспортних засобів та вимоги до заряджання	24
2.2 Технології заряджання та силова електроніка	29
2.3 Технічні рішення зарядної мережі на базі ВДЕ	33
3 КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ	37
3.1 Вихідні дані, прийняті допущення та сценарій використання	37
3.2 Розрахунок силової частини електромобіля	38
3.3 Розрахунок параметрів зарядної станції	43
3.4 Розрахунок джерела енергії на сонячних батареях	47
4 НАУКОВО-ДОСЛІДНИЙ РОЗДІЛ	53
4.1 Математичний опис процесу заряджання електромобілів	53
4.2 Стратегії реалізації заряджання з використанням сонячної енергії	57
5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	63
5.1 Небезпеки та ризики під час експлуатації електрифікованих транспортних засобів	63
5.2 Системний підхід до захисту населення і територій у разі загрози або виникнення надзвичайних ситуацій	65
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	68
БІБЛІОГРАФІЯ	70
ДОДАТКИ	72

ВСТУП

У сучасному світі електрифікація колісного транспорту набуває стрімкого розвитку, що зумовлено сукупністю технологічних, економічних та екологічних чинників. По-перше, зростає потреба зменшення залежності від викопних палив, обмеженість ресурсів яких поєднується з негативним впливом продуктів згоряння на якість повітря та стан довкілля. По-друге, посилюються міжнародні вимоги щодо скорочення викидів парникових газів і підвищення енергоефективності, що стимулює державні та корпоративні програми декарбонізації транспортного сектору. По-третє, інтенсивний розвиток акумуляторних технологій, силової електроніки та електроприводів забезпечує підвищення технічних характеристик електрифікованих транспортних засобів, зниження їх вартості та розширення доступності для споживачів. Як наслідок, зростання попиту на екологічно чистий транспорт супроводжується активним формуванням зарядної інфраструктури, що робить електромобільність більш практичною та привабливою в повсякденній експлуатації.

Виходячи з викладеного, тема даної роботи, присвячена моделюванню та оптимізації процесу заряджання електро- і гібридних транспортних засобів із використанням енергії сонячних панелей, є актуальною та практично значущою. Інтеграція відновлювальних джерел енергії в зарядну інфраструктуру дозволяє підвищити енергоефективність транспортної системи, збільшити частку чистої енергії у споживанні та зменшити пікові навантаження на електричні мережі.

Метою роботи є розробка та наукове обґрунтування математичної моделі й стратегій керованого заряджання електро- та гібридних транспортних засобів із використанням енергії сонячних панелей.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Проаналізувати сучасний стан і тенденції розвитку електромобільності та гібридності у світі й Україні, визначивши ключові фактори, що впливають на темпи впровадження електротранспорту.

2. Дослідити стан зарядної інфраструктури та сформулювати основні виклики інтеграції заряджання з електричною мережею, з урахуванням локальних обмежень розподільчих мереж і пікових навантажень.
3. Проаналізувати сучасний стан відновлювальної енергетики в Україні та обґрунтувати доцільність використання сонячних панелей як джерела енергії для заряджання електро- і гібридних транспортних засобів.
4. Провести класифікацію основних типів транспортних засобів NEV, PHEV та fully EV і визначити їхні вимоги до режимів та потужностей заряджання, а також обмеження, що накладаються акумуляторними системами.
5. Розробити технічну концепцію зарядної станції на базі сонячної генерації та виконати розрахунок ключових параметрів силової частини електромобіля і зарядної інфраструктури з визначенням числових характеристик основних елементів системи.
6. Виконати розрахунок параметрів джерела енергії на сонячних батареях для забезпечення заданого режиму заряджання, врахувавши профілі генерації, можливості точки приєднання та обмеження перетворювального обладнання.
7. Математично описати процес заряджання в системі сонячна панель – перетворювачі – зарядна станція – акумулятор транспортного засобу та запропонувати 2–3 стратегії керованого заряджання з розрахунковим порівнянням їхньої ефективності за енергетичними, економічними й мережевими показниками.

1 ЗАГАЛЬНО-ТЕХНІЧНИЙ РОЗДІЛ

1.1 Поточний стан електромобільності та гібридності у світі й Україні

Електромобільність у світі перейшла з фази технологічної новинки у фазу масового ринку. Це означає, що ключовими факторами розвитку стали не стільки окремі проривні рішення, скільки здешевлення батарей, нарощування виробничих потужностей, стандартизація зарядної інфраструктури та поява зрозумілих для споживача сценаріїв використання. Паралельно зростає роль гібридних технологій як перехідної ланки: гібриди залишаються важливими там, де є обмеження інфраструктури, значні пробіги або висока чутливість користувача до часу заправки чи заряджання. У підсумку ринок формується як багатокомпонентна екосистема, де повністю електричні транспортні засоби й різні типи гібридів не взаємовиключаються, а закривають різні потреби споживача та різні умови експлуатації.

У глобальному вимірі розвиток електромобільності підтримується поєднанням регуляторних, економічних та технологічних чинників. Регуляторно у багатьох країнах діють обмеження на викиди, цілі щодо декарбонізації та стимули для купівлі електромобілів і встановлення зарядної інфраструктури. Економічно електромобілі стають конкурентними завдяки нижчим витратам на енергію та технічне обслуговування, особливо у міських циклах із частими зупинками, де високий ККД електропривода дає помітну перевагу. Технологічно вирішальними стали зростання енергетичної щільності тягових батарей, покращення систем керування батареєю, розвиток силової електроніки та підвищення потужностей зарядних станцій. Водночас масовість привела й нові системні виклики: енергосистема повинна витримувати одночасні підключення великої кількості споживачів, а мережі розподілу у міських районах часто стають вузьким місцем, особливо за швидкого заряджання.

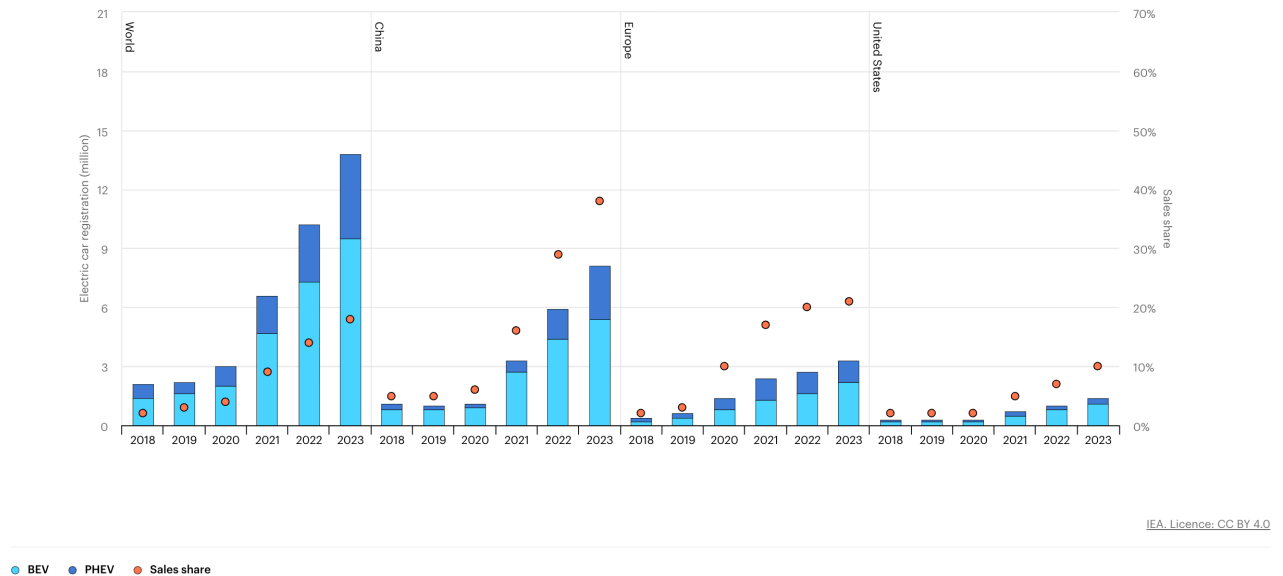


Рисунок 1.1 – Динаміка попиту на автомобілі з електричним приводом у світі

Гібридні транспортні засоби у глобальній структурі ринку відіграють стабілізуючу роль. Класичні гібриди з невеликою батареєю орієнтовані на підвищення паливної економічності й зниження викидів без необхідності зовнішнього заряджання. Плагін-гібриди створюють місток між ДВЗ-інфраструктурою та електричною інфраструктурою, дозволяючи частину пробігу проходити на електротязі, а решту забезпечувати двигуном внутрішнього згоряння. У практиці експлуатації це формує важливий нюанс: ефективність плагін-гібридів сильно залежить від дисципліни заряджання, оскільки без регулярного підключення до мережі їхні переваги різко зменшуються. Саме тому розвиток зарядної інфраструктури має прямий вплив не лише на частку повністю електричних авто, а й на реальну ефективність гібридного сегмента.

Для України електромобільність має особливий контекст. З одного боку, розвиток ринку відбувається на тлі структурних обмежень енергосистеми, нерівномірності розвитку розподільчих мереж, а також неоднакового доступу до сучасних зарядних станцій у різних регіонах. З іншого боку, спостерігається стабільний інтерес користувачів до електротранспорту як до способу зменшити експлуатаційні витрати та підвищити незалежність від коливань цін на паливо. Значну частину парку становлять імпортовані транспортні засоби, що зумовлює

різноманітність моделей, батарейних конфігурацій і стандартів заряджання.

Це ускладнює уніфікацію сервісної інфраструктури та підвищує вимоги до універсальності зарядних станцій, зокрема до підтримки різних режимів та протоколів взаємодії.

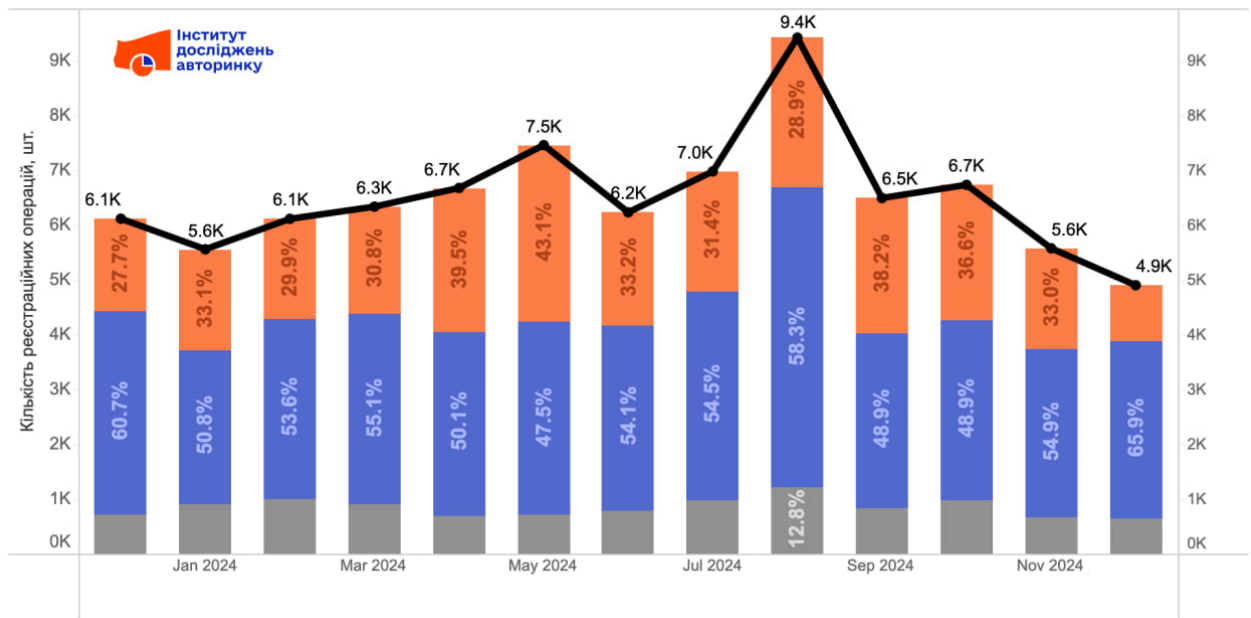


Рисунок 1.2 – Динаміка попиту на автомобілі з електричним приводом в Україні у 2024 році

Український ринок демонструє типову для перехідної фази картину: зростання кількості електромобілів супроводжується випереджальним розвитком повільного заряджання у місцях тривалого паркування й поступовим нарощуванням швидких станцій на магістральних напрямках та у великих містах. Більшість реальних сценаріїв заряджання відбувається тоді, коли транспортний засіб простоє тривалий час: уночі на житлових парковках, удень на робочих стоянках або в торговельно-офісних кластерах. Це створює фундамент для керованого заряджання, тому що за наявності тривалого вікна підключення можна змінювати потужність у часі, зменшувати піки та синхронізувати заряджання з генерацією відновлювальних джерел енергії. У свою чергу, швидке заряджання є критично важливим для міжміських поїздок, проте саме воно найбільш вимогливе до мережі та найчастіше формує локальні перевантаження, через які актуальними стають акумуляторні накопичувачі,

обмеження потужності та інтелектуальні алгоритми керування.

Поточний стан електромобільності доцільно розглядати через призму технічних параметрів, що визначають взаємодію транспортного засобу та зарядної інфраструктури. До таких параметрів належать ємність батареї, допустима потужність заряджання, час заряджання у типовому вікні підключення, а також енергоспоживання на одиницю пробігу. У реальних умовах користувач очікує прогнозованості: щоб транспортний засіб був готовий до поїздки у заданий час, а процес заряджання не створював критичних піків навантаження та надмірних витрат. Це означає, що питання заряджання стає не лише інфраструктурним, а й алгоритмічним: потрібні правила, за якими розподіляється потужність між автомобілями, як враховується доступна генерація сонячних панелей, які обмеження накладаються мережею і як система реагує на непередбачувані зміни, наприклад, хмарність або дострокове відключення автомобіля.

У гривнях за 1 кВт-год отриманої енергії, без урахування тарифів за простій

	 ECOFACTOR	 GO-TO-U	 TOKA	 EVA CHARGERS	 YASNO	 FLASH
«Повільне» заряджання  J1772/ Type1 AC Type2 AC GB/T AC	16,49	12,95	13,99	14,50	13,49	12,99
Швидке заряджання  CCS1 Combo CCS2 Combo GB/T DC CHAdeMO	17,49	16,99	17,99	16,00	16,99	16,49

Залежно від локації, ціни можуть відрізнятися, уточнюйте це у мобільних додатках операторів




Рисунок 1.3 – Ціни на електроенергію для електромобілів в Україні

Розвиток електромобільності також тісно пов'язаний із трансформацією енергетики. За традиційного підходу електромобіль є лише споживачем, який бере енергію з мережі. У сучасній концепції енергетичної гнучкості електромобіль та зарядна станція перетворюються на керований споживач,

здатний змінювати графік відбору енергії залежно від тарифів, завантаження мережі та наявності місцевої генерації. Для України, де потенціал сонячної генерації є суттєвим, а питання енергетичної стійкості має критичне значення, інтеграція сонячних панелей із зарядними станціями відкриває можливості зменшення навантаження на мережу та підвищення частки локально виробленої електроенергії. Водночас саме нерівномірність сонячної генерації у часі й сезоні робить необхідними математичне моделювання та оптимізацію режимів заряджання, щоб система працювала не за принципом максимального відбору тут і зараз, а за принципом досягнення цільового стану заряду з найкращими техніко-економічними показниками.

Таблиця 1.1 – Основні відмінності між HEV, PHEV та повністю електричними транспортними засобами з позиції зарядної інфраструктури та режимів енергоспоживання

Тип транспортного засобу	Джерело енергії для руху	Наявність зовнішнього заряджання	Типовий вплив на інфраструктуру	Практичний наслідок для керування заряджанням
HEV	Паливо + рекуперація, мала батарея	Ні	Зарядна інфраструктура не потрібна	Важливі алгоритми керування енергією у авто, але не мережеве керування зарядом
PHEV	Електротяга на частині маршруту + паливо	Так	Переважно повільне заряджання у місцях стоянки	Ефективність залежить від регулярності заряджання та оптимального часу підключення
Fully EV	Тяговий акумулятор як основне джерело	Так	Потребує системної інфраструктури АС і DC, можливі піки	Критично важливі обмеження потужності, планування у часі, узгодження з PV і мережею

Підсумовуючи, сучасний стан електромобільності та гібридності характеризується одночасним зростанням попиту на електротранспорт і

ускладненням вимог до енергетичної інфраструктури. У світі електромобільність дедалі більше визначається не лише параметрами автомобіля, а й інтеграцією з енергосистемою через кероване заряджання, тарифи, обмеження мережі та локальну генерацію. В Україні ці процеси мають посилену практичну значущість, оскільки поєднання економічної доцільності електротранспорту з потребою енергетичної стійкості робить особливо актуальними рішення, що зменшують пікові навантаження та підвищують частку енергії з відновлювальних джерел.

1.2 Інфраструктура заряджання: стан, виклики інтеграції з мережею

Інфраструктура заряджання є ключовою ланкою електромобільності, оскільки саме вона визначає практичну доступність електротранспорту, надійність його щоденної експлуатації та можливість масштабування парку без критичних наслідків для енергосистеми. На ранніх етапах розвитку ринку зарядна мережа часто формується фрагментарно: з'являються окремі пункти заряджання в місцях найбільшого попиту, а питання узгодження з розподільчими мережами та планування потужностей вирішуються локально. У міру зростання кількості електромобілів інфраструктура переходить у системний режим розвитку, коли важливим стає не лише збільшення кількості зарядних точок, але й керованість навантаження, стандартизація технічних рішень, прогнозування попиту та забезпечення електричної безпеки.

Стан сучасної зарядної інфраструктури доцільно розглядати через класифікацію за місцем розташування та режимом експлуатації. Найбільш масовим сценарієм є заряджання в місцях тривалого паркування, де автомобіль може бути підключений на багато годин. До цієї групи належать житлові парковки, приватні домогосподарства, стоянки біля офісів та підприємств. Технічно тут домінують зарядні пристрої змінного струму, які мають помірні вимоги до приєднання, забезпечують достатній рівень енергії за час нічної або денного простою та краще піддаються керуванню потужністю. Інша група – публічні зарядні станції в транспортних вузлах і місцях короткочасного

перебування, де водій очікує швидкого поповнення запасу енергії. Тут переважають рішення постійного струму з високою потужністю, що значно скорочують час заряджання, але створюють суттєві пікові навантаження на локальну мережу. Окремим сегментом виступає інфраструктура для комерційних парків та логістики, де заряджання організовується як технологічний процес підприємства з власними графіками, прогнозованим попитом і потенціалом оптимізації за ціною та потужністю.



Рисунок 1.4 – Громадська зарядна станція для електромобілів

З технічної точки зору зарядна інфраструктура є сукупністю елементів, які мають працювати узгоджено: зарядний пристрій, система захисту та обліку, комунікаційний модуль, іноді локальний контролер керування навантаженням, а також електричне приєднання до мережі. У простому випадку зарядний пристрій працює як нерегульоване навантаження: при підключенні автомобіля він намагається заряджати з максимально можливою потужністю, обмеженою самим зарядним пристроєм і можливостями автомобіля. Проте за зростання кількості одночасних підключень такий підхід швидко стає проблемним, оскільки у години пікового попиту сумарна потужність може перевищити допустимі значення для трансформаторної підстанції, кабельних ліній або захисної апаратури. Тому сучасний стан інфраструктури характеризується переходом від простої установки зарядних точок до впровадження функцій

керування навантаженням, коли потужність заряджання розподіляється між автомобілями в часі, а система враховує обмеження мережі та бажаний рівень заряду до заданого часу.

Інтеграція зарядної інфраструктури з мережею має низку принципових викликів. Перший виклик пов'язаний із піковими навантаженнями та локальною перевантаженістю розподільчих мереж. Навіть якщо сумарне добове споживання електроенергії на заряджання не є критичним у масштабі регіону, локально в межах одного житлового кварталу чи бізнес-центру одночасне підключення десятків автомобілів може створити перевищення допустимих струмів і падіння напруги. Особливо гостро це проявляється для швидких зарядних станцій постійного струму, де одна зарядна сесія може відповідати потужності, порівнянній із навантаженням невеликої будівлі. Таким чином, масштабування інфраструктури без керування навантаженням часто вимагає дорогих мережевих реконструкцій, які можуть бути економічно невиправданими для власника об'єкта або тривалими за строками реалізації.

Другий виклик полягає у якості електроенергії та впливі силової електроніки на мережу. Зарядні пристрої використовують перетворювачі, що формують струм із високими вимогами до стабільності, коефіцієнта потужності та гармонічних спотворень. Для великих груп зарядних пристроїв питання гармонік, реактивної потужності та коливань напруги може переходити з локальної технічної проблеми у системну, особливо в слабких мережах з великим опором ліній. Це означає, що при проектуванні інфраструктури необхідно враховувати не лише номінальну потужність, а й режими роботи перетворювачів, наявність корекції коефіцієнта потужності та узгодження із параметрами мережі на точці приєднання.

Третій виклик пов'язаний з невизначеністю попиту та поведінкою користувачів. У реальних умовах важко точно передбачити, коли і на який час буде підключено транспортний засіб, який рівень заряду потрібен і як швидко користувач очікує отримати результат. Для мережі це означає, що навантаження стає стохастичним і може різко змінюватися протягом короткого часу. Відповіддю на цей виклик є застосування алгоритмів керованого заряджання, які

працюють у режимі реального часу, перераховують доступну потужність та коригують профілі заряджання з урахуванням поточних обмежень. Такі алгоритми повинні враховувати пріоритети: наприклад, забезпечення мінімального рівня заряду для всіх підключених автомобілів або надання підвищеної потужності тим, хто має найкоротший час до виїзду.

Четвертий виклик стосується економіки приєднання та експлуатації. Для багатьох об'єктів суттєвою складовою витрат є не лише спожита електроенергія, а й плата за приєднану потужність або за пікові значення навантаження. Це формує техніко-економічну задачу: навіть якщо є можливість заряджати швидко, економічно вигідніше обмежувати піки, розтягувати заряджання у часі та використовувати енергію тоді, коли вона дешевша або коли є локальна генерація. Таким чином, інфраструктура заряджання поступово перетворюється на енергетичну систему з керованим профілем споживання, де оптимізація за витратами та обмеженнями мережі стає настільки ж важливою, як і сама наявність зарядних точок.

Окремий аспект інтеграції з мережею – взаємодія зарядної інфраструктури з відновлювальними джерелами енергії, зокрема з сонячними панелями. Локальна сонячна генерація є природним партнером для заряджання, оскільки в багатьох випадках її пікова продуктивність припадає на денні години, коли автомобілі можуть бути припарковані на робочих стоянках або у комерційних зонах. Проте сонячна генерація має змінний характер і залежить від погоди, тому вона не може гарантувати задану потужність заряджання у кожен момент часу. Це створює додатковий виклик: необхідно узгодити стохастичний характер генерації з вимогами до заряджання, що досягається або через використання накопичувачів енергії, або через інтелектуальне планування зарядного процесу, коли автомобілям розподіляється енергія з урахуванням прогнозу генерації та доступного часу підключення. Саме тут математичне моделювання стає ключовим інструментом, оскільки дозволяє оцінити, яку частку енергії реально можна покрити сонячними панелями, які потужності потрібні для зарядних пристроїв і як зміняться піки відбору з мережі за різних стратегій керування.

Таблиця 1.2 – Типові рішення зарядної інфраструктури та їхнього впливу на мережу

Тип інфраструктури	Типовий режим заряджання	Вимоги до мережі на точці приєднання	Характер навантаження	Основний мережевий ризик
Житлове/домашнє	Повільне АС	Невисокі, але множинні підключення	Тривале, переважно вечір/ніч	Локальні піки в житлових кварталах, падіння напруги
Робочі стоянки/офіси	Повільне/середнє АС	Середні, піддається керуванню	Тривале, денний профіль	Перевищення лімітів приєднання без керування потужністю
Публічні швидкі станції	Швидке DC	Високі, часто потребує окремих техумов	Короткочасні високі піки	Перевантаження підстанцій/ліній, дороги підсилення мережі
Комерційні парки	Залежить від графіка, часто кероване	Суттєві, але прогнозовані	Планове, можливе нічне	Висока сумарна потужність, потреба в оптимізації піків і тарифів

1.3 Сучасний стан відновлювальної енергетики в Україні

Відновлювальна енергетика в Україні пройшла шлях від точкових проєктів до вагомого сегмента енергосистеми, який впливає на режими генерації, балансування та планування мережевої інфраструктури. Її розвиток визначався поєднанням економічних стимулів, технологічного прогресу та потреби у диверсифікації енергоресурсів. У сучасних умовах відновлювальні джерела енергії розглядаються не лише як інструмент скорочення викидів, а й як складова

енергетичної стійкості та локальної автономності, що має особливе значення для об'єктів критичної інфраструктури, підприємств і міських енергосистем. Разом із тим інтеграція ВДЕ в національну енергосистему супроводжується технологічними викликами, головним з яких є нерівномірність генерації та потреба в гнучкості, яка має забезпечуватися або керованими електростанціями, або накопичувачами, або керованими споживачами.

Під відновлювальною енергетикою в Україні зазвичай мають на увазі сукупність технологій, що використовують сонячну, вітрову, гідро- та біоенергетичну складові. Кожен із цих напрямів має свої переваги та обмеження, але загальною рисою є залежність від природних умов і, відповідно, варіативність вихідної потужності у часі. Гідроенергетика характеризується відносно високою керованістю у порівнянні з сонячною та вітровою, проте обмежена географічними та екологічними факторами, а її потенціал на рівні великих приростів є обмеженим. Біоенергетика здатна забезпечувати більш прогнозовану генерацію, оскільки спирається на паливні ресурси біогенного походження, але при цьому залежить від логістики сировини та економіки постачань. Сонячна та вітрова енергетика демонструють високий потенціал масштабування, проте саме вони створюють найбільший запит на балансування через нерівномірний характер виробітку.

У сучасній енергосистемі України у реаліях постійних пошкоджень класичних генеруючих об'єктів внаслідок обстрілів роль сонячної енергетики є особливо важливою, оскільки вона потенційно може бути інтегрована як у великі генеруючі об'єкти, так і в розподілені системи на дахах будівель, підприємствах, логістичних центрах та в інфраструктурі заряджання електротранспорту. Сонячна генерація має чітко виражену добову структуру: максимальна потужність зазвичай формується у денні години, тоді як вранці та ввечері виробіток різко знижується. Сезонний фактор також суттєвий: у зимові місяці зменшується тривалість світлового дня, частіше спостерігаються хмарні періоди, а кут падіння сонячного випромінювання є менш сприятливим. Таким чином, навіть за однакової встановленої потужності сонячні електростанції дають нерівномірний внесок у покриття навантаження протягом року. Для практичних

енергетичних застосувань, таких як заряджання електромобілів, це означає необхідність переходу від оцінювання річного виробітку до аналізу погодинних та добових профілів генерації, оскільки саме вони визначають можливість безпосередньої синхронізації заряджання з відновлювальною енергією.

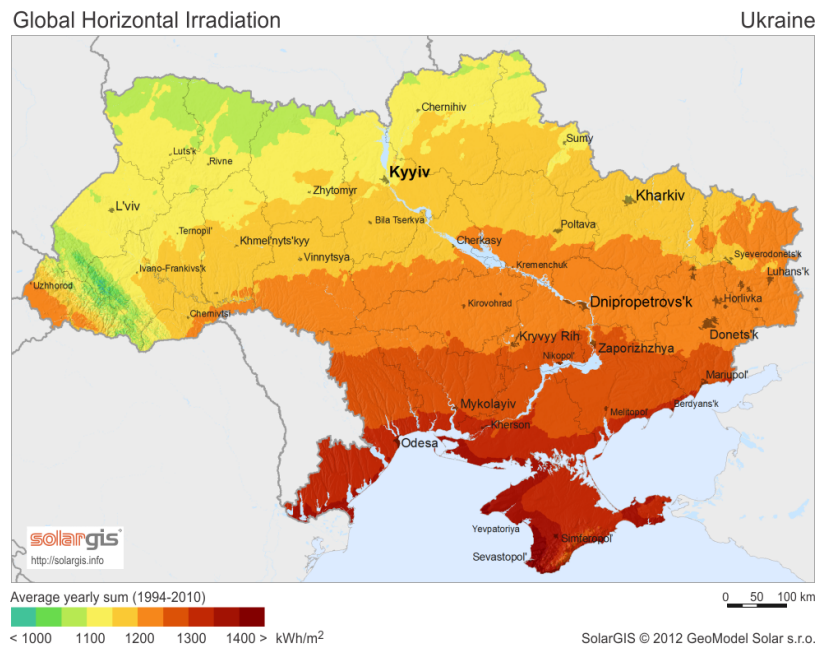


Рисунок 1.5 – Розподіл потужності сонячної енергії по регіонах України

Стан відновлювальної енергетики в Україні можна також охарактеризувати через розвиток розподіленої генерації, яка змінює саму логіку енергопостачання. Якщо у традиційній моделі електроенергія надходить від великих електростанцій через магістральні та розподільчі мережі до споживача, то при розподіленій генерації частина енергії виробляється безпосередньо в місці споживання або поблизу нього. Це зменшує втрати на передачі та може знижувати навантаженість мережевої інфраструктури, але водночас створює нові режими роботи мережі, зокрема можливість зворотних перетоків потужності та підвищені вимоги до автоматизації й захисту. У випадку сонячної енергетики, коли генерація може перевищувати локальне споживання у денні години, мережа повинна або прийняти надлишок енергії, або локальна система повинна мати механізм її використання чи накопичення. Саме тому інтеграція ВДЕ тісно пов'язана з накопичувачами енергії та керованими навантаженнями, до яких відноситься і зарядна інфраструктура.

Одним із ключових технологічних викликів для України є забезпечення гнучкості енергосистеми. Гнучкість означає здатність швидко змінювати баланс генерації та споживання у відповідь на коливання попиту або виробітку ВДЕ. У системі з високою часткою сонячної та вітрової енергії типова ситуація полягає в тому, що вдень, коли сонячна генерація максимальна, енергосистема може відчувати надлишок, тоді як увечері, коли споживання часто зростає, а сонячна генерація падає, виникає дефіцит. Це формує характерний ефект різких перепадів необхідної керованої генерації протягом доби. Для України, де частина генерації має обмежені можливості швидкого маневрування, питання гнучкості стає центральним у контексті подальшого збільшення частки ВДЕ. З технічної точки зору вирішення задачі гнучкості базується на поєднанні декількох підходів: використання маневрових електростанцій, застосування накопичувачів енергії, розвиток міжсистемних перетоків та впровадження керованого попиту, який може змінювати споживання залежно від доступної генерації.

У контексті даної роботи найбільш важливим є те, що заряджання електро- та гібридних транспортних засобів може виступати саме таким керованим попитом. Якщо зарядна інфраструктура працює в режимі некерованого навантаження, вона підсилює піки й збільшує потребу в резервній генерації. Якщо ж заряджання є керованим, воно може споживати більше електроенергії у години високої сонячної генерації, зменшуючи відбір із мережі у пікові вечірні години та знижуючи навантаження на розподільчі мережі. Для України це особливо актуально, оскільки розподілена сонячна генерація може бути локально інтегрована в об'єкти зарядної інфраструктури, зокрема на парковках підприємств, торгових центрів, громадських просторів та у транспортних хабах. Таким чином, зарядна станція з сонячними панелями може розглядатися як елемент, що одночасно вирішує дві задачі: підвищує частку ВДЕ у транспортному секторі та зменшує мережеві ризики за рахунок оптимізованих профілів споживання.

Разом із перевагами ВДЕ існують і обмеження, які визначають межі їхнього ефективного застосування. Найважливішим є фактор прогнозованості. Для сонячної генерації прогнозування можливе, але воно завжди має похибку

через швидкі зміни хмарності та атмосферних умов. Це означає, що система управління зарядної станції повинна бути стійкою до відхилень прогнозу та мати адаптивний механізм корекції графіка заряджання. Іншим обмеженням є сезонність: взимку сонячна генерація може бути недостатньою для суттєвого покриття енергії заряджання, тому система повинна мати резервний канал енергопостачання з мережі або використовувати накопичувач. Додатково слід враховувати технічні обмеження мережі, особливо в точках приєднання з низькими лімітами потужності або зі значною чутливістю до коливань напруги. У таких випадках навіть відносно невеликі об'єкти розподіленої генерації можуть потребувати технічних рішень для стабілізації режимів, наприклад, налаштування інверторів, впровадження систем компенсації або обмеження експорту потужності в мережу.

1.4 Висновки та постановка завдання на магістерську роботу

Проведений аналіз підтверджує актуальність дослідження процесів заряджання електро- і гібридних транспортних засобів у сучасних умовах. Зростання кількості електромобілів і плагін-гібридів супроводжується збільшенням навантаження на розподільчі мережі, появою локальних піків потужності та підвищенням вимог до керованості зарядної інфраструктури. Одночасно розвиток відновлювальної енергетики в Україні, зокрема сонячної генерації, формує технічну можливість частково покривати потреби заряджання локальною енергією, однак нерівномірність виробітку та залежність від погодних факторів потребують застосування математичного моделювання й оптимізаційних підходів. У таких умовах розроблення та обґрунтування технічних рішень зарядних станцій на базі сонячних панелей і стратегій керування зарядним процесом є важливим кроком для підвищення енергоефективності, зменшення мережевих ризиків та покращення екологічних показників транспортного сектору.

Для досягнення мети магістерської роботи необхідно вирішити такі задачі у відповідних розділах:

1. Проаналізувати сучасний стан і тенденції розвитку електромобільності та гібридності у світі й Україні, визначивши ключові фактори, що впливають на темпи впровадження електротранспорту.
2. Дослідити стан зарядної інфраструктури та сформулювати основні виклики інтеграції заряджання з електричною мережею, з урахуванням локальних обмежень розподільчих мереж і пікових навантажень.
3. Проаналізувати сучасний стан відновлювальної енергетики в Україні та обґрунтувати доцільність використання сонячних панелей як джерела енергії для заряджання електро- і гібридних транспортних засобів.
4. Провести класифікацію основних типів транспортних засобів HEV, PHEV та fully EV і визначити їхні вимоги до режимів та потужностей заряджання, а також обмеження, що накладаються акумуляторними системами.
5. Розробити технічну концепцію зарядної станції на базі сонячної генерації та виконати розрахунок ключових параметрів силової частини електромобіля і зарядної інфраструктури з визначенням числових характеристик основних елементів системи.
6. Виконати розрахунок параметрів джерела енергії на сонячних батареях для забезпечення заданого режиму заряджання, врахувавши профілі генерації, можливості точки приєднання та обмеження перетворювального обладнання.
7. Математично описати процес заряджання в системі сонячна панель – перетворювачі – зарядна станція – акумулятор транспортного засобу та запропонувати 2–3 стратегії керованого заряджання з розрахунковим порівнянням їхньої ефективності за енергетичними, економічними й мережевими показниками.

2 ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ

2.1 Основні типи електро- і гібридних транспортних засобів та вимоги до заряджання

Класифікація електро- і гібридних транспортних засобів має не лише описовий характер, а й безпосередньо визначає вимоги до зарядної інфраструктури, режимів заряджання, параметрів силової електроніки та алгоритмів керування енергетичними потоками. На практиці різниця між HEV, PHEV та повністю електричними транспортними засобами проявляється у трьох ключових аспектах: у ролі тягової батареї в забезпеченні руху, у необхідності зовнішнього заряджання та у допустимих потужностях зарядного процесу. Від цих аспектів залежать як технічні вимоги до зарядної станції, так і критерії оптимізації заряджання, зокрема коли зарядна інфраструктура інтегрована з сонячними панелями та працює в умовах обмежень мережі.

Класичні гібриди (HEV) є транспортними засобами, у яких основним джерелом енергії залишається паливо, а електрична складова виконує допоміжну функцію. Електродвигун у таких системах використовується для рекуперації, старту, руху на малих швидкостях та підвищення ефективності двигуна внутрішнього згоряння через оптимізацію його режимів. Тяговий акумулятор у HEV має відносно невелику ємність і працює у режимі частих циклів заряду-розряду з обмеженою глибиною розряду, що дозволяє забезпечити ресурс без значного погіршення характеристик. У контексті зарядної інфраструктури HEV не потребує зовнішнього підключення до мережі, тому для них вимоги до зарядних станцій не формуються.

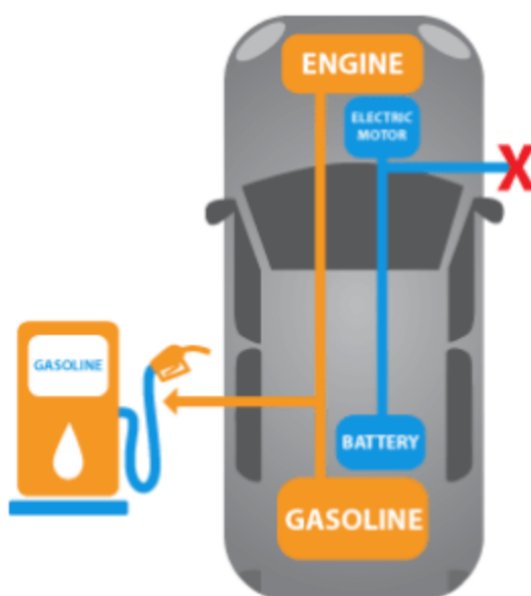


Рисунок 2.1 – Класичні гібриди (HEV)

Плагін-гібриди (PHEV) займають проміжне положення між HEV та повністю електричними транспортними засобами. На відміну від HEV, PHEV мають збільшену тягову батарею, яку можна заряджати від зовнішнього джерела електроенергії, і це дає змогу проходити суттєву частину пробігу в електричному режимі. Конструктивно PHEV можуть мати різні схеми реалізації гібридної силової установки: від паралельної, де ДВЗ і електродвигун можуть одночасно передавати крутний момент на колеса, до послідовної, де ДВЗ використовується як генератор для підзарядження батареї. З позиції заряджання ключовим є те, що енергетичний запит PHEV менший, ніж у повністю електричного авто, а допустимі потужності заряджання часто обмежені конструкцією вбудованого зарядного пристрою. У типових умовах PHEV заряджаються переважно змінним струмом у місцях тривалого паркування, оскільки користувачеві достатньо відновити запас енергії на електричний пробіг, а не повністю поповнити батарею великої ємності. Проте ефективність PHEV у реальній експлуатації прямо залежить від регулярності заряджання: якщо транспортний засіб не підключається до зарядки, він працює як важкий автомобіль з ДВЗ і демонструє гірші показники витрат пального. Це означає, що для PHEV важливими є доступність зарядних точок та зручність процесу заряджання, а з точки зору

оптимізації – можливість заряджати в часові інтервали, коли є сонячна генерація або коли мережеві обмеження не є критичними.

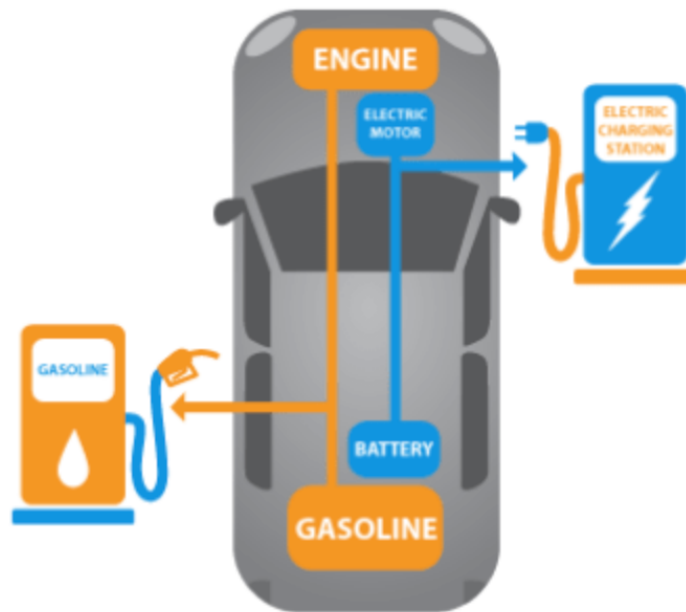


Рисунок 2.2 – Плагін-гібриди (PHEV)

Повністю електричні транспортні засоби (fully EV) є системами, у яких тяговий акумулятор є основним джерелом енергії, а електропривод забезпечує всі режими руху. Саме цей клас формує основні вимоги до зарядної інфраструктури, оскільки без доступного заряджання неможлива регулярна експлуатація. З технічної точки зору fully EV характеризуються суттєво вищою енергоємністю батареї у порівнянні з PHEV, що збільшує потребу в енергії на одну зарядну сесію. З іншого боку, електромобілі мають більший потенціал використання високих потужностей заряджання, зокрема у режимі швидкого заряджання постійним струмом. Однак допустима потужність заряджання не є фіксованою величиною: вона залежить від стану заряду батареї, температури, обмежень системи керування батареєю та технічних можливостей зарядної станції. У типовому процесі швидкого заряджання потужність може бути високою на початку сесії і знижуватися при наближенні до верхніх значень SoC, що пов'язано з необхідністю обмеження напруги та струму для захисту елементів батареї. Тому при проектуванні зарядної інфраструктури важливо враховувати не лише номінальну потужність зарядного поста, а й реальний

профіль потужності в часі, який визначає як навантаження на мережу, так і необхідний обсяг енергії, що може бути забезпечений сонячними панелями.

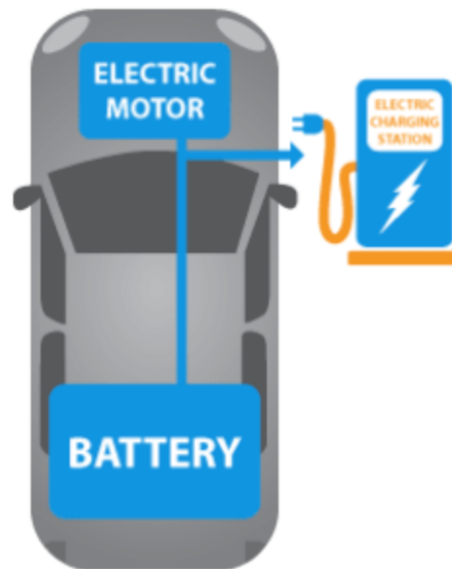


Рисунок 2.3 – Повністю електричні транспортні засоби (fully EV)

Вимоги до заряджання для різних типів транспортних засобів формуються на основі поєднання енергетичних, часових та експлуатаційних параметрів. Енергетична складова визначається ємністю батареї та середнім енергоспоживанням на одиницю пробігу. Часова складова визначається тривалістю доступного вікна заряджання, тобто тим, як довго транспортний засіб може бути підключений до зарядного пристрою. Експлуатаційна складова включає режим використання транспортного засобу, характер поїздок, температуру навколишнього середовища та вимоги користувача до гарантованого запасу ходу. У міському сценарії, де авто часто простоє на парковці вночі, достатньо повільного заряджання змінним струмом, і головним завданням стає оптимізація профілю потужності для уникнення піків і максимального використання дешевої або відновлювальної електроенергії. У міжміському сценарії або для комерційного транспорту може бути потрібне швидке заряджання, де пріоритетом стає мінімізація часу, але це різко підвищує вимоги до мережі та актуалізує застосування накопичувачів енергії й інтелектуального керування.

Окремо слід розглянути технічні обмеження, які задає акумуляторна система транспортного засобу. Будь-яка батарея має допустимий діапазон струмів заряджання, який часто характеризується величиною C-rate, тобто відношенням зарядного струму до ємності батареї. Високі значення C-rate прискорюють процес заряджання, але підвищують теплові навантаження, можуть спричиняти прискорене старіння та потребують ефективних систем термочерування. Крім того, батарея має допустимий діапазон напруги, що визначає вимоги до вихідної характеристики зарядного пристрою та до силової електроніки, яка формує зарядний струм. Система керування батареєю обмежує потужність заряджання залежно від температури елементів, тому в холодних умовах швидкість заряджання може суттєво знижуватися. Це важливо для України, де температурні режими можуть змінюватися в широких межах протягом року. Таким чином, у дослідженні зарядної станції з сонячними панелями необхідно закладати модель, яка враховує не лише номінальні параметри батареї, а й поведінку системи заряджання в залежності від SoC і температури, принаймні у вигляді обмежень та типового профілю потужності.

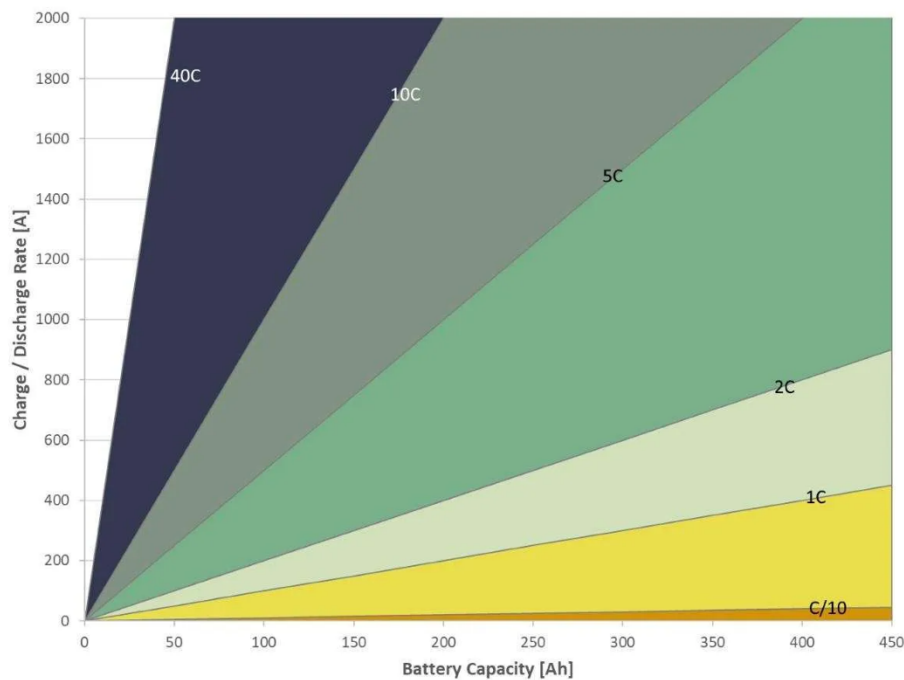


Рисунок 2.4 – Діапазони струмів заряджання в залежності від ємності батареї

З точки зору зарядної інфраструктури вимоги транспортних засобів можна узагальнити як набір параметрів, які повинні бути забезпечені зарядною станцією: доступний тип живлення (змінний або постійний струм), максимальна потужність, допустимий діапазон напруг, можливість регулювання струму, а також можливість реалізації керованого заряджання. Останній параметр є критичним для інтеграції з сонячними панелями, оскільки дозволяє адаптувати зарядний процес до поточного виробітку. Якщо зарядний пристрій підтримує керування потужністю, система може зменшувати або збільшувати відбір енергії в реальному часі, зберігаючи при цьому вимогу щодо досягнення заданого SoC до моменту від'їзду. Це формує основу для оптимізації, яка надалі буде розроблена в науково-дослідному розділі.

2.2 Технології заряджання та силова електроніка

Технології заряджання електро- і плагін-гібридних транспортних засобів є поєднанням електротехнічних, енергетичних і керувальних рішень, які забезпечують передачу енергії від джерела живлення до тягової батареї з необхідними параметрами напруги, струму та безпеки. У сучасних системах заряджання ключову роль відіграє силова електроніка, оскільки саме вона виконує перетворення електроенергії та формує керований зарядний профіль, узгоджений з обмеженнями електричної мережі, зарядної станції та батареї транспортного засобу. У контексті даної роботи особливо важливо розуміти, як побудовані силові тракти зарядної інфраструктури, які режими заряджання застосовуються в реальних умовах і які параметри визначають можливість інтеграції зарядного процесу з сонячною генерацією.

Загальна логіка заряджання полягає в тому, що електроенергія з мережі або локального джерела повинна бути перетворена у форму, придатну для заряджання тягової батареї, а сам процес заряджання має відбуватися в межах допустимих значень струму та напруги. У переважній більшості електромобілів заряджання батареї є заряджанням постійним струмом, навіть якщо живлення надходить від мережі змінного струму. Це означає, що в будь-якому випадку

присутній етап перетворення AC у DC, а далі – етап регулювання параметрів DC до потрібного рівня батареї. Відмінність між основними технологіями заряджання полягає в тому, де саме розташовані перетворювачі та хто виконує основні функції керування: сам автомобіль чи зарядна станція.

Технології заряджання умовно поділяють на заряджання змінним струмом та заряджання постійним струмом. При заряджанні змінним струмом зарядна інфраструктура фактично виконує роль керованого джерела AC із системами захисту, обліку та комунікації, а основне перетворення та формування зарядного струму відбувається у вбудованому зарядному пристрої транспортного засобу. Це робить заряджання AC більш простим з точки зору зарядної станції, але накладає обмеження з боку автомобіля: максимальна потужність заряджання визначається можливостями його вбудованого перетворювача, системи охолодження та обмеженнями батареї. Такий режим є характерним для домашнього та робочого заряджання, де доступний тривалий час підключення, а пріоритетом є надійність, безпека та помірна потужність, що легше інтегрується з локальними мережевими умовами.

Заряджання постійним струмом принципово відрізняється тим, що основні перетворювачі знаходяться у зарядній станції, яка формує регульований вихід DC безпосередньо на клеми батареї через інтерфейс автомобіля. У цьому випадку зарядна станція бере на себе функції силового перетворення великої потужності, що дозволяє реалізувати швидке заряджання, але одночасно суттєво підвищує вимоги до мережевого приєднання, якості електроенергії та систем охолодження силових модулів. При швидкому заряджанні постійним струмом можливе значне навантаження в короткий час, тому для інтеграції з сонячними панелями або для обмеження піків у мережі часто потрібні додаткові елементи, зокрема локальна DC-шина, буферний накопичувач енергії або алгоритмічне обмеження потужності зарядних сесій.

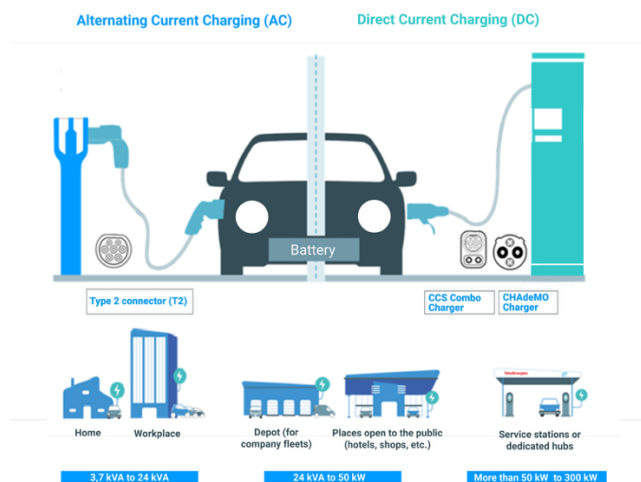


Рисунок 2.5 – Заряджання батареї електромобіля постійним і змінним струмом

Незалежно від типу заряджання, процес повинен відповідати вимогам батареї, які визначаються електрохімічними та тепловими обмеженнями. Тягові батареї мають допустимі межі напруги та струму, а також вимоги до температурного режиму. Типовою практикою є керування заряджанням за комбінованим алгоритмом, коли на початкових етапах заряджання підтримується сталий струм у межах допустимого значення, а при наближенні до верхнього рівня заряду забезпечується сталий рівень напруги з поступовим зменшенням струму. Такий підхід дозволяє швидко передати основну частину енергії, а на завершальному етапі уникнути перенапруги та деградації елементів батареї. Для швидких DC-сесій характерним є також явище зниження потужності в міру зростання SoC, що означає, що номінальна потужність зарядної станції не завжди реалізується протягом усього часу заряджання. У задачах моделювання це важливо враховувати як нелінійний профіль потужності, оскільки саме він визначає реальні пікові навантаження та потенціал узгодження з профілем сонячної генерації.

Силова електроніка зарядної інфраструктури виконує декілька критичних функцій. По-перше, вона забезпечує перетворення електроенергії між різними рівнями напруги та типами струму. По-друге, вона реалізує керування потужністю, що є основою для керованого заряджання і для інтеграції з локальною генерацією. По-третє, вона відповідає за якість електроенергії на вході та виході, зокрема за коефіцієнт потужності, рівень гармонічних

спотворень та стійкість до перехідних процесів. По-четверте, силова електроніка забезпечує захист системи від аварійних режимів, включаючи перевантаження, короткі замикання, перенапруги та перегрів.

З точки зору структурної побудови зарядної станції ключовим елементом є перетворювальний каскад, який залежить від того, чи реалізується заряджання АС або DC. Для АС-заряджання вбудований зарядний пристрій автомобіля зазвичай включає випрямляч, ланку постійного струму та DC/DC перетворювач, що узгоджує напругу з батареєю і формує зарядний струм. Для DC-заряджання зарядна станція містить випрямляч великої потужності з корекцією коефіцієнта потужності, DC-шину та DC/DC перетворювачі, які формують потрібну напругу та струм для батареї. У випадку інтеграції з сонячними панелями з'являється додатковий перетворювальний контур: сонячний масив формує DC, який через перетворювач із функцією відстеження точки максимальної потужності подається на DC-шину або через інвертор – у АС-мережу об'єкта. Тому при проектуванні зарядної системи на базі сонячних панелей важливим стає вибір архітектури енергетичного тракту: чи буде сонячна генерація працювати як мережевий інвертор із подачею в АС-шину, чи доцільно формувати спільну DC-ланку для PV і зарядної станції, що може зменшити кількість перетворень і підвищити ефективність.

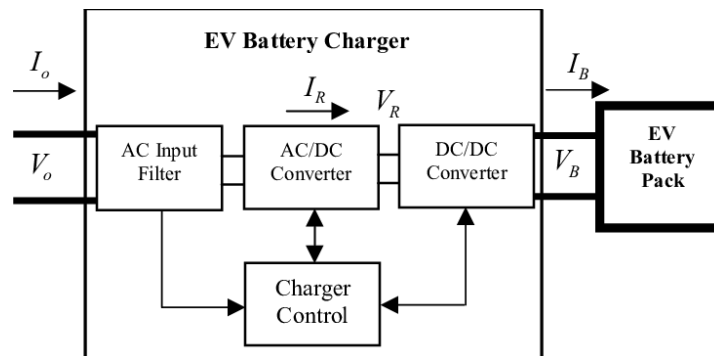


Рисунок 2.6 – Принципова схема для АС-заряджання

Інтеграція зарядних технологій з мережею вимагає забезпечення електромагнітної сумісності та високої якості споживання. Зарядні пристрої великої потужності можуть створювати гармоніки та пульсації струму, а також чутливо реагувати на коливання напруги. Тому сучасні силові перетворювачі

оснащуються системами корекції коефіцієнта потужності, фільтрами та алгоритмами керування, які формують струм, близький до синусоїдального, та зменшують небажаний вплив на мережу. Для мереж із обмеженою потужністю або для об'єктів, де зарядні пристрої працюють групою, важливими є функції обмеження сумарної потужності та динамічного розподілу навантаження, що дозволяє уникати перевантаження підстанцій та кабельних ліній.

2.3 Технічні рішення зарядної мережі на базі ВДЕ

Побудова зарядної мережі на базі відновлювальних джерел енергії є переходом від традиційної моделі заряджання, де зарядна станція розглядається як звичайний електричний споживач, до моделі локальної енергосистеми, у якій одночасно присутні генерація, перетворення, накопичення та кероване споживання. Для України така концепція має подвійне значення: з одного боку, вона дозволяє підвищити частку енергії з відновлювальних джерел у транспортному секторі, а з іншого – зменшує залежність зарядної інфраструктури від обмежень розподільчих мереж і підвищує стійкість енергопостачання. Однак ефективність ВДЕ-орієнтованої зарядної мережі визначається не фактом наявності сонячних панелей чи іншого джерела, а правильно підбраною архітектурою електроживлення, узгодженням потужностей, логікою керування та здатністю системи адаптуватися до змін генерації й попиту.

Основою більшості практичних рішень є поєднання трьох енергетичних складових: електричної мережі як резервного або балансуєчого джерела, відновлювального джерела як пріоритетного генератора та зарядної інфраструктури як керованого навантаження. У цій тріаді мережа зазвичай виконує роль стабілізатора, який покриває дефіцит потужності при падінні генерації ВДЕ та приймає надлишок у випадках, коли виробіток перевищує споживання. Водночас для багатьох об'єктів критичним є питання обмеження пікових відборів з мережі, оскільки саме пікова потужність часто визначає технічні умови приєднання та економіку експлуатації. Тому до архітектури ВДЕ-

зарядної мережі часто додають четвертий елемент – накопичувач енергії, який дозволяє акумулювати надлишкову генерацію та віддавати її у моменти пікового попиту або дефіциту ВДЕ. У такій системі зарядна мережа перетворюється на інтегрований енергетичний комплекс, де головним завданням керування є оптимальний розподіл потоків енергії між генерацією, накопиченням, мережею та транспортними засобами.

Найпростішим технічним рішенням є мережево-інтегрована зарядна станція з сонячною генерацією, коли сонячні панелі підключені до об'єктної електромережі через інвертор, а зарядні пристрої живляться від тієї ж АС-шини. У такій архітектурі сонячна генерація зменшує відбір електроенергії з мережі у денні години, але не гарантує, що заряджання буде відбуватися саме за рахунок ВДЕ, оскільки енергія фактично змішується в загальній шині. Практична перевага цього підходу полягає в його відносній простоті: використовується стандартне обладнання сонячної електростанції та стандартні зарядні пристрої, а масштабування відбувається через збільшення встановленої потужності PV та кількості зарядних постів. Основне обмеження полягає в тому, що без спеціального керування зарядний процес може не збігатися з профілем генерації, наприклад, якщо більшість автомобілів підключається ввечері. Тому навіть у простій мережево-інтегрованій схемі ключову роль відіграє кероване заряджання, яке дозволяє змінювати потужність у часі та підвищувати частку використаної сонячної енергії через перенесення заряджання на години генерації.

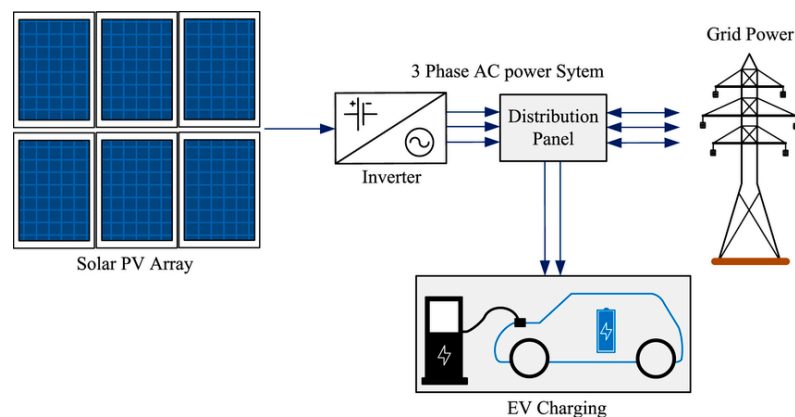


Рисунок 2.7 – Структурна схема реалізації процесу заряджання з використанням ВДЕ

Наступним рівнем є гібридна зарядна станція з сонячною генерацією та накопичувачем енергії. Додавання накопичувача змінює енергетичну логіку системи: надлишок сонячної енергії може бути збережений і використаний для заряджання у години, коли сонячної генерації недостатньо. Це особливо важливо для об'єктів, де попит на заряджання зосереджений у вечірні години, або для швидких зарядних станцій, які мають високі піки потужності. Накопичувач може виконувати функцію згладжування піків, тобто зменшувати максимальний відбір з мережі, що дозволяє знизити вимоги до приєднання або уникнути дорогих модернізацій мережі. Водночас накопичувач додає складності як у технічній реалізації, так і в економіці, оскільки потребує додаткових інвестицій, системи керування зарядом-розрядом та врахування деградації акумулятора. Тому при проектуванні гібридної станції необхідно вирішити оптимізаційну задачу: визначити таку потужність та енергоємність накопичувача, які забезпечать максимальний ефект у вигляді зменшення піків і збільшення використання ВДЕ при прийнятній вартості.

Перспективним технічним напрямом є використання спільної шини постійного струму, коли сонячні панелі, накопичувач і зарядні модулі об'єднані на DC-рівні. У такій архітектурі сонячний масив через DC/DC перетворювач із функцією відстеження точки максимальної потужності подає енергію на DC-шину, до якої підключені накопичувач і DC-зарядні модулі. Перевагою DC-архітектури є зменшення кількості перетворень енергії, оскільки сонячна генерація є природно DC-джерелом, а заряджання батареї транспортного засобу також відбувається постійним струмом. Це потенційно підвищує загальний ККД системи та дає ширші можливості для швидкого керування потоками енергії. Однак DC-архітектура потребує більш складної системи захисту, спеціальних комутаційних апаратів, продуманого проектування рівнів напруги та координації роботи перетворювачів. Для практичних реалізацій важливим є вибір номінальної напруги DC-шини та сумісність із діапазонами напруг батарей транспортних засобів, а також забезпечення електробезпеки й надійності в умовах змінних режимів роботи.

Для побудови зарядної мережі, а не лише одиночної станції, важливим стає питання масштабування та топології. У міських умовах зарядна мережа може розглядатися як система багатьох вузлів, кожен з яких має власний профіль генерації ВДЕ та власний профіль попиту на заряджання. У такому випадку технічні рішення повинні враховувати розподіленість системи й обмеження локальних мереж. Одна з базових моделей полягає у створенні вузлів заряджання при великих паркінгах або транспортних хабах, де доцільно встановлювати сонячні навіси та локальні накопичувачі. Інша модель передбачає розосереджене встановлення невеликих PV-зарядних комплексів у різних точках міста з обмеженою потужністю кожного вузла, але з можливістю керування сумарним навантаженням через єдину диспетчерську систему. У другому випадку зарядна мережа працює як сукупність керованих споживачів, де оптимізація може здійснюватися як на рівні кожного вузла, так і на рівні всієї мережі, враховуючи загальні цілі, наприклад мінімізацію піків у певному районі або максимізацію використання сонячної енергії у масштабі міста.

Ключовим елементом ВДЕ-орієнтованої зарядної мережі є система керування та комунікації, оскільки без неї технічні можливості генерації та накопичення не перетворюються на реальні переваги. Система керування повинна збирати дані про стан зарядних постів, підключені транспортні засоби, їхні потреби в енергії та час доступного підключення, а також інформацію про поточну і прогнозовану генерацію сонячних панелей. На основі цих даних формується профіль потужності заряджання для кожного поста. Для реалізації такого керування необхідні вимірювальні канали на рівні вузла, зокрема вимірювання потужності PV, відбору з мережі, стану накопичувача та споживання зарядних постів. У випадку обмежень точки приєднання система повинна забезпечувати, щоб сумарна потужність заряджання не перевищувала встановленого ліміту, а у випадку використання накопичувача – визначати моменти заряджання та розряджання так, щоб мінімізувати піки та максимально використати сонячну генерацію.

3 КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

3.1 Вихідні дані, прийняті допущення та сценарій використання

Для виконання конструкторських розрахунків прийнято типовий приклад об'єкта зарядної інфраструктури, інтегрованого з сонячною генерацією. Обраний сценарій відповідає реальній для України ситуації, коли електромобілі переважно заряджаються в місцях тривалого паркування в робочі години, а сонячна генерація має максимум саме в денний період. Такий підхід дозволяє коректно оцінити не лише встановлені потужності обладнання, але й енергетичний баланс за добу, можливості покриття заряджання сонячною енергією та вплив обмежень мережевого приєднання.

Сценарієм використання прийнято корпоративну стоянку при офісній будівлі в місті (типове міське середовище). У робочі дні на парковці одночасно знаходиться група електромобілів співробітників, а заряджання відбувається протягом робочого інтервалу. Об'єкт має приєднання до розподільчої мережі 0,4 кВ із лімітом максимальної активної потужності, а на парковці змонтована сонячна електростанція у форматі навісу над паркомісцями. Для спрощення та збереження фізичної коректності накопичувач енергії не вводиться як обов'язковий елемент; його доцільність буде оцінюватися опосередковано через результати розрахунків пікових потужностей і дефіциту/надлишку сонячної генерації. Таким чином, система складається з мережі, сонячної генерації та зарядних пристроїв, а керованість реалізується обмеженням сумарної потужності заряджання.

Для транспортного засобу прийнято типовий легковий електромобіль С-класу (міський/приміський режим експлуатації). Вибір саме такого класу є практичним, оскільки він складає значну частку масового парку електромобілів і має параметри, характерні для реальної зарядної інфраструктури змінного струму та, за потреби, заряджання постійним струмом на публічних станціях.

Нижче подано прийняті вихідні дані для електромобіля та сценарію його добового використання. Ці дані надалі використовуються для розрахунку тягової потужності, енергоспоживання та потреби в електроенергії на заряджання.

Таблиця 3.1 – Вихідні дані для електромобіля та сценарію його добового використання

Параметр	Позначення	Значення	Одиниця
Споряджена маса автомобіля (з водієм)	m	1700	кг
Коефіцієнт опору коченню	f	0,011	–
Коефіцієнт аеродинамічного опору	C_d	0,28	–
Лобова площа	A	2,2	м ²
Густина повітря	ρ	1,225	кг/м ³
Номінальна напруга батареї	U_{bat}	360	В
Ємність батареї	E_{bat}	60	кВт·год
Допустимий діапазон SoC для щоденного режиму	SoC	20–90	%
Середнє енергоспоживання в місті/змішаному циклі	e	18	кВт·год/100 км
Середній добовий пробіг одного авто	L_d	60	км
Час перебування на стоянці з можливістю зарядки	t_{park}	8	год

3.2 Розрахунок силової частини електромобіля

Було виконано розрахунок силової частини легкового електромобіля С-класу для обґрунтування параметрів тягового електропривода та тягової батареї, які надалі використовуються при визначенні вимог до зарядної інфраструктури. Розрахунок виконується послідовно: спочатку визначаються сили опору руху і тягові потреби на характерних режимах, далі – необхідна потужність і крутний момент на колесах та валу електродвигуна, після чого оцінюються вимоги до батареї за потужністю і струмом.

У якості вихідних даних для розрахунку приймаються дані з підрозділу 3.1, а також вводяться типові для міського електромобіля вимоги до динаміки, які необхідні для конструктивного обґрунтування привода.

- маса автомобіля з водієм: $m = 1700$ кг;
- коефіцієнт опору коченню: $f = 0,011$;
- коефіцієнт аеродинамічного опору: $C_d = 0,28$;
- лобова площа: $A = 2,2$ м²
- густина повітря: $\rho = 1,225$
- прискорення вільного падіння: $g = 9,81$ м/с²;
- номінальна напруга батареї: $U_{bat} = 360$ В;
- енергоємність батареї: $E_{bat} = 60$ кВт\год;

Вимоги до рухових режимів (конструкторські):

- максимальна швидкість на рівній дорозі: $v_{max} = 130$ км/год;
- розгін 0–100 км/год: $t_{0-100} = 10$ с;
- подолання підйому 10% зі швидкістю 60 км/год: $i = 0,10$ (де i – ухил дороги).

Додаткові конструктивні прийняття для переходу до крутних моментів:

- радіус кочення колеса: $r_w = 0,31$ м (типовий для шин R17–R18);
- передавальне число одноступеневого редуктора: $u = 9$;
- ККД механічної передачі (редуктор/привід): $\eta_m = 0,97$;
- сумарний ККД електропривода при розрахунку необхідної потужності (інвертор + електродвигун + механіка) приймається $\eta_{dr} = 0,90$.

3.2.1 Розрахунок сил опору та тягової потреби

Сумарна сила, яку має розвивати електропривод на контакті колеса з дорогою, визначається як:

$$F_{tr}(v) = F_{roll} + F_{aero}(v) + F_{grade} + F_{in}(t), \quad (3.1)$$

де складові – опір коченню, аеродинамічний опір, опір підйому та інерційна складова при розгоні.

Опір коченню:

$$F_{roll} = mgf = 1700 \cdot 9,81 \cdot 0,011 = 183,45 \text{ Н}. \quad (3.2)$$

Аеродинамічний опір:

$$F_{aero}(v) = \frac{1}{2} \rho C_d A v^2. \quad (3.3)$$

Для $v_{max} = 130 \text{ км/год} = 36,11 \text{ м/с}$:

$$F_{aero}(v_{max}) = 0,5 \cdot 1,225 \cdot 0,28 \cdot 2,2 \cdot (36,11)^2 = 492,00 \text{ Н.}$$

Тоді сумарна сила опору руху на рівній дорозі при 130 км/год:

$$F_{\Sigma}(v_{max}) = F_{roll} + F_{aero}(v_{max}) = 183,45 + 492,00 = 675,45 \text{ Н.} \quad (3.4)$$

Опір підйому (для ухилу $i = 0,10$):

$$F_{grade} = mgi = 1700 \cdot 9,81 \cdot 0,10 = 1667,70 \text{ Н.} \quad (3.5)$$

Для швидкості 60 км/год ($v_{60} = 16,67 \text{ м/с}$) аеродинамічна складова:

$$F_{aero}(60) = 0,5 \cdot 1,225 \cdot 0,28 \cdot 2,2 \cdot (16,67)^2 = 104,81 \text{ Н.} \quad (3.6)$$

Сумарна сила тяги для утримання 60 км/год на підйомі 10%:

$$\begin{aligned} F_{\Sigma}(60,10\%) &= F_{roll} + F_{aero}(60) + F_{grade} = 183,45 + 104,81 + 1667,70 \\ &= 1955,96 \text{ Н.} \end{aligned}$$

3.2.2 Розрахунок необхідної потужності електропривода

Потужність на колесах визначається:

$$P_w = F_{\Sigma} \cdot v. \quad (3.7)$$

1. Рух 130 км/год по рівній дорозі:

$$P_{w,max} = 675,45 \cdot 36,11 = 24,39 \text{ кВт.}$$

Необхідна потужність на валу електродвигуна з урахуванням втрат:

$$P_{m,max} = \frac{P_{w,max}}{\eta_{dr}} = \frac{24,39}{0,90} = 27,10 \text{ кВт.} \quad (3.8)$$

Це значення визначає мінімально потрібну потужність для утримання максимальної швидкості.

2. Рух 60 км/год на підйомі 10%:

$$P_{w,grade} = 1955,96 \cdot 16,67 = 32,60 \text{ кВт,}$$

$$P_{m,grade} = \frac{32,60}{0,90} = 36,22 \text{ кВт.}$$

Цей режим є показовим для оцінки тягової спроможності в умовах підйомів.

3. Оцінка режиму розгону 0–100 км/год за 10 с.

Середнє прискорення:

$$a = \frac{v_{100}}{t_{0-100}} = \frac{27,78}{10} = 2,778 \text{ м/с}^2 \quad (3.9)$$

Інерційна сила:

$$F_{in} = ma = 1700 \cdot 2,778 = 4722,22 \text{ Н.} \quad (3.10)$$

Щоб оцінити потребу в потужності, приймається середня швидкість розгону $v_{mid} = 50 \text{ км/год} = 13,89 \text{ м/с}$. Аеродинамічна сила на цій швидкості:

$$F_{aero}(50) = 0,5 \cdot 1,225 \cdot 0,28 \cdot 2,2 \cdot (13,89)^2 = 72,78 \text{ Н.}$$

Сумарна сила, що має бути реалізована під час інтенсивного розгону (на рівній дорозі):

$$F_{\Sigma,acc} \approx F_{in} + F_{roll} + F_{aero}(50) = 4722,22 + 183,45 + 72,78 = 4978,45 \text{ Н.}$$

Тоді середня потужність на колесах на етапі розгону:

$$P_{w,acc} = F_{\Sigma,acc} \cdot v_{mid} = 4978,45 \cdot 13,89 = 69,15 \text{ кВт.} \quad (3.11)$$

Необхідна потужність на валу двигуна:

$$P_{m,acc} = \frac{69,15}{0,90} = 76,83 \text{ кВт.}$$

Оскільки це усереднена оцінка, а реальний розгін потребує запасу на перехідні режими, температурні обмеження та втрати, для конструктивного вибору доцільно прийняти пікову потужність електродвигуна:

$$P_{m,peak} \approx 100 \text{ кВт,}$$

а номінальну (тривалу) потужність – на рівні, достатньому для крейсерського режиму та підйому:

$$P_{m,rated} \approx 60 \text{ кВт.}$$

Таке співвідношення є типовим для електроприводів легкових електромобілів, де короткочасні піки використовуються для динаміки, а тривалий режим визначається тепловими можливостями системи.

3.2.3 Розрахунок крутного моменту на колесах і валу електродвигуна

Крутний момент на колесах:

$$M_w = F_{tr} \cdot r_w. \quad (3.12)$$

Для розгону (оцінка максимальної тягової сили в низькошвидкісній зоні, де аеродинаміка незначна):

$$F_{tr,acc} \approx F_{in} + F_{roll} = 4722,22 + 183,45 = 4905,67 \text{ Н.} \quad (3.13)$$

Тоді:

$$M_{w,acc} = 4905,67 \cdot 0,31 = 1520,76 \text{ Н\cdotм.}$$

Зв'язок між моментом на колесах і моментом електродвигуна через редуктор:

$$M_m = \frac{M_w}{u \cdot \eta_m}. \quad (3.14)$$

$$M_{m,acc} = \frac{1520,76}{9 \cdot 0,97} = 174,2 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Отже, для забезпечення прийнятого розгону потрібен електродвигун із піковим моментом близько 180 Н·м. Для запасу по керованості та роботи в холодних умовах доцільно прийняти конструктивно:

$$M_{m,peak} \approx 200 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Перевіримо відповідність максимальної швидкості обраній передачі. Кутова швидкість колеса при 130 км/год:

$$n_w = \frac{v_{max}}{2\pi r_w} \cdot 60 = \frac{36,11}{2\pi \cdot 0,31} \cdot 60 \approx 1112 \text{ об/хв}. \quad (3.15)$$

Тоді швидкість обертання електродвигуна:

$$n_m = u \cdot n_w = 9 \cdot 1112 \approx 10010 \text{ об/хв}. \quad (3.16)$$

Це значення узгоджується з типовими швидкісними можливостями сучасних тягових електродвигунів (порядку 10–12 тис. об/хв), отже передавальне число $u = 9$ є прийнятним.

3.2.4 Оцінка вимог до тягової батареї за потужністю та струмом

Для пікового режиму приймається, що батарея повинна забезпечити електричну потужність, вищу за механічну пікову потужність двигуна через втрати інвертора та електродвигуна. Якщо прийняти сумарний ККД електричної частини (інвертор + двигун) $\eta_e = 0,90$, то необхідна пікова потужність батареї:

$$P_{bat,peak} = \frac{P_{m,peak}}{\eta_e} = \frac{100}{0,90} = 111,1 \text{ кВт}. \quad (3.17)$$

Піковий струм батареї:

$$I_{bat,peak} = \frac{P_{bat,peak}}{U_{bat}} = \frac{111,1 \cdot 10^3}{360} = 308 \text{ А}. \quad (3.18)$$

Оцінимо еквівалентну електричну ємність батареї в ампер-годинах:

$$Q_{bat} \approx \frac{E_{bat}}{U_{bat}} = \frac{60\,000}{360} = 166,7 \text{ А}\cdot\text{год}. \quad (3.19)$$

Тоді пікова відносна швидкість розряду (C-rate):

$$C_{peak} = \frac{I_{bat,peak}}{Q_{bat}} = \frac{308}{166,7} = 1,85 \text{ С}. \quad (3.20)$$

Значення близько $2C$ є реалістичним для короткочасних піків тягових батарей при наявності адекватного термокерування. З точки зору енергетики прийнятий у роботі добовий пробіг $L_d = 60$ км і середнє споживання 18 кВт/год дають потребу в енергії в батареї $E_{d,veh} = 10,8$ кВт\год. Доступна для щоденного режиму енергія при діапазоні $SoC = 20-90\%$:

$$E_{use} = E_{bat} \cdot (0,90 - 0,20) = 60 \cdot 0,70 = 42 \text{ кВт\год.} \quad (3.21)$$

Частка щоденного використання:

$$k_d = \frac{E_{d,veh}}{E_{use}} = \frac{10,8}{42} = 0,257. \quad (3.22)$$

Отже, в прийнятому сценарії батарея працює з помірною добовою глибиною розряду, що є сприятливим з точки зору ресурсу та дозволяє реалізувати кероване заряджання без ризику систематичного глибокого розряду.

3.3 Розрахунок параметрів зарядної станції

Далі виконано конструкторський розрахунок параметрів зарядної станції для прийнятого в 3.1 сценарію: корпоративна парковка з можливістю заряджання електромобілів протягом робочого дня (8 год), ліміт активної потужності приєднання об'єкта $P_{lim} = 50$ кВт, кількість електромобілів $N = 10$ на добу, розрахункова потреба енергії на заряджання $E_{d,total} = 117,4$ кВт\год/добу. Розрахунок проводиться у послідовності: енергетичні вимоги $\rightarrow$ вибір структури зарядних постів і перевірка по потужності $\rightarrow$ розрахунок струмів і вибір захисної апаратури $\rightarrow$ узгодження з лімітом приєднання та логіка керування навантаженням.

3.3.1 Необхідна енергія та середня потужність заряджання

Добова потреба в енергії для всіх автомобілів (враховано зарядні втрати):

$$E_{d,total} = 117,4 \text{ кВт\год/добу.}$$

Оскільки заряджання доступне протягом $t_{park} = 8$ год, мінімально необхідна середня потужність, яка забезпечить передавання потрібної енергії за доступний час:

$$P_{avg,need} = \frac{E_{d,total}}{t_{park}} = \frac{117,4}{8} = 14,68 \text{ кВт.} \quad (3.23)$$

Отримане значення означає, що з точки зору енергетики вимоги є помірними: навіть одна зарядна точка потужністю 11 кВт, працюючи безперервно 8 год, здатна передати близько 88 кВт\год, а дві такі точки – 176 кВт\год. Однак на практиці зарядні сесії не є безперервними, а головне обмеження задає ліміт приєднання P_{lim} і необхідність забезпечення можливості одночасного підключення декількох авто. Тому проектування виконується за критеріями доступності постів і обмеження піків потужності.

Енергія на один автомобіль за добу:

$$E_{d,veh} = 11,74 \text{ кВт\год.}$$

Час заряджання одного автомобіля при номінальній потужності АС поста $P_{EVSE} = 11 \text{ кВт}$:

$$t_{ch,veh} = \frac{E_{d,veh}}{P_{EVSE}} = \frac{11,74}{11} = 1,07 \text{ год.} \quad (3.24)$$

Для 10 автомобілів сумарна потреба в “посто-годинах”:

$$T_{post} = N \cdot t_{ch,veh} = 10 \cdot 1,07 = 10,7 \text{ посто-год.} \quad (3.25)$$

За наявності $n = 6$ постів доступний ресурс за 8 год:

$$T_{avail} = n \cdot t_{park} = 6 \cdot 8 = 48 \text{ посто-год.} \quad (3.26)$$

Отже, за прийнятих енергетичних потреб 6 постів забезпечують значний запас по пропускній здатності навіть за нерівномірного прибуття/від’їзду автомобілів.

3.3.2 Вибір типу зарядних постів та встановленої потужності

Для корпоративної стоянки з тривалим вікном заряджання обрано АС заряджання змінним струмом трифазне 400 В, оскільки воно:

- є технічно простішим для об’єкта 0,4 кВ;
- забезпечує достатню енергію за 8-годинний інтервал;
- добре піддається керуванню потужністю (динамічне обмеження сумарного навантаження).

Прийнято:

- номінальна потужність одного поста: $P_{EVSE} = 11 \text{ кВт}$;
- кількість постів: $n = 6$;
- встановлена потужність постів:

$$P_{inst} = n \cdot P_{EVSE} = 6 \cdot 11 = 66 \text{ кВт.} \quad (3.27)$$

Встановлена потужність 66 кВт перевищує ліміт приєднання 50 кВт, що є допустимим за умови застосування керування навантаженням. Це рішення конструктивно вигідне, оскільки підвищує доступність постів (зручність користувачів і резерв на майбутнє), але не вимагає збільшення приєднаної потужності за рахунок програмного обмеження сумарного споживання.

Максимальна кількість постів, які можуть працювати на повній потужності без перевищення ліміту:

$$n_{full} = \left\lfloor \frac{P_{lim}}{P_{EVSE}} \right\rfloor = \left\lfloor \frac{50}{11} \right\rfloor = 4 \text{ пости,} \quad (3.28)$$

оскільки $4 \cdot 11 = 44 \text{ кВт}$, а $5 \cdot 11 = 55 \text{ кВт} > 50 \text{ кВт}$. Отже, при одночасному підключенні 5–6 авто система керування повинна зменшувати потужність кожного поста.

Якщо одночасно працюють усі 6 постів і діє обмеження $P_{lim} = 50 \text{ кВт}$, середня доступна потужність на один пост (при рівномірному розподілі):

$$P_{EVSE,share} = \frac{P_{lim}}{n} = \frac{50}{6} = 8,33 \text{ кВт.} \quad (3.29)$$

Це все одно дозволяє зарядити один автомобіль на $E_{d,veh} = 11,74 \text{ кВт\cdotгод}$ приблизно за:

$$t_{ch,share} = \frac{E_{d,veh}}{P_{EVSE,share}} = \frac{11,74}{8,33} = 1,41 \text{ год,} \quad (3.30)$$

що залишається прийнятним для 8-годинного інтервалу.

3.3.3 Розрахунок струмів та вибір захисної апаратури

Розрахунки виконуються для трифазної мережі $U_{LL} = 400 \text{ В}$. Для інженерної оцінки приймається коефіцієнт потужності зарядного пристрою $\cos \varphi \approx 1$, оскільки сучасні зарядні пристрої мають корекцію коефіцієнта потужності.

Струм одного поста 11 кВт:

$$I_{EVSE} = \frac{P_{EVSE}}{\sqrt{3} U_{LL} \cos \varphi} = \frac{11000}{1,732 \cdot 400 \cdot 1} = 15,9 \text{ А.} \quad (3.31)$$

Це відповідає типовому виконанню 11 кВт як трифазного режиму 16 А на фазу.

Максимальний струм на вводі при обмеженні активної потужності 50 кВт:

$$I_{in,lim} = \frac{P_{lim}}{\sqrt{3} U_{LL} \cos \varphi} = \frac{50000}{1,732 \cdot 400} = 72,2 \text{ А.} \quad (3.32)$$

З урахуванням запасу на можливі короточасні перевищення, похибки вимірювання та роботи допоміжних навантажень (контролер, комунікаційне обладнання), приймається коефіцієнт запасу $k_s = 1,25$. Тоді розрахунковий струм для вибору ввідного автомата:

$$I_{in,calc} = k_s \cdot I_{in,lim} = 1,25 \cdot 72,2 = 90,3 \text{ А.} \quad (3.33)$$

Отже, за номіналом захисту доцільно прийняти ввідний автоматичний вимикач $I_n = 100 \text{ А}$ (трифазний).

Для кожного зарядного поста при струмі $\sim 16 \text{ А}$ приймається автоматичний вимикач на лінію поста $I_n = 16 \text{ А}$ з характеристикою, придатною для електронних навантажень. Також для ліній заряджання необхідний диференційний захист, оскільки зарядні пристрої є силовою електронікою і можуть формувати витоки з постійною складовою. На рівні конструкторського розрахунку приймається, що кожен пост має диференційний захист номіналом $I_{\Delta n} = 30 \text{ мА}$ з виконанням, сумісним із зарядними пристроями.

Для первинного підбору перерізу кабелів використовується спрощений підхід за допустимою густиною струму для мідного провідника:

$$S \approx \frac{I}{J}, \quad (3.34)$$

де J – допустима густина струму. Для кабелів у типових умовах прокладання приймається $J = 4 \text{ А/мм}^2$.

Тоді для лінії одного поста:

$$S_{EVSE} \approx \frac{16}{4} = 4 \text{ мм}^2.$$

Для ввідної лінії за розрахунковим струмом $I_{in,calc} \approx 90 \text{ А}$:

$$S_{in} \approx \frac{90}{4} = 22,5 \text{ мм}^2.$$

Конструктивно найближчим стандартним перерізом є 25 мм^2 для мідного кабелю на вводі.

3.3.4 Перевірка по ліміту приєднання та алгоритм обмеження потужності

Оскільки $P_{inst} = 66 \text{ кВт} > P_{lim} = 50 \text{ кВт}$, робота станції повинна здійснюватися з активним обмеженням сумарної потужності. Технічно це реалізується функцією керування навантаженням, яка регулює потужність кожного поста так, щоб виконувалась умова:

$$\sum_{i=1}^n P_i(t) \leq P_{lim}. \quad (3.35)$$

Для конструкторського обґрунтування приймається проста, але коректна стратегія розподілу потужності: рівномірний розподіл між активними постами. Якщо у момент часу підключено n_a автомобілів, то:

$$P_i(t) = \min \left(P_{EVSE}, \frac{P_{lim}}{n_a} \right). \quad (3.36)$$

Це гарантує, що при зростанні кількості підключених авто потужність кожного зменшується, але сумарна потужність не перевищує ліміт. За рахунок того, що добова енергія $E_{d,total}$ відносно невелика, а вікно заряджання тривале, така стратегія забезпечує виконання енергетичної потреби без жорстких вимог до пікових потужностей.

Перевірка “енергетичної достатності” при ліміті 50 кВт: максимальна енергія, яку можна передати за 8 год при повному використанні ліміту:

$$E_{max,lim} = P_{lim} \cdot t_{park} = 50 \cdot 8 = 400 \text{ кВт\год}. \quad (3.37)$$

Порівняння:

$$E_{max,lim} = 400 \gg E_{d,total} = 117,4 \text{ кВт\год}.$$

Отже, навіть за наявності ліміту приєднання 50 кВт станція має значний запас по енергетичній продуктивності, а основним завданням керування є не встигнути зарядити, а забезпечити рівномірний профіль навантаження, не перевищуючи обмеження мережі та підвищуючи частку споживання енергії від сонячної генерації

3.4 Розрахунок джерела енергії на сонячних батареях

Далі виконано розрахунок параметрів джерела енергії на сонячних батареях для забезпечення зарядної станції, параметри якої визначено в 3.3. Розрахунок ведеться для прийнятого сценарію корпоративної стоянки (09:00–

17:00), де заряджання відбувається переважно в денний період і може бути синхронізоване з генерацією PV. Архітектура джерела енергії приймається як мережево-інтегрована: PV-масив $\rightarrow$ мережевий інвертор $\rightarrow$ АС-шина 0,4 кВ об'єкта $\rightarrow$ зарядні пости з обмеженням сумарної потужності $P_{lim} = 50$ кВт. Мережа при цьому виконує роль балансуєчого джерела в години недостатньої генерації.

3.4.1 Вихідні дані для розрахунку PV-генерації

З 3.1 та 3.3 прийнято:

- добова потреба енергії для заряджання 10 авто (з урахуванням втрат заряджання):

$$E_{d,total} = 117,4 \text{ кВт\год/добу}$$

- вікно заряджання: $t_{park} = 8 \text{ год}(09:00-17:00)$;
- ліміт потужності приєднання: $P_{lim} = 50$ кВт.

Для оцінки добового виробітку PV прийнято розрахунковий питомий виробіток:

- питомий добовий виробіток за інсоляцією: $Y_{PV} = 3,5 \text{ кВт\год/(кВт\пik\добу)}$;
- коефіцієнт системних втрат (температура модулів, кабелі DC, забруднення, невідповідність модулів): $k_{loss} = 0,85$;
- ККД мережевого інвертора: $\eta_{inv} = 0,98$.

Тоді реальний корисний добовий виробіток на 1 кВт\пik встановленої потужності:

$$Y_{eff} = Y_{PV} \cdot k_{loss} \cdot \eta_{inv} = 3,5 \cdot 0,85 \cdot 0,98 = 2,915 \text{ кВт\год/(кВт\пik\добу)}.$$

3.4.2 Розрахунок необхідної встановленої потужності PV

Необхідна встановлена потужність сонячної електростанції для покриття добової енергії заряджання:

$$P_{PV,req} = \frac{E_{d,total}}{Y_{eff}} = \frac{117,4}{2,915} = 40,27 \text{ кВт\пik}. \quad (3.38)$$

Отримане значення є розрахунковим для середньої доби. Для забезпечення запасу на короткочасні зниження генерації (хмарність, нерівномірність

навантаження, часткове затінення) доцільно прийняти найближче більше стандартне значення встановленої потужності. Приймаємо:

$$P_{PV,inst} \approx 41,8 \text{ кВт\пік.}$$

Перевірка добового виробітку при прийнятій потужності:

$$E_{PV,d} = P_{PV,inst} \cdot Y_{eff} = 41,8 \cdot 2,915 = 121,8 \text{ кВт\год/добу.}$$

Це покриває $E_{d,total} = 117,4 \text{ кВт\год/добу}$ із невеликим запасом близько $4,4 \text{ кВт\год/добу}$, який компенсує випадкові втрати та нерівномірність.

3.4.3 Вибір фотоелектричних модулів і кількості панелей

Для конструкторського розрахунку приймається сучасний кремнієвий модуль великої потужності (типове виконання для навісів/плоских дахів):

- номінальна потужність модуля: $P_m = 550 \text{ Вт\пік}$;
- напруга в точці максимальної потужності: $V_{mp} = 41,5 \text{ В}$;
- струм у точці максимальної потужності: $I_{mp} = 13,25 \text{ А}$;
- напруга холостого ходу: $V_{oc} = 49,5 \text{ В}$;
- температурний коефіцієнт напруги холостого ходу: $\beta_{Voc} = -0,29\%$;
- орієнтовна площа одного модуля: $S_m \approx 2,6 \text{ м}^2$.

Кількість модулів:

$$N_m = \frac{P_{PV,inst}}{P_m} = \frac{41,8 \cdot 10^3}{550} = 76 \text{ шт.} \quad (3.39)$$

Перевірка:

$$P_{PV,inst} = N_m \cdot P_m = 76 \cdot 0,55 = 41,8 \text{ кВт\пік.}$$

Оцінимо орієнтовну площу PV-навісу (без урахування проходів і зазорів):

$$S_{PV} = N_m \cdot S_m = 76 \cdot 2,6 = 197,6 \text{ м}^2.$$

З урахуванням монтажних зазорів, ухилу та технологічних проходів доцільно прийняти 10–15% запас площі, тобто близько 220 м^2 .

3.4.4 Вибір інвертора та узгодження потужностей з зарядною станцією

Оскільки зарядна станція має ліміт приєднання $P_{lim} = 50 \text{ кВт}$, а встановлена потужність PV $41,8 \text{ кВт\пік}$, то PV-інвертор доцільно вибирати з номінальною АС потужністю близько 40 кВт , щоб:

- не перевищувати можливості об'єкта по струмах на АС стороні;
- забезпечити високий ККД у робочій зоні;

- мати допустимий DC/AC коефіцієнт близько 1,0–1,2.

Приймаємо мережевий трифазний інвертор:

- номінальна AC потужність: $P_{inv} = 40$ кВт;
- напруга мережі: $U_{LL} = 400$ В;
- максимальна DC напруга: $U_{DC,max} = 1100$ В;
- робочий діапазон MPPT: умовно 200–1000 В (для перевірок достатньо відповідності рівням стрінгів).

DC/AC співвідношення:

$$\frac{P_{PV,inst}}{P_{inv}} = \frac{41,8}{40} = 1,045.$$

Це є допустимим і забезпечує ефективне використання інвертора.

Максимальний струм інвертора на AC стороні:

$$I_{AC,inv} = \frac{P_{inv}}{\sqrt{3} U_{LL}} = \frac{40000}{1,732 \cdot 400} = 57,7 \text{ А.} \quad (3.40)$$

Для вибору захисту та кабелю на AC стороні з урахуванням запасу $k_s = 1,25$:

$$I_{AC,calc} = 1,25 \cdot 57,7 = 72,1 \text{ А.}$$

Отже, доцільний номінал автомата інвертора – 80 А (трифазний).

3.4.5 Розрахунок стрінгової конфігурації (DC сторона)

Ключовим є обмеження по максимальній DC напрузі в холодних умовах. Напруга холостого ходу модуля зростає при зниженні температури. Приймаємо мінімальну температуру навколишнього середовища $T_{min} = -20^\circ\text{C}$. Тоді приріст відносної напруги:

$$\Delta = |\beta_{Voc}| \cdot (25 - T_{min}) = 0,0029 \cdot (25 - (-20)) = 0,0029 \cdot 45 = 0,1305.$$

$$V_{oc,cold} = V_{oc} \cdot (1 + \Delta) = 49,5 \cdot 1,1305 = 55,98 \text{ В.}$$

Вибираємо довжину стрінгу $n_s = 19$ модулів, перевіряючи максимальну напругу:

$$V_{string,oc,cold} = n_s \cdot V_{oc,cold} = 19 \cdot 55,98 = 1063,6 \text{ В} < U_{DC,max} = 1100 \text{ В.}$$

Отже, 19 модулів у стрінгу допустимі.

Робоча напруга стрінгу в точці максимальної потужності (за STC):

$$V_{string,mp} = n_s \cdot V_{mp} = 19 \cdot 41,5 = 788,5 \text{ В.}$$

Це відповідає типовому діапазону MPPT інвертора.

Кількість стрінгів при 76 модулях:

$$N_s = \frac{N_m}{n_s} = \frac{76}{19} = 4 \text{ стрінги.}$$

Струм одного стрінгу в робочій точці:

$$I_{string,mp} = I_{mp} = 13,25 \text{ А.}$$

Сумарний струм при паралельному підключенні 4 стрінгів:

$$I_{DC,total} \approx N_s \cdot I_{string,mp} = 4 \cdot 13,25 = 53,0 \text{ А.}$$

Якщо інвертор має 2 MPPT-трекери, доцільно підключити по 2 стрінги на кожен MPPT:

$$I_{MPPT} \approx 2 \cdot 13,25 = 26,5 \text{ А.}$$

Для вибору запобіжників стрінгів використовується правило: номінал запобіжника беруть не менше ніж $1,25 \cdot I_{sc}$. Для інженерного розрахунку можна прийняти, що I_{sc} на 5–10% більший за I_{mp} ; прийmemo $I_{sc} \approx 1,08 \cdot I_{mp} = 14,3 \text{ А}$. Тоді:

$$I_{fuse} \geq 1,25 \cdot 14,3 = 17,9 \text{ А.}$$

Конструктивно приймається стандартний номінал 20 А DC-запобіжника на стрінг.

3.4.6 Узгодження PV з навантаженням зарядної станції та мережею

Максимальна активна потужність заряджання обмежена $P_{lim} = 50 \text{ кВт}$, тоді як PV-інвертор має $P_{inv} = 40 \text{ кВт}$. Це означає, що навіть у години пікової сонячної генерації повне живлення зарядної станції тільки від PV можливе лише до 40 кВт, а решта (за потреби) добирається з мережі. За прийнятого добового енергоспоживання 117,4 кВт\год та розрахункового виробітку 121,8 кВт\год потенційно можливо забезпечити переважну частину енергії заряджання сонячною генерацією, але фактична частка залежить від збігу профілів у часі.

Для конструкторського оцінювання вводимо коефіцієнт одночасності використання PV-енергії на заряджання k_{sim} , який відображає, яка частка виробленої за добу сонячної енергії реально споживається зарядною інфраструктурою в момент генерації (без накопичувача). Для офісного сценарію

з заряджанням у денні години приймаємо реалістичне значення $k_{sim} = 0,85$.

Тоді добова енергія, яка буде використана безпосередньо на заряджання:

$$E_{PV \rightarrow EV} = k_{sim} \cdot E_{PV,d} = 0,85 \cdot 121,8 = 103,5 \text{ кВт\год/добу.}$$

Дефіцит, який покривається мережею:

$$E_{grid} = E_{d,total} - E_{PV \rightarrow EV} = 117,4 - 103,5 = 13,9 \text{ кВт\год/добу.}$$

Це пояснює, чому навіть при достатній середній сонячній енергії мережа залишається необхідною: частина заряджання може припасти на години нижчої генерації, а також можливі похмурі дні.

4 НАУКОВО-ДОСЛІДНИЙ РОЗДІЛ

4.1 Математичний опис процесу заряджання електромобілів

Процес заряджання електромобіля в системі з фотоелектричними панелями, накопичувачем енергії та підключенням до електромережі доцільно описувати як сукупність енергетичних перетворень і керованих потоків потужності в часі. Фізично система включає: сонячну електростанцію (PV), силову електроніку узгодження (інвертори/перетворювачі), стаціонарний акумулятор (за наявності), зарядні пристрої (AC або DC) та акумуляторну батарею електромобіля. Математична модель повинна забезпечити: баланс потужностей у вузлі підключення, обмеження по зарядній інфраструктурі та накопичувачу, виконання попиту на заряд (енергію), можливість порівняння стратегій керування заряджанням за критеріями вартості/піків потужності/частки ВДЕ.

Для узгодження з практикою аналізу профілів навантаження та тарифів доцільно застосувати дискретну модель у часі з кроком Δt . У дослідженні-аналозі енергетичні баланси формуються для кожного інтервалу j тривалістю 15 хв, тобто $\Delta t = 0.25$ год.

Нехай:

- $P_{EV,j}$ – сумарна потужність, що подається на заряджання електромобілів у інтервалі j (кВт);
- $P_{PV,j}$ – потужність генерації сонячної електростанції (кВт);
- $P_{GP,j}$, $P_{GS,j}$ – потужність купівлі з мережі та продажу в мережу відповідно (кВт);
- $P_{batC,j}$, $P_{batD,j}$ – потужності заряджання/розряджання стаціонарного накопичувача (кВт);
- $E_{bat,j}$ – запас енергії (стан заряду в енергетичних одиницях) стаціонарного накопичувача (кВт·год).

Перехід від потужності до енергії на інтервалі виконується стандартно:

$$E_{x,j} = P_{x,j} \Delta t, E_{x,\Sigma} = \sum_{j=1}^N P_{x,j} \Delta t, \quad (4.1)$$

де N – кількість інтервалів у розрахунковому періоді.

У практичних задачах заряджання зручно пов'язувати зесійні показники (енергія на сесію та тривалість підключення) із середньою потужністю заряджання. Для однієї зарядної сесії:

$$E_{EV}^{session} = t_{EV}^{session} \cdot P_{EV}, \quad (4.2)$$

де $E_{EV}^{session}$ – енергія заряджання за сесію (кВт·год), $t_{EV}^{session}$ – тривалість сесії (год), P_{EV} – (середня) потужність заряджання (кВт).

З огляду на те, що «вікно підключення» часто значно довше за фактичний час заряджання, виникає гнучкість керування (можливість переносити заряд у межах часу підключення). Для прикладу, середні дані по повільних АС-зарядках показують: енергія близько 14.9 кВт·год/сесію та час підключення близько 14 год/сесію, тоді як час заряджання становить близько 2.3 год/сесію, а решта – простій у підключеному стані. Для швидких ДС-зарядок, навпаки, час підключення близько 0.5 год/сесію і гнучкість суттєво менша.

Якщо стратегія передбачає заряджання у визначених часових вікнах, то для забезпечення заданої енергії за сесію при фіксованому «вікні» $t_{EV}^{scheduled}$ необхідно узгодити обмеження по максимально допустимій потужності:

$$P_{EV}^{max} = P_{scheduled} = \frac{E_{EV}^{session}}{t_{EV}^{scheduled}}. \quad (4.3)$$

Таке задання фактично стискає свободу керування всередині вікна, оскільки для досягнення цільової енергії доводиться працювати на верхній межі потужності впродовж усього вікна.

У подальшому, для групи транспортних засобів, що заряджаються паралельно, $P_{EV,j}$ розглядається як агрегований керований попит (сумарна потужність усіх активних сесій), а часові вікна – як набір обмежень на допустимі інтервали, коли $P_{EV,j} \neq 0$.

Ключовим рівнянням, що пов'язує генерацію, попит та обмін з мережею, є баланс потоків потужності в кожному інтервалі j :

$$P_{EV,j} + P_{GS,j} + P_{batC,j} = P_{PV,j} + P_{batD,j} + P_{GP,j}. \quad (4.4)$$

Це рівняння відображає, що попит EV, заряд стаціонарної батареї та експорт у мережу мають бути покриті сумою генерації PV, розряду батареї та імпорту з мережі.

Обмін з мережею доцільно визначати через умовні співвідношення «дефіцит/надлишок». Для експорту в мережу:

$$P_{GS,j} = P_{PV,j} - (P_{EV,j} + P_{batC,j}), P_{GS,j} < P_{GS}^{max}, \quad (4.5)$$

де P_{GS}^{max} – обмеження мережі/підключення на експорт.

Для імпорту з мережі (покриття дефіциту):

$$P_{GP,j} = P_{PV,j} - (P_{EV,j} + P_{batD,j}). \quad (4.6)$$

На практиці в розрахунковій реалізації застосовується відсікання від'ємних значень, тобто експорт/імпорт не можуть бути одночасно додатними в одному інтервалі.

Для підвищення частки споживання локальної сонячної генерації та згладжування піків навантаження застосовується стаціонарний акумулятор. Його роботу доцільно описувати через обмеження на заряд/розряд та рівняння зміни енергії в часі.

Якщо генерація PV перевищує попит EV і акумулятор не досяг верхньої межі енергії, батарея заряджається величиною, що не перевищує технічну межу потужності заряджання, доступний надлишок PV, можливість добрати енергію до E_{bat}^{max} за крок Δt :

$$(E_{bat,j} < E_{bat}^{max} \wedge P_{PV,j} > P_{EV,j}) \Rightarrow P_{batC,j} = \min \left(P_{batC}^{max}; (P_{PV,j} - P_{EV,j}); (E_{bat}^{max} - E_{bat,j}) \cdot \frac{1}{\Delta t} \right). \quad (4.7)$$

У прикладі з $\Delta t = 0.25$ год множник $\frac{1}{\Delta t} = 4$.

Якщо генерація PV недостатня для покриття попиту EV і енергія батареї вище мінімального рівня, батарея розряджається:

$$(E_{bat,j} > E_{bat}^{min} \wedge P_{PV,j} < P_{EV,j}) \Rightarrow P_{batD,j} = \min \left(P_{batD}^{max}; (P_{EV,j} - P_{PV,j}); (E_{bat,j} - E_{bat}^{min}) \cdot \frac{1}{\Delta t} \right). \quad (4.8)$$

Динаміка енергії накопичувача з урахуванням ККД заряджання η_C та розряджання η_D :

$$E_{bat,j+1} = E_{bat,j} + \frac{P_{batC,j} \cdot \eta_C - \frac{P_{batD,j}}{\eta_D}}{4}. \quad (4.9)$$

Тут «/4» відповідає переходу від кВт до кВт·год за кроку 15 хв.

Для завершення математичного опису «від сонячної панелі до електромобіля» необхідно ввести змінну стану батареї електромобіля у вигляді енергії E_j^{EV} або відносного стану заряду SOC_j^{EV} . У дискретному часі найпростіша (але інженерно коректна для рівня енергобалансу) модель має вигляд:

$$E_{j+1}^{EV} = E_j^{EV} + \eta_{ch}^{EV} P_{EV,j} \Delta t, SOC_j^{EV} = \frac{E_j^{EV}}{E_{nom}^{EV}}, \quad (4.10)$$

де E_{nom}^{EV} – номінальна енергоємність тягової батареї, η_{ch}^{EV} – узагальнений ККД тракту заряджання (зарядний пристрій + силова електроніка + батарея). У задачі оптимізації заряджання зазвичай задають вимогу досягнення цільового стану заряду до моменту завершення вікна підключення:

$$SOC^{EV}(t_{dep}) \geq SOC_{target}^{EV}, \quad (4.11)$$

або еквівалентно через енергію $E^{EV}(t_{dep})$.

Якщо модель будується на рівні зарядних сесій, то умова виконання попиту зручно записується як:

$$\sum_{j \in \Omega_{conn}} P_{EV,j} \Delta t \geq E_{EV}^{session}, \quad (4.12)$$

де Ω_{conn} – множина інтервалів, коли транспортний засіб підключений (або дозволений до заряджання згідно стратегії).

Оскільки сонячна генерація є джерелом постійного струму, а зарядні пристрої часто працюють від шини змінного струму (AC) або потребують керованого DC-рівня, в моделі доцільно враховувати енергетичні втрати на перетворення. На концептуальному рівні траєкторія енергії включає: PV (DC) → інвертор (DC/AC) або DC/DC-каскад → зарядний пристрій (AC/DC або DC/DC) → батарея EV, причому регулювання напруги/струму в DC fast charging здійснюється випрямлячами та DC/DC перетворювачами з керуванням зарядною потужністю.

Тому в балансових співвідношеннях $P_{PV,j}$ та $P_{EV,j}$ бажано інтерпретувати як потужності вже «на шині системи» (після відповідних перетворювачів), або ж явно вводити коефіцієнти перетворення η_{inv} , $\eta_{dc/dc}$, η_{chg} і пов'язувати їх через:

$$P_{EV,j} = \eta_{path} P_{src,j}^{raw}, \eta_{path} = \eta_{inv} \eta_{dc/dc} \eta_{chg}. \quad (4.13)$$

Це дозволяє надалі коректно порівнювати стратегії, особливо для випадку високих потужностей DC-заряджання, де втрати та обмеження по струму/напрузі суттєві.

4.2 Стратегії реалізації заряджання з використанням сонячної енергії

У системах заряджання електромобілів, інтегрованих із сонячною генерацією, ключовою науково-практичною задачею є узгодження трьох процесів, що мають різну фізичну природу: стохастичної у часовому вимірі генерації фотоелектричних панелей $P_{PV}(t)$, обмеженої з точки зору мережі та силового обладнання доступної потужності P_{lim} і P_{EVSE} , вимог транспортних засобів до забезпечення цільової енергії заряджання у межах вікон підключення. На відміну від традиційного заряджання, де головною метою є мінімізація часу або спрощення доступу до зарядної точки, у ВДЕ-інтегрованих системах основна мета формулюється як задача керування потоками енергії, що включає максимізацію самоспоживання PV, зменшення імпорту з мережі, обмеження пікових відборів та забезпечення гарантованого рівня заряду до моменту від'їзду.

Запропоновано та формалізовано три стратегії реалізації заряджання з використанням сонячної енергії, які є різними за складністю, вимогами до даних та потенційною ефективністю: (1) базова стратегія “некерованого заряджання”, (2) стратегія “PV-слідкування з обмеженням мережі” (rule-based PV following), (3) оптимізаційна стратегія керування з прогнозом (predictive optimization).

Для забезпечення однозначності порівняння всі стратегії розглядаються в рамках єдиного математичного опису, де часовий горизонт дискретизовано з кроком Δt , а керована змінна $P_{EV,j}$ відображає сумарну потужність заряджання

електромобілів у інтервалі j . Умови енергетичного балансу, що пов'язують PV-генерацію, заряджання та обмін з мережею, приймаються у вигляді:

$$P_{EV,j} + P_{GS,j} = P_{PV,j} + P_{GP,j}, \forall j, \quad (4.14)$$

для випадку без стаціонарного накопичувача, що відповідає прийнятій у конструкторському розділі архітектурі. Додатково накладається мережеве обмеження:

$$0 \leq P_{GP,j} \leq P_{lim}, 0 \leq P_{EV,j} \leq P_{EVSE,\Sigma}, \quad (4.15)$$

де $P_{EVSE,\Sigma}$ – сумарна доступна потужність зарядних постів, а P_{lim} – ліміт точки приєднання ($P_{lim} = 50$ кВт, $P_{EVSE,\Sigma} = 66$ кВт). Оскільки $P_{EVSE,\Sigma} > P_{lim}$, фактичним обмеженням стає саме мережевий ліміт, а стратегія керування повинна розподіляти доступні 50 кВт між зарядними сесіями. Умову виконання попиту на заряджання в енергетичній формі для множини транспортних засобів $\mathcal{N}$ доцільно записувати як:

$$\sum_{j \in \Omega_i} P_{i,j} \Delta t \geq E_i, \forall i \in \mathcal{N}, \quad (4.16)$$

де $P_{i,j}$ – потужність заряджання i -го автомобіля, Ω_i – інтервали підключення, E_i – необхідна енергія до моменту від'їзду. Для агрегованої моделі використовується рівність $\sum_i P_{i,j} = P_{EV,j}$, а виконання попиту контролюється на рівні сумарної енергії за добу $E_{d,total}$ або на рівні групових/індивідуальних обмежень (за потреби детальної постановки).

4.2.1 Стратегія 1 – некероване (opportunistic) заряджання

Некероване заряджання є базовим сценарієм, коли кожен електромобіль починає заряджатися одразу після підключення до поста з максимально можливою потужністю P_{EVSE} (або з максимальною потужністю, яку дозволяє вбудований зарядний пристрій авто). Цей підхід є найпростішим, не потребує прогнозів або комунікації між зарядними постами, але формує максимальні піки навантаження та найнижчу керованість у мережі. У системі з PV-генерацією некероване заряджання може призводити до ситуацій, коли заряджання відбувається в години низької сонячної генерації, тоді як вдень виникає

надлишок PV, який не використовується локально і може бути експортований у мережу.

Математично стратегія описується правилом:

$$P_{i,j} = \begin{cases} P_{EVSE}, & j \in \Omega_i, E_{i,j}^{rem} > 0, \\ 0, & \text{інакше,} \end{cases} \quad (4.17)$$

де $E_{i,j}^{rem}$ – залишкова енергія, яку потрібно дозарядити. У випадку перевищення мережевого ліміту фактично виникає обмеження:

$$\sum_i P_{i,j} \leq P_{lim}, \quad (4.18)$$

яке в реальній мережі призводить або до аварійного відключення частини постів, або до спрацювання захисту, або до необхідності примусового обмеження потужності без оптимальної логіки. Тому для об'єктів з лімітом приєднання некероване заряджання є некоректним у довгостроковій експлуатації, але воно потрібне як базова лінія для порівняння ефекту від інтелектуальних стратегій.

Для оцінки мережевого впливу вводиться показник пікової потужності:

$$P_{grid}^{peak} = \max_j P_{GP,j},$$

а для оцінки використання сонячної енергії – коефіцієнт самоспоживання PV:

$$k_{self} = \frac{\sum_j \min(P_{PV,j}, P_{EV,j}) \Delta t}{\sum_j P_{PV,j} \Delta t}.$$

У некерованому режимі k_{self} буде тим вищим, чим більше зарядних сесій збігається з часом PV-генерації, але контролю над цим збігом стратегія не забезпечує.

4.2.2 Стратегія 2 – PV-слідкування з обмеженням мережі (rule-based PV following)

Друга стратегія полягає в тому, що заряджання намагається максимально спожити поточну сонячну потужність у реальному часі, тобто формувати $P_{EV,j}$ пропорційно $P_{PV,j}$, але з урахуванням технічних обмежень зарядної

інфраструктури та мінімальних вимог до енергії заряджання до моменту від'їзду. Її принципова перевага – максимізація прямого використання PV без необхідності складної оптимізації. Водночас недоліком є те, що стратегія є реактивною: вона реагує на поточний виробіток, але не гарантує виконання цільового заряду, якщо в другій половині дня генерація різко впаде. Тому в практичній реалізації правило доповнюється “страхувальною” компонентою, яка активує відбір з мережі при ризику недозаряду.

У найпростішій формі PV-слідкування для агрегованого попиту задається:

$$P_{EV,j} = \min (P_{EVSE,\Sigma}, P_{PV,j} + P_{grid}^{allow}), \quad (4.19)$$

де P_{grid}^{allow} – дозволена складова імпорту з мережі, що обмежується P_{lim} . Оскільки імпорт з мережі в будь-якому випадку не може перевищувати ліміту, загальне обмеження має вигляд:

$$P_{EV,j} \leq P_{PV,j} + P_{lim}.$$

Для системи без експорту в мережу (пріоритет самоспоживання) правило коректніше задавати через мінімізацію експорту:

$$P_{EV,j} = \min (P_{EVSE,\Sigma}, P_{PV,j}),$$

а дефіцит енергії компенсувати в другій половині дня мережевим заряджанням. Щоб гарантувати виконання енергетичної вимоги, вводиться прогноз залишкової доступної PV-енергії до кінця вікна заряджання:

$$\hat{E}_{PV,j}^{rem} = \sum_{k=j}^{J_{end}} \hat{P}_{PV,k} \Delta t,$$

та умова страхування:

$$\text{якщо } E_{need,j}^{rem} > \hat{E}_{PV,j}^{rem} \cdot \eta_{ch}, \quad \text{то } P_{EV,j} \leftarrow \min (P_{EVSE,\Sigma}, P_{PV,j} + P_{grid,add}), \quad (4.20)$$

де $E_{need,j}^{rem}$ – залишкова енергія, яку треба передати до кінця дня, $P_{grid,add}$ – додаткова мережна потужність, яку дозволено залучити.

Для багатьох автомобілів у паралельному заряджанні необхідний механізм розподілу потужності між постами. Найпростіший фізично коректний варіант – рівномірний розподіл:

$$P_{i,j} = \min (P_{EVSE}, \frac{P_{EV,j}}{n_{a,j}}), \quad (4.21)$$

де $n_{a,j}$ – кількість активних (підключених і таких, що потребують енергії) автомобілів у інтервалі j . Це узгоджується з практикою обмеження сумарної потужності зарядної станції при перевищенні ліміту точки приєднання (див. 3.3) і є достатнім для наукового аналізу ефекту PV-слідкування.

Ефективність цієї стратегії оцінюється за показниками:

- k_{self} – частка використаної PV-енергії;
- $E_{grid} = \sum_j P_{GP,j} \Delta t$ – енергія, взята з мережі;
- P_{grid}^{peak} – пікова потужність імпорту;
- рівень виконання попиту $\gamma = \frac{E_{delivered}}{E_{required}}$.

4.2.3 Стратегія 3 – прогнозно-оптимізаційне керування (predictive optimization / MPC)

Третя стратегія є найбільш науково обґрунтованою, оскільки формулює керування заряджанням як задачу оптимізації з обмеженнями. На відміну від реактивних правил, прогнозно-оптимізаційний підхід враховує майбутні значення генерації PV, очікувані події підключення/від'їзду, енергетичні потреби кожного автомобіля та обмеження мережі. Формально стратегія може бути реалізована як оптимізація на горизонті доби або як покрокова оптимізація з ковзним горизонтом (Model Predictive Control), де рішення перераховується кожні Δt_{xv} з використанням оновлених вимірювань та прогнозів.

Цільова функція може бути сформульована залежно від пріоритетів: мінімізація вартості енергії з мережі, мінімізація пікової потужності, максимізація самоспоживання PV або їх комбінація. Для розгляду в цій роботі доцільно застосувати зважену суму критеріїв:

$$\min_{\{P_{i,j}\}} [\sum_j c_j P_{GP,j} \Delta t + \lambda_1 \max_j P_{GP,j} + \lambda_2 \sum_j P_{GS,j} \Delta t], \quad (4.22)$$

де c_j – тариф/вартість електроенергії з мережі у інтервалі j , λ_1 – ваговий коефіцієнт штрафу за пікову потужність, λ_2 – штраф за експорт (як показник втрати потенційної PV-енергії для локального використання).

Якщо тариф у межах доби вважається сталим, то перший доданок зводиться до мінімізації загальної енергії з мережі, а піковий доданок забезпечує згладжування навантаження.

Модель включає стандартні технічні обмеження:

$$0 \leq P_{i,j} \leq P_{EVSE}, \forall i, j,$$

$$\sum_i P_{i,j} \leq P_{lim} + P_{PV,j}, \forall j,$$

а також баланс потужності:

$$P_{GP,j} - P_{GS,j} = \sum_i P_{i,j} - P_{PV,j}, P_{GP,j} \geq 0, P_{GS,j} \geq 0.$$

Для кожного автомобіля умова виконання попиту:

$$\sum_{j \in \Omega_i} P_{i,j} \Delta t \geq E_i.$$

За потреби вводиться кінцева умова по SoC:

$$SOC_i(t_{dep}) \geq SOC_{i,target}.$$

Для прийнятого об'єкта: $P_{lim} = 50$ кВт, $n = 6$, $P_{EVSE} = 11$ кВт, добова потреба $E_{d,total} = 117,4$ кВт\год. У середньому протягом 8 годин достатньо забезпечити 14,68 кВт сумарної потужності. Це означає, що оптимізаційний алгоритм має великий ступінь свободи: він може майже повністю вписати заряджання під профіль $P_{PV}(t)$, зменшуючи імпорт з мережі до мінімуму, і при цьому не створювати піків, близьких до P_{lim} . З цієї причини прогнозно-оптимізаційна стратегія очікувано забезпечить максимальну частку самоспоживання PV і найменшу енергію з мережі в порівнянні з некерованим та реактивним PV-слідкуванням.

5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

5.1 Небезпеки та ризики під час експлуатації електрифікованих транспортних засобів

Експлуатація електрифікованих транспортних засобів (гібридних і повністю електричних) супроводжується комплексом небезпек, які частково є спільними для традиційних автомобілів, однак мають принципово іншу природу, рівень енергії та наслідки через наявність високовольтної електричної системи, тягової батареї, силової електроніки та специфічних режимів заряджання. У контексті охорони праці ці ризики проявляються як для водіїв і персоналу, що експлуатує автомобіль, так і для працівників, які виконують технічне обслуговування, діагностику, ремонт або експлуатацію зарядної інфраструктури. Для даної роботи, де розглядається заряджання з використанням сонячної енергії, особлива увага приділяється безпечній взаємодії “транспортний засіб – зарядний пристрій – електромережа/джерело ВДЕ”, оскільки в цьому ланцюгу наявні як електричні, так і пожежо-вибухові, термічні та організаційні ризики.

Найбільш критичним класом небезпек є ураження електричним струмом та електрична дуга внаслідок роботи з високовольтними колами. У електромобілях та PHEV тяговий контур має напругу сотні вольт, а струми під час прискорення або швидкого заряджання можуть досягати сотень ампер. Ураження може виникати при пошкодженні ізоляції, порушенні цілісності кабельних трас, неправильному від'єднанні високовольтних роз'ємів, помилках під час сервісних робіт або при аварії транспортного засобу. Небезпека полягає не лише в прямому контакті, а й у можливості виникнення електричної дуги, яка супроводжується високою температурою, опіками, механічною дією та вторинними пожежами. Для експлуатаційного персоналу це означає необхідність чіткого розмежування робіт за рівнем доступу до високовольтних систем, використання індивідуальних засобів захисту, а також дотримання процедур знеструмлення, перевірки відсутності напруги та блокування повторного ввімкнення.

Другим критичним ризиком є пожежна небезпека та термічні аварії тягових батарей. Літій-іонні батареї мають високу енергетичну щільність і при

пошкодженні або ненормальних режимах можуть переходити у стан теплового розгону, коли локальний перегрів запускає лавиноподібні екзотермічні реакції, що призводить до виділення великої кількості тепла, диму та горючих газів. Причинами можуть бути механічні пошкодження елементів батареї, внутрішні короткі замикання, перезаряд, перегрів унаслідок відмови системи термоджерування, виробничі дефекти або неправильні умови експлуатації. Особливістю таких пожеж є складність гасіння, повторне займання та токсичність продуктів горіння. Для охорони праці важливо враховувати, що на ранніх стадіях інцидент може проявлятися не полум'ям, а аномальним нагрівом, характерним запахом, димом або повідомленнями системи діагностики, тому персонал повинен бути навчений розпізнавати ці ознаки та діяти за встановленим алгоритмом.

Суттєвим класом небезпек є газові та хімічні фактори. У разі пошкодження батареї або пожежі можливе виділення токсичних та корозійно-активних сполук, а також дрібнодисперсних аерозолів, які становлять небезпеку для органів дихання та слизових оболонок. Навіть без горіння при порушенні герметичності батарейного блоку можливі витіки електроліту, який є хімічно активним і може спричинити опіки. Для персоналу це означає необхідність застосування засобів захисту органів дихання та шкіри при роботі з пошкодженими батареями, а також ізоляцію зони аварії й організацію провітрювання. У виробничих умовах важливою є наявність регламентованих місць тимчасового зберігання пошкоджених батарей, які мінімізують ризик повторного займання та контакт персоналу з токсичними продуктами.

Окрему групу становлять ризики, пов'язані із заряджанням транспортних засобів. Процес заряджання є режимом підвищеної електричної та термічної напруженості, оскільки відбувається тривале проходження струму, робота силових перетворювачів та нагрів контактних елементів. Небезпека може виникати при використанні несправних кабелів, забруднених або зношених контактів, невідповідності номіналів захисту, порушенні герметичності роз'ємів під час опадів, а також при некоректній роботі системи керування зарядом. Ризик зростає при застосуванні подовжувачів, нештатних перехідників, саморобних з'єднань або при підключенні до мереж із поганою якістю заземлення. В умовах зарядної станції на базі ВДЕ додатково актуальними є ризики, пов'язані з

перемиканнями режимів роботи інвертора, можливими коливаннями напруги, наявністю DC-ланцюгів фотоелектричного масиву та необхідністю забезпечення селективності захисту як на AC, так і на DC стороні.

При експлуатації електрифікованих транспортних засобів важливими є також механічні та ергономічні ризики, які опосередковано пов'язані з електричною частиною. Тягові батареї мають значну масу, тому в конструкції автомобіля змінюється розподіл мас, а у разі ремонту або демонтажу батарейного модуля виникають ризики травм через підйом важких вантажів, неправильне стропування та переміщення. Для сервісного персоналу характерними є ризики защемлення, падіння вантажу, травм опорно-рухового апарату. Окрім цього, електрифіковані автомобілі часто мають високий крутний момент з нульових обертів і можуть рухатися майже безшумно, що створює ризики наїзду або травмування людей у зонах паркування та сервісних майданчиках, особливо якщо не організовано контроль руху та сигналізацію.

Ризики аварійних ситуацій підвищуються при дорожньо-транспортних пригодах, затопленні, пожежах у приміщенні або пошкодженні зарядної інфраструктури. У випадку ДТП можливе пошкодження високовольтних кабелів та батарейного блока з подальшим виникненням короткого замикання або теплового розгону. При затопленні небезпека пов'язана з можливим порушенням ізоляції та неконтрольованими струмами витоку. В умовах парковок та зарядних хабів важливо враховувати ризик наїзду транспортного засобу на зарядний пост, руйнування корпусу, оголення провідників та виникнення дуги. Такі сценарії вимагають конструктивних заходів безпеки, зокрема механічного захисту постів, правильного розміщення, наявності аварійного вимикача та алгоритмів автоматичного відключення при пошкодженні або виникненні струмів витоку.

5.2 Системний підхід до захисту населення і територій у разі загрози або виникнення надзвичайних ситуацій

Захист населення і територій у разі загрози або виникнення надзвичайних ситуацій (НС) є однією з ключових функцій державного управління, спрямованою на збереження життя людей, захист інфраструктури та мінімізацію

негативного впливу на довкілля. Концепція цього захисту, затверджена на державному рівні, враховує комплекс заходів, які мають забезпечити оперативне реагування на НС, їхню профілактику, а також ефективну ліквідацію наслідків.

В основі концепції лежить системний підхід, який включає прогнозування, планування, координацію дій, впровадження інноваційних технологій і міжнародну співпрацю. Надзвичайні ситуації поділяються на техногенні, природні, соціально-політичні та військові, кожна з яких має свої особливості та потребує специфічних підходів до реагування. До техногенних НС належать аварії на виробництвах, вибухи, витoki небезпечних хімічних або радіоактивних речовин, а також транспортні катастрофи. Природні НС включають стихійні лиха, такі як землетруси, повені, урагани, а також екологічні катастрофи, пов'язані із забрудненням повітря чи води.

Першим етапом системи захисту є розробка та впровадження нормативно-правових актів, які регулюють діяльність у сфері попередження та реагування на НС. Це включає створення чітких регламентів, інструкцій і стандартів, які визначають порядок дій органів влади, підприємств і населення у разі загрози. Наприклад, в Україні прийнято відповідне положення про класифікацію надзвичайних ситуацій, яке дозволяє чітко ідентифікувати подію як НС, оцінити її масштаби та визначити рівень реагування.

Наступним важливим компонентом є прогнозування та оцінка ризиків виникнення НС. За допомогою сучасних аналітичних методів і систем моніторингу можливо передбачити потенційні загрози, оцінити їхній вплив на населення та економіку і вжити профілактичних заходів. Наприклад, при прогнозуванні природних катастроф використовуються дані про метеорологічні та сейсмічні умови, а при оцінці техногенних ризиків – технічний стан об'єктів інфраструктури.

Ключову роль у захисті населення відіграє система сповіщення, яка повинна оперативно інформувати громадян про загрозу та порядок дій у разі НС. Система оповіщення включає використання сучасних технологій, таких як мобільні повідомлення, радіо, телебачення, а також автоматизовані системи передавання сигналів тривоги. Ефективна система оповіщення дозволяє мінімізувати паніку серед населення і забезпечити організовану евакуацію, якщо це необхідно.

Захист населення також передбачає створення інфраструктури для укриття і евакуації. Це включає будівництво та утримання захисних споруд, таких як бомбосховища, укриття на випадок хімічного чи радіаційного забруднення, а також планування маршрутів евакуації. Наприклад, у разі техногенної аварії з викидом токсичних речовин важливо мати детальні плани евакуації для кожного району, які враховують кількість населення, доступні транспортні засоби та альтернативні шляхи.

Ще одним важливим аспектом є підготовка та навчання населення правилам поведінки під час НС. Це включає регулярні тренінги, навчання в школах і на підприємствах, розробку інформаційних матеріалів, які пояснюють порядок дій у разі загрози. Наприклад, для працівників хімічної промисловості проводяться спеціальні навчання, які дозволяють швидко реагувати на витoki небезпечних речовин.

Реагування на надзвичайні ситуації включає проведення рятувальних операцій, надання медичної допомоги постраждалим, забезпечення населення продуктами харчування, водою та тимчасовим житлом. У разі НС техногенного або природного характеру до реагування залучаються спеціалізовані рятувальні служби, військові формування та добровольчі організації. Оперативність і злагодженість їхніх дій дозволяють зменшити втрати та швидше повернутися до нормального функціонування.

Фінансування заходів із запобігання НС і реагування на них є важливим компонентом системи захисту. У державному бюджеті виділяються кошти на створення фондів для фінансування профілактичних заходів, підтримки спеціалізованих служб і придбання необхідного обладнання. Місцеві бюджети також залучаються до фінансування заходів, які стосуються конкретних регіонів.

Таким чином, концепція захисту населення і територій у разі загрози або виникнення НС є багатогранною системою, яка включає профілактику, реагування та ліквідацію наслідків. Вона спрямована на збереження життя людей, мінімізацію матеріальних втрат і забезпечення сталого розвитку суспільства. Реалізація цієї концепції потребує чіткої координації дій між державними органами, підприємствами та громадянами, що дозволяє підвищити рівень національної безпеки та зменшити ризики, пов'язані з надзвичайними ситуаціями.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Проведене дослідження дозволило комплексно обґрунтувати актуальність інтеграції процесу заряджання електро- та гібридних транспортних засобів із відновлювальними джерелами енергії в умовах зростання електромобільності та обмежень розподільчих мереж. Розглянуті тенденції розвитку ринку й інфраструктури підтвердили доцільність переходу від традиційної моделі “зарядна станція як навантаження” до енергетично керованого вузла, де генерація сонячної енергії використовується для зниження мережевого споживання та підвищення енергонезалежності об’єктів.

2. У роботі виконано розрахунок силової частини електромобіля на основі сил опору руху та характерних режимів експлуатації, що дозволило визначити вимоги до тягового електропривода й батареї за потужністю, моментом і струмовими навантаженнями. Одержані параметри підтвердили технічну реалістичність прийнятого класу транспортного засобу та забезпечили числову базу для формування коректних вимог до режимів заряджання і узгодження їх із можливостями зарядної інфраструктури.

3. Розрахунок параметрів зарядної станції з урахуванням ліміту приєднаної потужності показав, що ключовим фактором ефективної експлуатації є кероване обмеження сумарної потужності заряджання та раціональний розподіл її між одночасно підключеними транспортними засобами. Обґрунтовано вибір конфігурації АС-зарядних постів, струмових навантажень і захисної апаратури, а також доведено енергетичну достатність прийнятого рішення для забезпечення добової потреби заряджання в рамках робочого вікна підключення.

4. На основі енергетичного балансу та розрахункових параметрів сонячної електростанції визначено необхідну встановлену потужність PV-джерела, кількість фотоелектричних модулів, параметри інвертора і стрінгову конфігурацію з урахуванням обмежень по напрузі в холодних умовах. Отримані результати підтвердили можливість суттєвого покриття добової потреби заряджання за рахунок сонячної генерації при збереженні ролі мережі як

балансуючого джерела, що забезпечує надійність системи в умовах мінливої інсоляції.

5. У науково-дослідній частині сформовано математичний опис процесу заряджання як системи керованих енергетичних потоків між PV-генерацією, мережею та групою електромобілів у дискретному часі, що створює основу для подальшої оптимізації та порівняння стратегій керування. Запропоновані стратегії реалізації заряджання з використанням сонячної енергії демонструють, що перехід від некерованого до прогнозно-оптимізаційного керування дозволяє підвищити частку самоспоживання ВДЕ, зменшити імпорт з мережі та пікові навантаження при гарантуванні виконання енергетичних вимог користувачів у межах заданих вікон підключення.

БІБЛІОГРАФІЯ

1. International Energy Agency (IEA). Global EV Outlook 2025. Paris: IEA, 2025.
2. International Renewable Energy Agency (IRENA). Ukraine: Renewable Energy Statistics Profile (Europe). Abu Dhabi: IRENA, 2025.
3. Denholm, P., Margolis, R., Brinkman, G., Drury, E., Hand, M., & Mowers, M. Distributed Solar Photovoltaics for Electric Vehicle Charging: Understanding the Synergies. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2014.
4. Ross, B. Solar Power + Electric Vehicle Charging. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2024.
5. Enescu, F. M., Birleanu, F. G., Raboaca, M. S., Raceanu, M., Bizon, N., & Thounthong, P. Electric Vehicle Charging Station Based on Photovoltaic Energy with or without the Support of a Fuel Cell–Electrolyzer Unit. *Energies*, 16(2), 762, 2023.
6. International Electrotechnical Commission (IEC). IEC 61851-1:2017 Electric vehicle conductive charging system – Part 1: General requirements. IEC Webstore, 2017.
7. International Organization for Standardization (ISO). ISO 15118-1:2019 Road vehicles – Vehicle to grid communication interface – Part 1: General information and use-case definition. ISO, 2019.
8. Автомобілі з електричними і гібридними приводами: Монографія / Під ред. О.В. Кривенка. – Харків: НТУ «ХП», 2020. – 340 с.
9. Міронов Д.В. Конспект лекцій з дисципліни «Електричні та гібридні транспортні засоби» для студентів спеціальності 274 «Автомобільний транспорт» денної та заочної форми навчання / Укл.: Д.В. Міронов – Тернопіль: ТНТУ, 2024. – 154 с.
10. Джеймс Л., Грін Б. Класифікація і проектування електромобілів. – Лондон: Routledge, 2019. – 450 с.

11. Міронов Д.В. Електричні та гібридні транспортні засоби. Методичні вказівки до виконання практичних робіт / Д.В. Міронов, Тесля В.О. – Тернопіль: ТНТУ, 2024. – 65 с.
12. Бауман А. Електромобілі: Конструкція та експлуатація. – Берлін: Springer, 2020. – 400 с.
13. Aulin, V., Rogovskii, I., Lyashuk, O., Titova, L., Hryniv, A., Mironov, D., Volianskyi, M., Rogatynskyi, R., Solomka, O., Lysenko, S. (2024). Comprehensive assessment of technical condition of vehicles during operation based on Harrington's desirability function. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1 (3 (127)), 37–46.
14. Сучасні методи оптимізації енергоспоживання у транспорті / Баранов В.В., Савченко І.О. – Харків: Видавництво ХНАДУ, 2020. – 290 с.
15. Техногенні ризики і транспорт: Монографія / Кравець С.М., Поліщук Г.С. – Львів: ЛНТУ, 2022. – 310 с.
16. *Journal of Cleaner Production*. Assessing Environmental Impacts of Hybrid and Electric Vehicles. – Vol. 28, Issue 5, 2021.
17. Техноекологія та цивільна безпека. Частина «Цивільна безпека»: навч. посібник / В.С. Стручок – Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2022. – 156 с.
18. Охорона праці в галузі та цивільний захист: навчальний посібник / Ю. А. Гасило, О. А. Крюковська. К. О. Левчук, Р. Я. Романюк. – Кам'янське : ДДТУ, 2017. – 369 с.
19. Безпека в надзвичайних ситуаціях : навч. посібник для студентів ЗВО України : у 2 ч. Ч. 1: Надзвичайні ситуації / М. Л. Лисиченко, В. В. Вамболь, С. О. Вамболь, М. М. Кірієнко, І. А. Черепньов, В. М. Власовець ; за ред. М. Л. Лисиченка ; ХНТУСГ. – Харків : ТОВ “ПромАрт”, 2021. – 202 с.
20. Охорона праці на автомобільному транспорті : навчальний посібник / Пістун І. П., Хом'як Й. В., Хом'як В. В. - 2-ге вид., стер. - Суми : Університетська книга, 2015. - 374 с.