

Міністерство освіти і науки України
Криворізький національний університет
Електротехнічний факультет

Пояснювальна записка
до кваліфікаційної роботи бакалавра
за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка

«ПРОЄКТУВАННЯ ЗАРЯДНОЇ СТАНЦІЇ ДЛЯ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ З
ПІДКЛЮЧЕННЯМ ДО МЕРЕЖІ МАЛОЇ ПОТУЖНОСТІ»

Виконав: здобувач

вищої освіти групи ЕЕМ-23ск

МАІРКА Олександр Сергійович

Керівник випускної роботи _____ к.т.н., доц. Ігор ПЕРЕСУНЬКО

Нормоконтролер _____ к.т.н., доц. Ігор ПЕРЕСУНЬКО

Декан ЕТФ _____ к.т.н., доц. Владислав ФЕДОТОВ

Гарант освітньої програми _____ к.т.н., доц. Ігор ПЕРЕСУНЬКО

Кривий Ріг

2026 р.

Криворізький національний університет

Факультет: електротехнічний

Освітній рівень: бакалавр

Спеціальність: 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ
ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

МАІРКА Олександр Сергійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Проектування зарядної станції для електромобілів з підключенням до мережі малої потужності»

2. Строк подання студентом роботи 10 червня 2026 р.

3. Метою кваліфікаційної роботи є проектування АС-зарядної станції Mode 3 для електромобіля з підключенням до мережі малої потужності 0,4 кВ. Для досягнення мети необхідно проаналізувати існуючі рішення, виконати електротехнічні розрахунки, обрати обладнання захисту та змоделювати режими роботи зарядної станції з динамічним обмеженням потужності.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які необхідно розробити)
У пояснювальній записці необхідно розглянути сучасний стан зарядної інфраструктури, типи зарядних станцій, вимоги до АС-заряджання Mode 3 та особливості підключення до мереж малої потужності. Також потрібно виконати розрахунок електричної частини зарядної станції, вибір кабельної лінії й апаратів захисту, розробити алгоритм керування потужністю та провести моделювання в MATLAB Live Script.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
Графічний матеріал повинен містити структурну схему зарядної інфраструктури, розрахункову схему підключення АС-зарядної станції Mode 3 до мережі 0,4 кВ та схему електричного захисту зарядної станції. Додатково необхідно подати блок-схему алгоритму динамічного обмеження зарядної потужності та графіки результатів моделювання режимів заряджання.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали консультанта	Дата, підпис	
		Завдання видав	Завдання прийняв
I	Ігор ПЕРЕСУНЬКО		
II	Ігор ПЕРЕСУНЬКО		
III	Ігор ПЕРЕСУНЬКО		

7. Календарний план

№	Етапи роботи	Термін виконання
1	Аналіз літературних джерел, стандартів і готових рішень зарядних станцій	11.05.2026
2	Розробка структури роботи та написання першого розділу	14.05.2026
3	Вибір вихідних даних і розрахунок електричних параметрів зарядної станції	15.05.2026
4	Вибір кабельної лінії, апаратів захисту, комутації та обліку електроенергії	19.05.2026
5	Розробка алгоритму динамічного обмеження зарядної потужності	21.05.2026
6	Моделювання режимів роботи зарядної станції в MATLAB Live Script	25.05.2026
7	Підготовка графічного матеріалу, висновків і списку літератури	1.06.2026
8	Дата закінчення роботи, нормоконтроль і перевірка на антиплагіат	7.06.2026
9	Аналіз літературних джерел, стандартів і готових рішень зарядних станцій	10.06.2026

Дата видачі завдання 11.05.2026р.

Здобувач вищої освіти

_____ (підпис)

Олександр МАІРКА

_____ (Ім'я Прізвище)

Керівник роботи

_____ (підпис)

Ігор ПЕРЕСУНЬКО

_____ (Ім'я Прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи на тему «Проектування зарядної станції для електромобілів з підключенням до мережі малої потужності»61 с., 17 рис., 31 літературних джерел.

ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250с-13

Досліджуваний об'єкт - система заряджання електромобіля від електричної мережі малої потужності. У роботі розглядається АС-зарядна станція Mode 3 з підключенням до трифазної мережі 0,4 кВ, яка може використовуватися на малих об'єктах: приватних будинках, офісах, навчальних закладах, невеликих підприємствах або адміністративних будівлях.

У першому розділі виконано аналіз сучасного стану розвитку електромобільного транспорту та зарядної інфраструктури. Розглянуто основні типи зарядних станцій, режими заряджання електромобілів, особливості АС- та DC-заряджання, вимоги до зарядних станцій Mode 3 і роз'ємів Type 2.

У другому розділі виконано розрахунок електричної частини зарядної станції. Прийнято вихідні дані для об'єкта малої потужності з мережею 0,4 кВ та дозволеною потужністю 15 кВт. Проведено порівняння однофазної зарядної станції потужністю 7,4 кВт і трифазної зарядної станції потужністю 11 кВт.

У третьому розділі виконано моделювання режимів роботи зарядної станції в умовах мережі малої потужності. Розглянуто добовий графік навантаження об'єкта.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ЕЛЕКТРОМОБІЛЬ, ЗАРЯДНА СТАНЦІЯ, MODE 3, МЕРЕЖА 0,4 КВ, ДИНАМІЧНЕ ОБМЕЖЕННЯ.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250с-13			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Реферат	Літ.	Арк.	Акрушів
Розробив		Маїрка О.						
Перевірів		Пересунько І.					5	1
Н. Контр.		Пересунько І.				КНУ гр. ЕЕМ-23ск		
Затвердж.		Пересунько І.						

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ГОТОВИХ РІШЕНЬ І ДОСЛІДЖЕНЬ У СФЕРІ ЗАРЯДНИХ СТАНЦІЙ ДЛЯ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ	8
1.1. Сучасний стан розвитку зарядної інфраструктури для електромобілів	8
1.2. Класифікація зарядних станцій для електромобілів.....	12
1.3. Основні режими заряджання та вимоги стандартів.....	14
1.4. Аналіз готових технічних рішень зарядних станцій	16
1.5. Проблеми підключення зарядних станцій до мереж малої потужності	19
1.6. Аналіз досліджень щодо інтелектуального керування зарядною потужністю	22
Висновок до розділу 1	24
РОЗДІЛ 2. РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЧАСТИНИ ЗАРЯДНОЇ СТАНЦІЇ ДЛЯ МЕРЕЖІ МАЛОЇ ПОТУЖНОСТІ	25
2.1. Вибір вихідних даних для проєктування зарядної станції.....	25
2.2. Розрахунок струмів зарядної станції.....	27
2.3. Перевірка відповідності зарядної станції дозволених потужності об'єкта.....	29
2.3. Розрахунок струмів зарядної станції.....	31
2.4. Вибір апаратів захисту, комутації та обліку електроенергії.....	33
2.5. Розрахунок часу заряджання електромобіля.....	35
2.6. Розробка алгоритму динамічного обмеження зарядної потужності	36
Висновки до розділу 2	39
РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ ЗАРЯДНОЇ СТАНЦІЇ ТА ОЦІНЮВАННЯ ЇЇ ВПЛИВУ НА МЕРЕЖУ МАЛОЇ ПОТУЖНОСТІ.....	41
3.1. Постановка задачі моделювання	41
3.2. Математичний опис моделі мережі малої потужності та зарядної станції	42
3.3. Формування добового графіка навантаження об'єкта	45
3.4. MATLAB Live Script для моделювання режимів заряджання.....	47
3.5. Результати моделювання добового навантаження	50
3.6. Аналіз зарядного струму, PWM Control Pilot і падіння напруги.....	51
3.7. Аналіз процесу заряджання акумулятора електромобіля	54
3.8. Оцінка ефективності запропонованого рішення.....	55
Висновки до розділу 3	56
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	58

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250с-13						
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Зміст			Літ.	Арк.	Акрушів	
Розробив	Маїрка О.										
Перевірів	Пересунько І.								6	1	
Н. Контр.	Пересунько І.										
Затвердж.	Пересунько І.							КНУ гр. ЕЕМ-23ск			

ВСТУП

Актуальність теми. Розвиток електромобільного транспорту є одним із важливих напрямів підвищення енергоефективності, зменшення залежності від нафтопродуктів та зниження шкідливих викидів у транспортному секторі. Поширення електромобілів потребує відповідного розвитку зарядної інфраструктури, яка має бути не лише доступною для користувачів, але й безпечною, надійною та сумісною з існуючими електричними мережами. За даними Міжнародного енергетичного агентства, у 2024 році у світі було додано понад 1,3 млн публічних зарядних пунктів, що свідчить про активне зростання інфраструктури електричної мобільності [1].

Водночас розвиток зарядної інфраструктури пов'язаний із низкою технічних обмежень. Однією з основних проблем є підключення зарядних станцій до електричних мереж малої потужності. До таких мереж можна віднести побутові, адміністративні, навчальні, офісні та невеликі комерційні об'єкти, де виділена електрична потужність є обмеженою, а збільшення потужності вводу потребує реконструкції електромережі, заміни кабельних ліній, апаратів захисту або узгодження з оператором системи розподілу.

Для мереж малої потужності встановлення швидкісних зарядних станцій постійного струму часто є технічно та економічно недоцільним. Потужність таких станцій може становити десятки або сотні кіловат, що значно перевищує можливості більшості малих об'єктів. Тому для зазначених умов більш доцільним є використання зарядних станцій змінного струму, зокрема АС-станцій Mode 3 із можливістю регулювання зарядного струму. Такий підхід дозволяє забезпечити заряджання електромобіля без значного перевантаження електричної мережі та без суттєвої реконструкції системи електропостачання [3; 4].

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250с-13						
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							
Розробив		Майрка О.			Вступ			Літ.	Арк.	Акрушів	
Перевірів		Пересунько І.								7	1
Н. Контр.		Пересунько І.						КНУ			
Затвердж.		Пересунько І.						гр. ЕЕМ-23ск			

Особливе значення має впровадження функцій інтелектуального керування зарядною потужністю. У разі обмеженої потужності вводу зарядна станція не повинна постійно працювати на максимальному струмі. Більш раціональним є режим, за якого потужність заряджання змінюється залежно від поточного навантаження об'єкта. Наприклад, якщо частина електроприймачів об'єкта вимкнена, зарядна станція може збільшити зарядний струм, а при зростанні загального навантаження — автоматично зменшити його. Такий принцип відповідає сучасним підходам smart charging та dynamic load management [7; 8].

Актуальність теми також визначається необхідністю дотримання вимог електробезпеки та пожежної безпеки. Зарядна станція для електромобіля є електротехнічною установкою, яка працює у тривалому режимі та може створювати значне навантаження на електричну мережу. Тому під час її проєктування необхідно враховувати вимоги щодо вибору кабельних ліній, апаратів захисту, пристроїв захисного відключення, заземлення, захисту від перенапруги та протипожежних відстаней [5].

Метою бакалаврської кваліфікаційної роботи є проєктування зарядної станції для електромобілів з підключенням до мережі малої потужності та обґрунтування технічних рішень, які забезпечують безпечне заряджання електромобіля без перевантаження електричної мережі.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250с-13	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1.

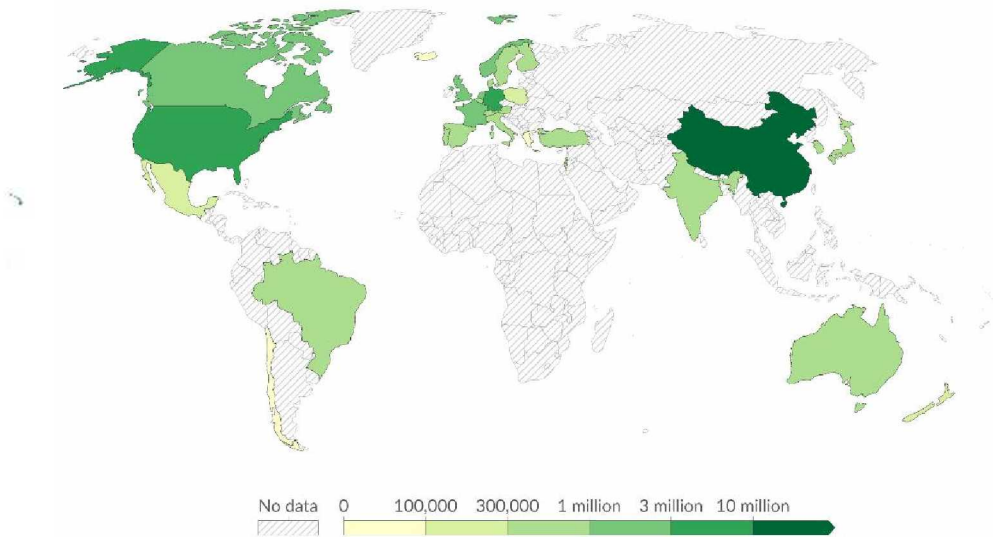
АНАЛІЗ ГОТОВИХ РІШЕНЬ І ДОСЛІДЖЕНЬ У СФЕРІ ЗАРЯДНИХ
СТАНЦІЙ ДЛЯ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ

1.1. Сучасний стан розвитку зарядної інфраструктури для
електромобілів

Електрифікація автомобільного транспорту є одним із ключових напрямів сучасного розвитку енергетики та транспортної інфраструктури. Зростання кількості електромобілів безпосередньо формує потребу в розширенні зарядної інфраструктури, яка має забезпечувати можливість заряджання транспортних засобів у місцях проживання, роботи, навчання, відпочинку та на транспортних магістралях. За даними International Energy Agency, у 2024 році у світі було додано понад 1,3 млн публічних зарядних пунктів, а загальна кількість публічних зарядних точок подвоїлася порівняно з 2022 роком [1].

Electric car stocks, 2025

Car stocks represent the number of cars that are in use. It is the balance of cumulative sales over time and the number of cars that have been retired or taken off the road. Electric cars include fully battery-electric vehicles and plug-in hybrids.



Data source: International Energy Agency. Global EV Outlook 2026.

OurWorldinData.org/energy | CC BY

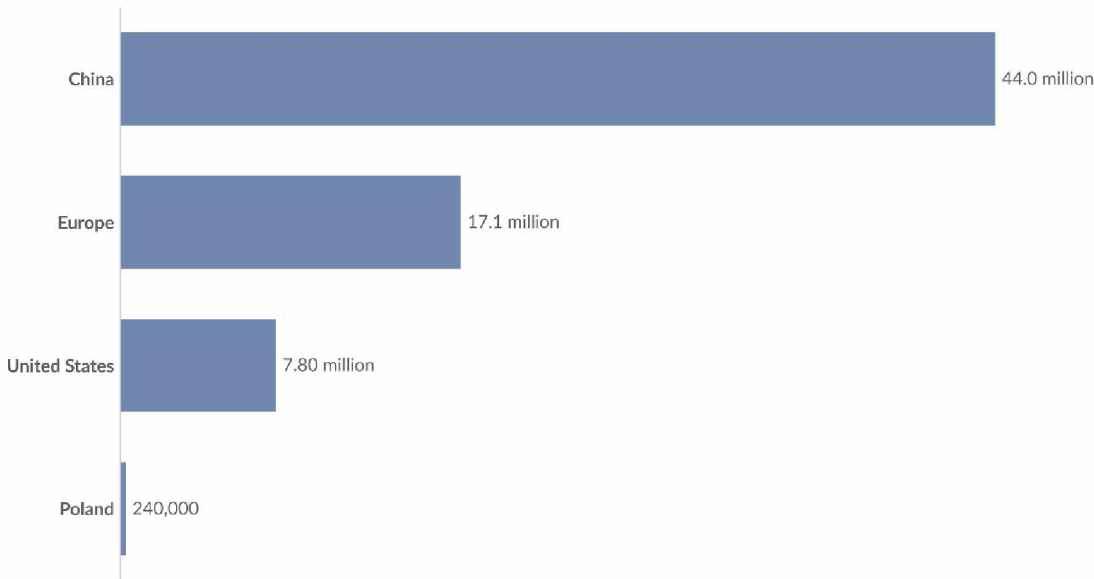
Рисунок 1.1 — Світова мапа використання електромобілів 2025 р.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250с-13					
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						
Розробив	Майрка О.				Розділ 2			Літ.	Арк.	Акрушів
Перевірів	Пересунько І.									
Н. Контр.	Пересунько І.							КНУ гр. ЕЕМ-23ск		
Затвердж.	Пересунько І.									

Electric car stocks, 2025



Car stocks represent the number of cars that are in use. It is the balance of cumulative sales over time and the number of cars that have been retired or taken off the road. Electric cars include fully battery-electric vehicles and plug-in hybrids.



Data source: International Energy Agency, Global EV Outlook 2026.

OurWorldinData.org/energy | CC BY

Рисунок 1.2 — Динаміка кількості електромобілів в експлуатації у Китаї, Європі, та США у 2010–2025 рр.

Як видно з рисунка 1.2, найбільш інтенсивне зростання кількості електромобілів спостерігається у Китаї, який у 2025 році залишався найбільшим світовим ринком електромобілів. За даними ІЕА, у 2025 році в Китаї було продано понад 13 млн електромобілів, а кількість електромобілів на дорогах країни оцінювалася приблизно у 44 млн одиниць. Європа також демонструє суттєве зростання: у 2025 році продажі електромобілів у Європі перевищили 4 млн одиниць. У США темпи розвитку були нижчими, а у 2025 році продажі електромобілів залишилися приблизно на рівні 1,5 млн одиниць. Український ринок є значно меншим та приблизно схожий на ринок Польщі де приблизно знаходяться 240 тисяч електромобілів, однак також демонструє поступове зростання електромобільного парку, що підтверджує актуальність розвитку локальної зарядної інфраструктури малої та середньої потужності.

Розвиток зарядної інфраструктури відбувається нерівномірно. Найбільший приріст зарядних пунктів спостерігається у країнах із високими темпами впровадження електромобілів та активною державною політикою підтримки електричного транспорту. Значну частку світової зарядної інфраструктури формує Китай, тоді як у країнах Європейського Союзу розвиток зарядних станцій стимулюється нормативними документами, зокрема Regulation (EU) 2023/1804 on the deployment of alternative fuels infrastructure [1; 2].

Європейський підхід до розвитку зарядної інфраструктури передбачає не тільки збільшення кількості зарядних станцій, але й забезпечення їхньої доступності, сумісності, прозорості оплати та зручності для користувачів. Відповідно до Regulation (EU) 2023/1804, для публічної зарядної інфраструктури встановлюються обов'язкові цільові показники розвитку, а також вимоги щодо інтероперабельності та зручності користування [2].

Це свідчить про те, що зарядна станція розглядається не лише як окремий електротехнічний пристрій, а як елемент ширшої енергетичної та транспортної системи.

Водночас для локальних об'єктів малої потужності найбільш актуальною є не проблема встановлення великої кількості швидкісних станцій, а питання безпечного підключення однієї або декількох зарядних точок до існуючої електромережі. Більшість малих об'єктів має обмежену виділену потужність, тому підключення зарядної станції без аналізу електричного навантаження може призвести до перевантаження ввідної лінії, зниження напруги, нагрівання кабелів або спрацювання апаратів захисту [8].

Зарядні станції можуть бути встановлені на різних типах об'єктів: приватних будинках, багатоквартирних житлових комплексах, офісах, навчальних закладах, торговельних центрах, паркінгах, підприємствах та автозаправних станціях. Для кожного з цих об'єктів умови електропостачання можуть суттєво відрізнятися. Якщо для великих комерційних об'єктів можливе

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250с-13	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

підключення потужних DC-станцій, то для малих об'єктів більш реалістичним є використання АС-зарядних станцій потужністю 3,7–11 кВт із можливістю обмеження зарядного струму.

У контексті цієї роботи мережа малої потужності розглядається як локальна електрична мережа напругою 230/400 В з обмеженою виділеною потужністю, у якій зарядна станція є суттєвим додатковим навантаженням. Наприклад, для об'єкта з виділеною потужністю 10–15 кВт встановлення зарядної станції на 7,4 кВт може займати значну частину доступної потужності, а зарядна станція на 11 кВт може потребувати спеціального керування режимом роботи.

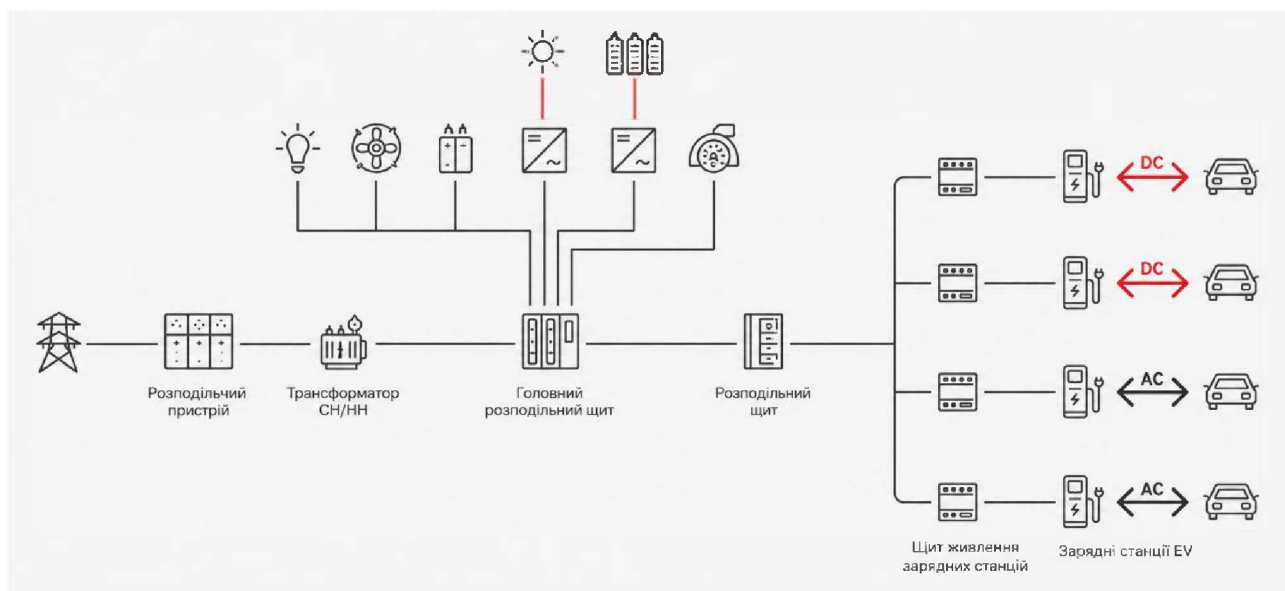


Рисунок 1.3 — Узагальнена структура зарядної інфраструктури електромобілів

Узагальнена структура зарядної інфраструктури електромобілів містить джерело живлення, трансформаторну або ввідно-розподільну частину, головний розподільний щит, апарати захисту, підрозподільний щит зарядної станції, контролер заряджання, зарядний роз'єм та електромобіль. Для підвищення енергоефективності та зменшення навантаження на мережу до складу такої інфраструктури можуть додатково входити фотоелектрична станція,

аккумуляторна система накопичення енергії та система моніторингу параметрів електроспоживання.

1.2. Класифікація зарядних станцій для електромобілів

Зарядні станції для електромобілів класифікують за кількома ознаками: видом струму, рівнем потужності, способом підключення, режимом заряджання, типом роз'єму, місцем встановлення та наявністю інтелектуальних функцій керування. Така класифікація є важливою для правильного вибору технічного рішення, оскільки різні типи станцій мають різні вимоги до електричної мережі, захисту, кабельних ліній та системи керування [3; 4].

За видом струму зарядні станції поділяють на станції змінного струму та станції постійного струму. У зарядних станціях змінного струму електроенергія подається до електромобіля у вигляді однофазної або трифазної напруги, а перетворення змінного струму в постійний здійснюється бортовим зарядним пристроєм автомобіля. У зарядних станціях постійного струму перетворення електроенергії виконується безпосередньо у зарядній станції, а до аккумуляторної батареї електромобіля подається постійний струм [3].

АС-зарядні станції зазвичай мають меншу потужність, простішу конструкцію та нижчу вартість порівняно з DC-станціями. Вони є доцільними для тривалого заряджання електромобілів у місцях стоянки: вдома, на роботі, біля навчальних закладів або на паркінгах. DC-станції використовуються переважно для швидкого заряджання на транспортних магістралях, автозаправних комплексах або спеціалізованих зарядних хабах, однак їх підключення потребує значної електричної потужності та складнішої інфраструктури.

За класифікацією International Energy Agency зарядні пункти потужністю до 22 кВт належать до повільних, зарядні пункти потужністю понад 22 кВт і до

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250с-13	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

150 кВт — до швидких, а зарядні пункти потужністю 150 кВт і більше — до ультрашвидких [1]. Для мережі малої потужності найбільш прийнятними є зарядні станції потужністю до 22 кВт, а в багатьох випадках — станції потужністю 3,7–11 кВт.

За способом підключення до мережі зарядні станції можуть бути однофазними або трифазними. Однофазні станції зазвичай працюють від мережі 230 В і мають потужність 2,3–7,4 кВт. Трифазні станції працюють від мережі 400 В і можуть мати потужність 11 або 22 кВт. Для мереж малої потужності вибір між однофазним і трифазним підключенням залежить від виділеної потужності, стану електропроводки, допустимого навантаження фаз та можливості рівномірного розподілу навантаження.

За наявністю функцій керування зарядні станції можна поділити на прості та інтелектуальні. Прості зарядні станції працюють із фіксованим зарядним струмом або мають ручне налаштування струму. Інтелектуальні станції можуть підтримувати моніторинг споживання, дистанційне керування, облік електроенергії, зв'язок із сервером, планування заряджання за часом, а також динамічне обмеження потужності відповідно до доступної потужності мережі [7].

Таблиця 1.1 — Порівняльна характеристика основних типів зарядних станцій

Тип зарядної станції	Вид струму	Орієнтовна потужність	Типове місце застосування	Придатність для мережі малої потужності
Побутове заряджання від розетки	АС	2,3–3,7 кВт	Приватний будинок, гараж	Можливе, але має обмеження за безпекою та тривалістю заряджання
АС-станція однофазна	АС	3,7–7,4 кВт	Будинок, офіс, малий об'єкт	Доцільна за умови правильного вибору кабелю та захисту

АС-станція трифазна	АС	11–22 кВт	Паркінг, офіс, комерційний об'єкт	Можлива для 11 кВт; 22 кВт часто потребує збільшення потужності вводу
DC-швидкісна станція	DC	30–150 кВт	АЗС, зарядні хаби, магістралі	Зазвичай недоцільна для мереж малої потужності
Ультрашвидкісна DC-станція	DC	150 кВт і більше	Транспортні коридори, великі хаби	Не підходить для мереж малої потужності

1.3. Основні режими заряджання та вимоги стандартів

Одним із базових документів, який визначає вимоги до систем кондуктивного заряджання електромобілів, є ІЕС 61851-1. Цей стандарт поширюється на обладнання заряджання електричних дорожніх транспортних засобів із номінальною напругою живлення до 1000 В змінного струму або до 1500 В постійного струму. У ньому розглядаються характеристики та умови роботи зарядного обладнання, вимоги до з'єднання між зарядним обладнанням і електромобілем, а також вимоги електробезпеки [3].

Відповідно до підходу ІЕС 61851-1, розрізняють декілька режимів заряджання електромобілів. Mode 1 передбачає підключення електромобіля безпосередньо до звичайної електричної розетки без спеціального контрольного обладнання. Такий режим має суттєві обмеження щодо безпеки та практично не є оптимальним для сучасних стаціонарних зарядних рішень. Mode 2 передбачає заряджання через кабель із вбудованим блоком контролю та захисту. Такий варіант може використовуватися як переносне рішення, але також має обмеження для тривалого системного використання [3; 6].

Mode 3 передбачає заряджання змінним струмом через спеціалізовану зарядну станцію, яка забезпечує контроль процесу заряджання, комунікацію з електромобілем та необхідні функції безпеки. Саме цей режим є найбільш доцільним для стаціонарних АС-зарядних станцій. Mode 4 використовується для

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250с-13	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

заряджання постійним струмом, коли перетворення електроенергії відбувається у зарядній станції, а не в бортовому зарядному пристрої електромобіля [3].

Для АС-зарядних станцій у європейській практиці поширеним є використання роз'єму Type 2. Вимоги до вилок, розеток, транспортних з'єднувачів та вводів для кондуктивного заряджання електромобілів визначає серія стандартів ІЕС 62196. Зокрема, ІЕС 62196-2:2025 поширюється на АС-з'єднувачі з номінальною робочою напругою до 480 В, частотою 50–60 Гц і номінальним струмом до 63 А для трифазного виконання або до 70 А для однофазного виконання [4].

Для України важливе значення мають також вимоги ДСТУ 9222:2023, який встановлює основні положення щодо протипожежного захисту систем зарядки електромобілів на стадії проєктування, реконструкції та технічного переоснащення. Стандарт визначає вимоги до планування систем зарядки, конструкцій, на яких встановлюють зарядні станції, протипожежних перешкод, протипожежних відстаней, безпечної евакуації та первинних засобів пожежогасіння [5].

З погляду електробезпеки зарядна станція має забезпечувати захист користувача від ураження електричним струмом, захист від струмів витоку, захист від короткого замикання, перевантаження та перенапруги. Для цього у складі електричної частини зарядної станції або її живильної лінії передбачають автоматичний вимикач, пристрій захисного відключення, захист від імпульсних перенапруг, заземлення, а також комутаційний апарат, який забезпечує безпечне підключення та відключення електромобіля.

Таблиця 1.2 — Порівняння режимів заряджання електромобілів

Режим заряджання	Сутність режиму	Тип струму	Характеристика
Режим 1	Безпосереднє підключення до розетки	АС	Мінімальний рівень контролю

Режим 2	Підключення через кабель із блоком контролю	AC	Переносне рішення
Режим 3	Підключення через стаціонарну AC-зарядну станцію	AC	Наявність контролю, захисту та комунікації
Режим 4	Швидке заряджання постійним струмом	DC	Висока потужність, складна силова частина

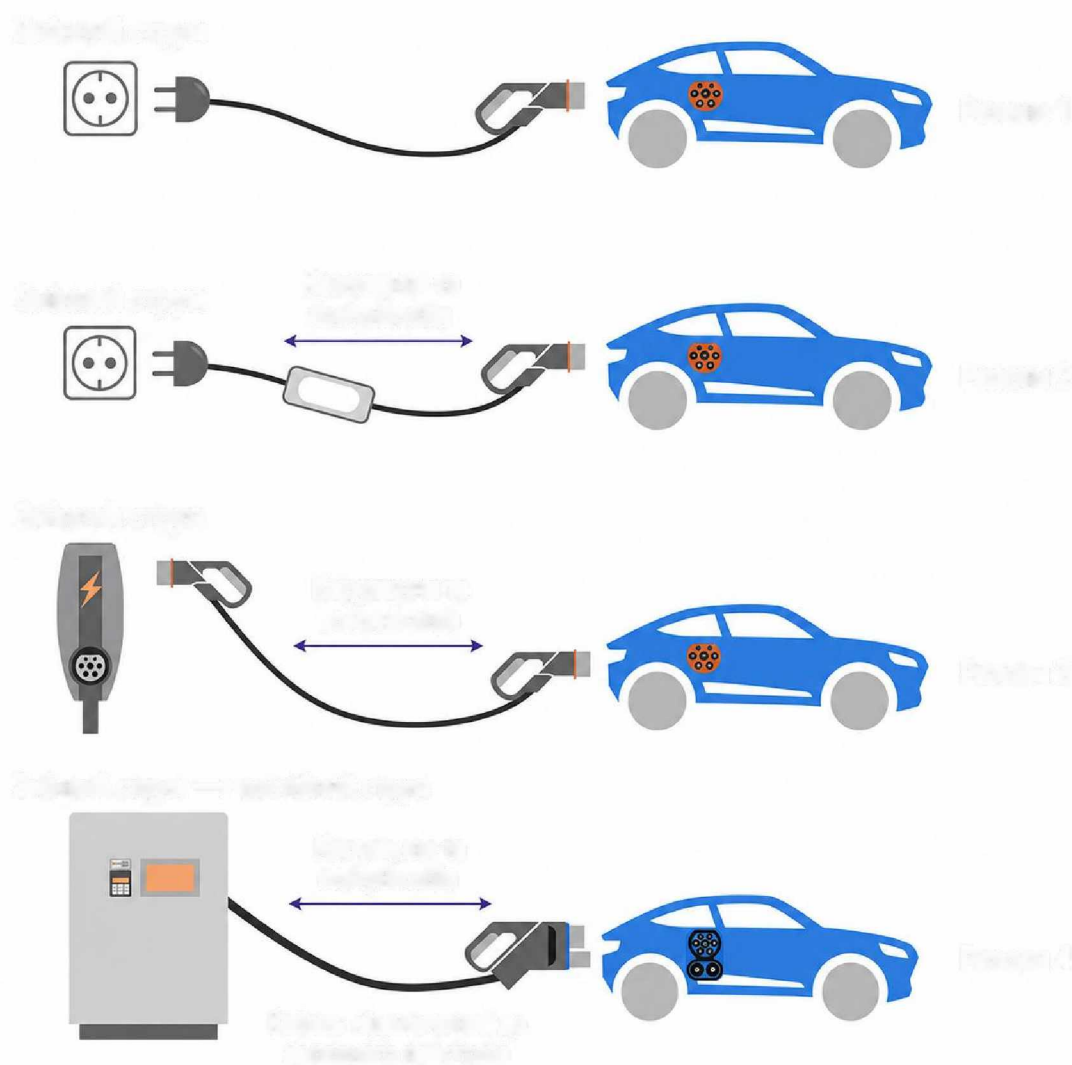


Рисунок 1.4 – Порівняння режимів заряджання електромобілів

1.4. Аналіз готових технічних рішень зарядних станцій

На ринку зарядної інфраструктури представлено значну кількість готових рішень для заряджання електромобілів. Їх можна умовно поділити на побутові переносні зарядні пристрої, настінні AC-зарядні станції, комерційні AC-станції, DC-швидкісні станції та інтелектуальні зарядні системи з можливістю

диспетчеризації. Вибір конкретного типу залежить від потужності об'єкта, режиму використання електромобіля, вимог до часу заряджання, бюджету та можливостей електричної мережі [1; 3].

Побутові переносні зарядні пристрої зазвичай використовуються для заряджання електромобіля від звичайної розетки. Їх перевагами є простота, мобільність і відносно низька вартість. Однак такі пристрої мають обмежену потужність, значний час заряджання та підвищені вимоги до якості електропроводки. Тривале заряджання від звичайної розетки може бути небезпечним у разі старої або неправильно підібраної електропроводки.

Настінні АС-зарядні станції потужністю 3,7–7,4 кВт є одним із найбільш поширених рішень для приватних будинків, гаражів, невеликих офісів і малих підприємств. Такі станції працюють від однофазної мережі 230 В, мають спеціалізований зарядний контролер, можуть оснащуватися пристроями захисту, індикацією, обліком електроенергії та можливістю налаштування зарядного струму. Для мереж малої потужності саме цей варіант часто є базовим.

Трифазні АС-станції потужністю 11 кВт є технічно доцільними для об'єктів, де доступна трифазна мережа 400 В і є можливість рівномірно розподілити навантаження між фазами. Порівняно з однофазною станцією 7,4 кВт, трифазна станція 11 кВт дозволяє зменшити струм у кожній фазі, але потребує наявності відповідного трифазного вводу, правильного вибору кабельної лінії та захисної апаратури. Для мереж малої потужності такий варіант можна розглядати лише за умови обмеження зарядної потужності.

АС-станції потужністю 22 кВт та DC-станції потужністю понад 30 кВт менш придатні для малих об'єктів. Їх використання часто потребує збільшення дозвільної потужності, реконструкції ввідної лінії, встановлення потужнішої захисної апаратури та перевірки можливостей трансформаторної підстанції або розподільної мережі. Тому в межах цієї бакалаврської роботи такі рішення

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250с-13	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

доцільно розглядати переважно як об'єкти порівняння, а не як основний варіант для проєктування.

Окремий клас становлять інтелектуальні зарядні станції, які підтримують функції smart charging. Такі станції можуть працювати із зовнішніми системами керування, обмежувати струм заряджання, враховувати тарифні зони, стан мережі, пріоритет інших споживачів і поточну доступну потужність. Для обміну даними між зарядною станцією та системою керування може використовуватися відкритий протокол OCPP, який сприяє інтероперабельності зарядної інфраструктури та зменшенню залежності від закритих рішень окремих виробників [7].

Таблиця 1.3 — Порівняння готових рішень для заряджання електромобілів

Варіант рішення	Потужність	Переваги	Недоліки	Оцінка для мережі малої потужності
Переносний зарядний пристрій	2,3–3,7 кВт	Простота, мобільність, низька вартість	Довгий час заряджання, залежність від якості розетки	Можливий тимчасовий варіант
AC Wallbox однофазний	3,7–7,4 кВт	Безпечніше рішення, можливість обмеження струму	Потребує окремої лінії та захисту	Найбільш доцільний варіант
AC Wallbox трифазний	11 кВт	Менший фазний струм, швидше заряджання	Потрібна трифазна мережа та запас потужності	Доцільний із динамічним обмеженням
AC-станція 22 кВт	22 кВт	Висока швидкість AC-заряджання	Значне навантаження на мережу	Обмежено придатна
DC-станція	30–150 кВт	Швидке заряджання	Висока вартість, значні вимоги до мережі	Недоцільна
Smart charging station	3,7–22 кВт	Керування потужністю, облік, зв'язок	Вища вартість і складність	Найбільш перспективний варіант

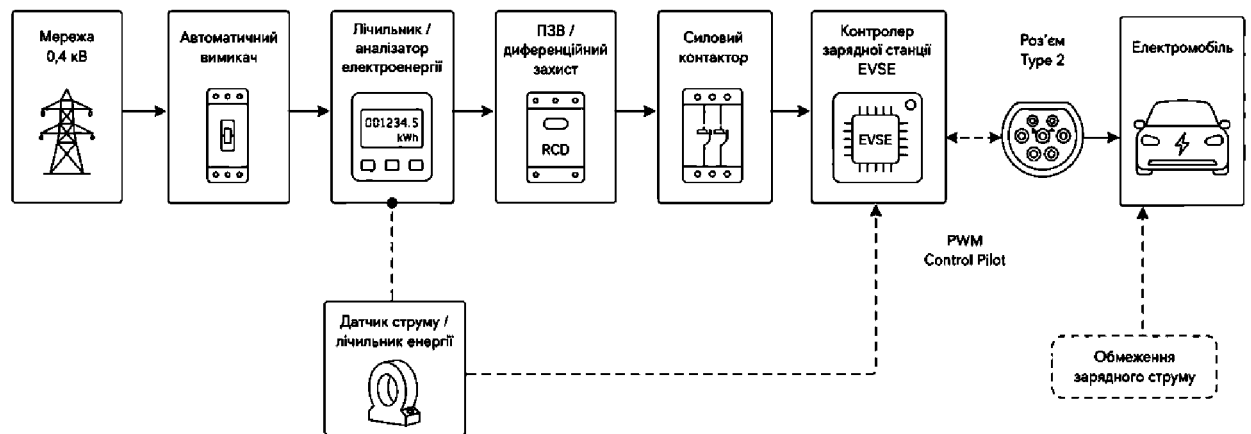


Рисунок 1.4 — Структура АС-зарядної станції Mode 3 з функцією керування потужністю

Отже, аналіз готових рішень показує, що для мережі малої потужності найбільш раціональним є використання АС-зарядної станції Mode 3 потужністю 7,4 кВт для однофазної мережі або 11 кВт для трифазної мережі. При цьому обов'язковою умовою є можливість обмеження зарядного струму, а бажаною — реалізація динамічного керування потужністю залежно від загального навантаження об'єкта.

1.5. Проблеми підключення зарядних станцій до мереж малої потужності

Підключення зарядної станції до мережі малої потужності має низку особливостей. На відміну від звичайних побутових або офісних електроприймачів, зарядна станція може працювати тривалий час із потужністю, близькою до номінальної. Це означає, що навіть зарядна станція потужністю 7,4 кВт може створювати значне навантаження на ввідну лінію, особливо якщо одночасно працюють інші споживачі: освітлення, кондиціонери, електронагрівачі, комп'ютерна техніка, насоси або вентиляція [8].

Основною проблемою є обмеження за виділеною потужністю. Якщо об'єкт має дозовану потужність 10 кВт, то зарядна станція потужністю 7,4 кВт може займати понад 70 % доступної потужності. У такому режимі навіть невелике додаткове навантаження може призвести до перевищення допустимого струму ввідного автомата. Для трифазної станції потужністю 11 кВт проблема може проявлятися не лише у перевищенні загальної потужності, але й у нерівномірності навантаження фаз.

Другою важливою проблемою є падіння напруги в кабельній лінії. При збільшенні струму навантаження зростають втрати напруги на активному та реактивному опорі кабелю. Якщо довжина лінії від ввідного щита до зарядної станції є значною, а переріз кабелю вибраний недостатньо, напруга на затискачах зарядної станції може знижуватися. Це може негативно впливати на стабільність процесу заряджання та призводити до небажаного нагрівання кабелю.

Третьою проблемою є теплове навантаження на кабелі та захисну апаратуру. Заряджання електромобіля може тривати кілька годин, тому кабельна лінія, автоматичний вимикач, контактор, клемні з'єднання та розетка або роз'єм повинні бути розраховані на тривалу роботу при відповідному струмі. Неналежний вибір перерізу кабелю або апаратів захисту може призвести до перегрівання, пошкодження ізоляції та підвищення пожежної небезпеки [5].

Четвертою проблемою є вплив зарядної станції на добовий графік навантаження об'єкта. Якщо заряджання відбувається у вечірній час, коли одночасно працює значна кількість інших споживачів, навантаження на мережу може досягати максимального значення. Водночас у нічний період або у періоди низького навантаження доступна потужність може використовуватися ефективніше. Саме тому для мереж малої потужності перспективним є використання алгоритмів планування та динамічного обмеження зарядної потужності [8].

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250с-13	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

П'ятою проблемою є необхідність забезпечення електробезпеки та протипожежного захисту. Зарядна станція є об'єктом підвищеної відповідальності, оскільки користувач взаємодіє з обладнанням під час підключення електромобіля. Тому система має забезпечувати захист від струмів витоку, короткого замикання, перевантаження, перенапруги, а також враховувати вимоги до розміщення станції, евакуаційних шляхів, протипожежних відстаней та первинних засобів пожежогасіння [5].

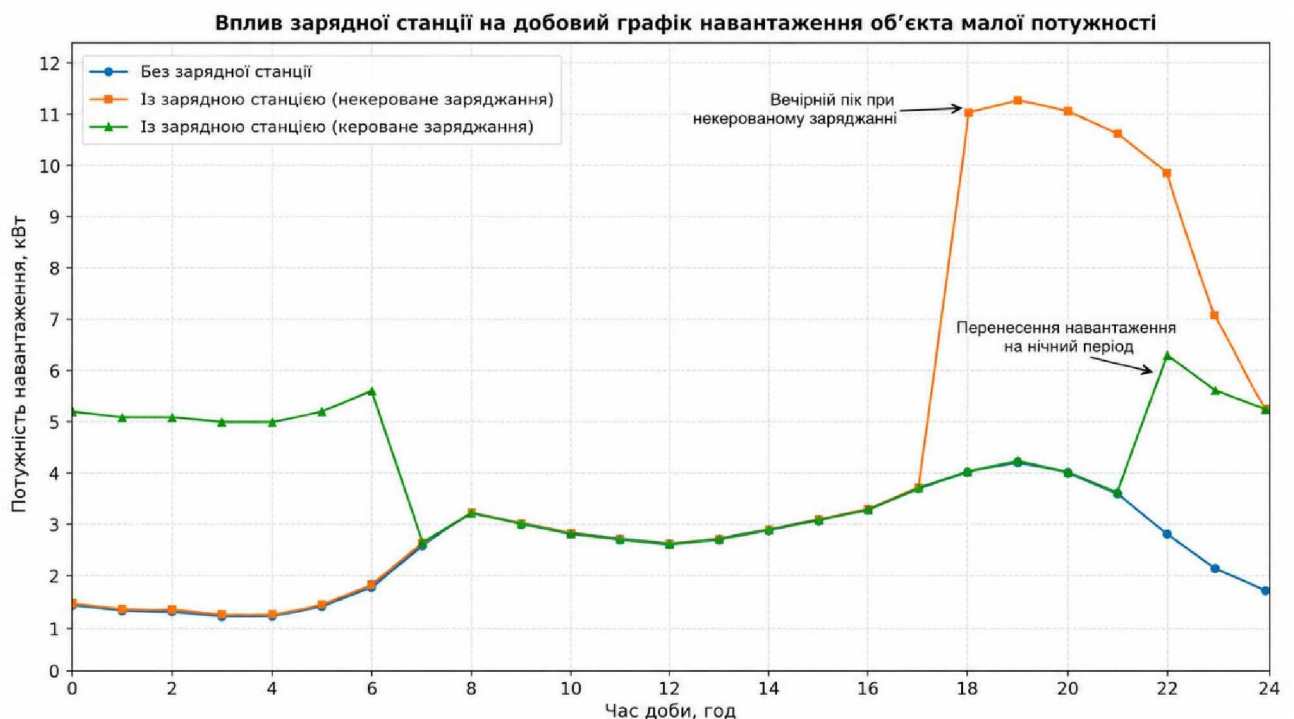


Рисунок 1.5 — Вплив зарядної станції на добовий графік навантаження об'єкта малої потужності

Таким чином, основним технічним протиріччям у цій роботі є необхідність забезпечити достатню потужність заряджання електромобіля за умов обмеженої потужності електричної мережі. Вирішення цього протиріччя можливе шляхом правильного вибору типу зарядної станції, розрахунку кабельної лінії та апаратів захисту, а також впровадження алгоритму динамічного обмеження зарядної потужності.

1.6. Аналіз досліджень щодо інтелектуального керування зарядною потужністю

Сучасні дослідження у сфері зарядної інфраструктури значну увагу приділяють не лише збільшенню кількості зарядних станцій, але й оптимізації їхньої роботи з точки зору впливу на електричну мережу. Некероване заряджання електромобілів може збільшувати пікове навантаження, створювати локальні перевантаження в розподільних мережах і призводити до додаткових вимог щодо реконструкції електричної інфраструктури [8].

Інтелектуальне заряджання передбачає зміну параметрів процесу заряджання залежно від зовнішніх умов. До таких умов належать поточне навантаження об'єкта, вартість електроенергії за тарифними зонами, обмеження оператора мережі, стан акумулятора електромобіля, запланований час завершення заряджання та пріоритет інших електроприймачів. У найпростішому варіанті інтелектуальне керування може реалізовуватися як обмеження максимального струму заряджання, а у складніших системах — як оптимізація графіка заряджання [7; 8].

Для мережі малої потужності особливо важливим є динамічне керування навантаженням. Його суть полягає в тому, що зарядна станція не має фіксованої потужності протягом усього процесу заряджання, а змінює її відповідно до доступної потужності об'єкта. Якщо інші споживачі працюють із великою потужністю, зарядна станція зменшує струм. Якщо навантаження об'єкта зменшується, станція може збільшити потужність заряджання. Такий підхід дозволяє підвищити коефіцієнт використання доступної потужності без перевантаження ввідної лінії.

Для реалізації такого керування можуть використовуватися датчики струму, лічильники електроенергії, контролери зарядної станції, локальні системи енергоменеджменту та протоколи обміну даними. Одним із поширених відкритих протоколів для взаємодії зарядних станцій із системами керування є

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250с-13	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ОСРР. Open Charge Alliance визначає ОСРР як відкритий комунікаційний протокол між зарядними станціями та системами керування зарядною інфраструктурою, що сприяє масштабованості, інтероперабельності та зменшенню залежності від закритих рішень [7].

$$P_{зар} = P_{доп} - P_{інш}.$$

де $P_{зар}$ — допустима потужність зарядної станції; $P_{доп}$ — максимально допустима потужність об’єкта; $P_{інш}$ — поточна потужність інших споживачів.

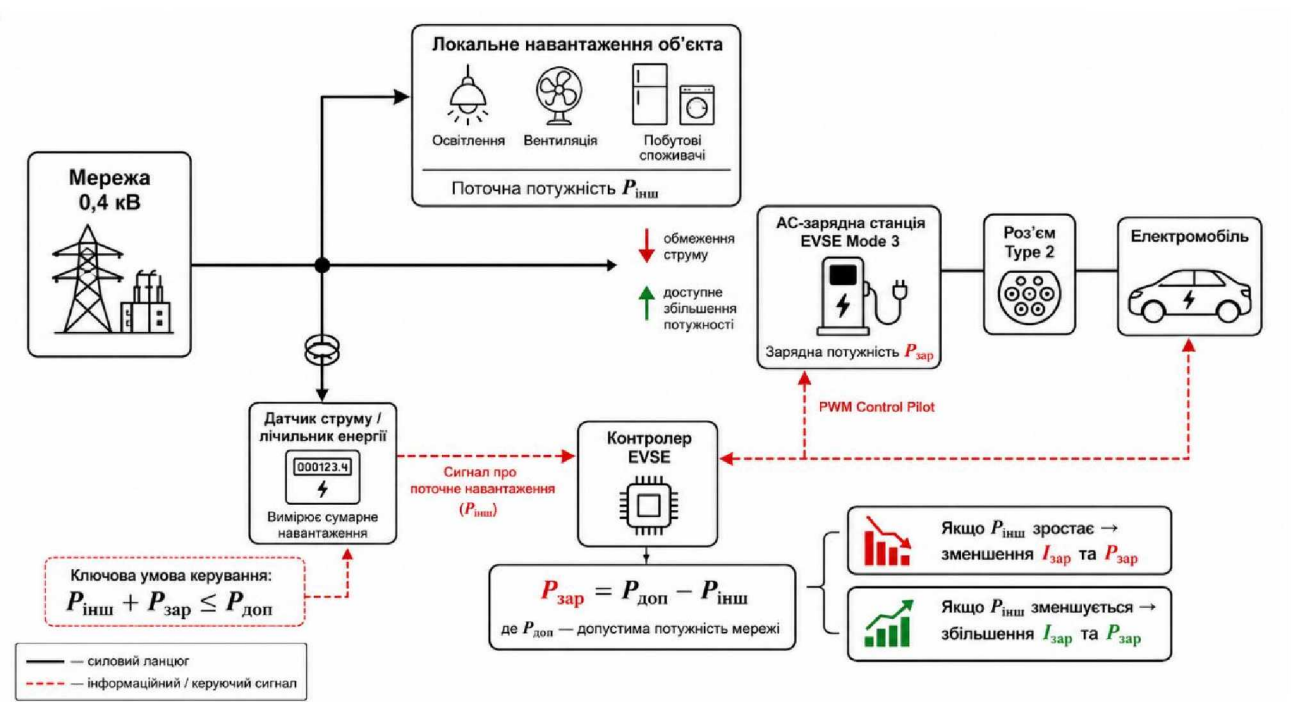


Рисунок 1.6 — Принцип динамічного обмеження зарядної потужності в мережі малої потужності

Отже, аналіз сучасних досліджень і технічних рішень показує, що для об’єктів з обмеженою потужністю найбільш перспективним є не збільшення потужності зарядної станції, а впровадження керування її режимом роботи. Саме тому подальші розрахунки та моделювання в цій роботі доцільно виконувати для АC-зарядної станції Mode 3 з алгоритмом динамічного обмеження зарядного струму.

Висновок до розділу 1

У першому розділі було проаналізовано сучасний стан розвитку зарядної інфраструктури для електромобілів, основні типи зарядних станцій, режими заряджання, нормативні вимоги та проблеми підключення зарядного обладнання до мереж малої потужності. Встановлено, що розвиток електромобільного транспорту супроводжується швидким зростанням кількості зарядних пунктів, однак для локальних об'єктів основною проблемою залишається обмежена виділена потужність електричної мережі.

Показано, що зарядні станції постійного струму мають високу потужність і забезпечують швидке заряджання, але для мереж малої потужності вони зазвичай є технічно та економічно недоцільними. Найбільш прийнятним рішенням для таких умов є зарядна станція змінного струму Mode 3 з роз'ємом Type 2, яка забезпечує необхідний рівень безпеки, може працювати від однофазної або трифазної мережі та допускає реалізацію функцій керування зарядним струмом.

Визначено, що основними проблемами підключення зарядної станції до мережі малої потужності є обмеження за виділеною потужністю, можливе перевантаження ввідної лінії, падіння напруги, нагрівання кабельних ліній, нерівномірність навантаження фаз, а також необхідність забезпечення електробезпеки та протипожежного захисту.

На основі проведеного аналізу для подальшого проектування приймається АС-зарядна станція Mode 3 потужністю до 7,4 кВт для однофазного варіанта або до 11 кВт для трифазного варіанта з можливістю динамічного обмеження зарядної потужності. Такий підхід дозволяє підключити зарядну станцію до мережі малої потужності без значного перевантаження електричної мережі та без суттєвої реконструкції системи електропостачання.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250с-13	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 2. РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЧАСТИНИ ЗАРЯДНОЇ СТАНЦІЇ ДЛЯ МЕРЕЖІ МАЛОЇ ПОТУЖНОСТІ

2.1. Вибір вихідних даних для проектування зарядної станції

Проектування зарядної станції для електромобілів необхідно виконувати з урахуванням параметрів електричної мережі, допустимої потужності об'єкта, типу зарядного обладнання, режиму роботи електромобіля та вимог електробезпеки. Оскільки тема роботи пов'язана з підключенням зарядної станції до мережі малої потужності, основним обмеженням є не максимальна потужність зарядного обладнання, а можливість безпечного використання наявної електричної мережі без її перевантаження [3; 9; 10].

У роботі розглядається локальна електрична мережа напругою 0,4 кВ, яка живить невеликий об'єкт: приватний будинок, навчальну лабораторію, офісну будівлю або мале підприємство. Для таких об'єктів характерним є обмеження за дозволеною потужністю, тому зарядна станція має працювати не лише за номінальним режимом, але й у режимі обмеження зарядної потужності [8; 11].

Для подальших розрахунків приймаємо такі вихідні дані:

Таблиця 2.1 — Вихідні дані для проектування зарядної станції

Параметр	Позначення	Значення
Номінальна напруга трифазної мережі	Uл	400 В
Номінальна фазна напруга	Uф	230 В
Частота мережі	f	50 Гц
Дозволена потужність об'єкта	Рдоп	15 кВт
Максимальна потужність локального навантаження об'єкта	Рінш.мах	9 кВт

ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250с-13

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Розділ 2			
Розробив	Майрка О.							
Перевірів	Пересунько І.							
Н. Контр.	Пересунько І.							
Затвердж.	Пересунько І.							
					КНУ гр. ЕЕМ-23ск			

Тип зарядної станції	—	AC Mode 3
Тип зарядного роз'єму	—	Type 2
Номінальна потужність трифазної зарядної станції	Рзар.ном	11 кВт
Номінальна потужність однофазного варіанта для порівняння	Рзар.1ф	7,4 кВт
Довжина кабельної лінії від щита до зарядної станції	L	30 м
Матеріал жил кабелю	—	мідь
Коефіцієнт потужності зарядного навантаження	cosφ	0,98
Орієнтовний ККД процесу заряджання	ηзар	0,9
Ємність акумуляторної батареї електромобіля	ЕАКБ	60 кВт·год
Початковий рівень заряду	SOCпоч	20%
Кінцевий рівень заряду	SOCкін	80%

Для порівняння в роботі розглядаються два можливі варіанти зарядної станції: однофазна АС-станція потужністю 7,4 кВт та трифазна АС-станція потужністю 11 кВт. Однофазна станція є простішою, але створює значне навантаження на одну фазу. Трифазна станція забезпечує більш рівномірний розподіл струму між фазами, тому для мережі 0,4 кВ вона є технічно доцільнішою за умови реалізації динамічного обмеження зарядної потужності.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250с-13	Арк. 26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

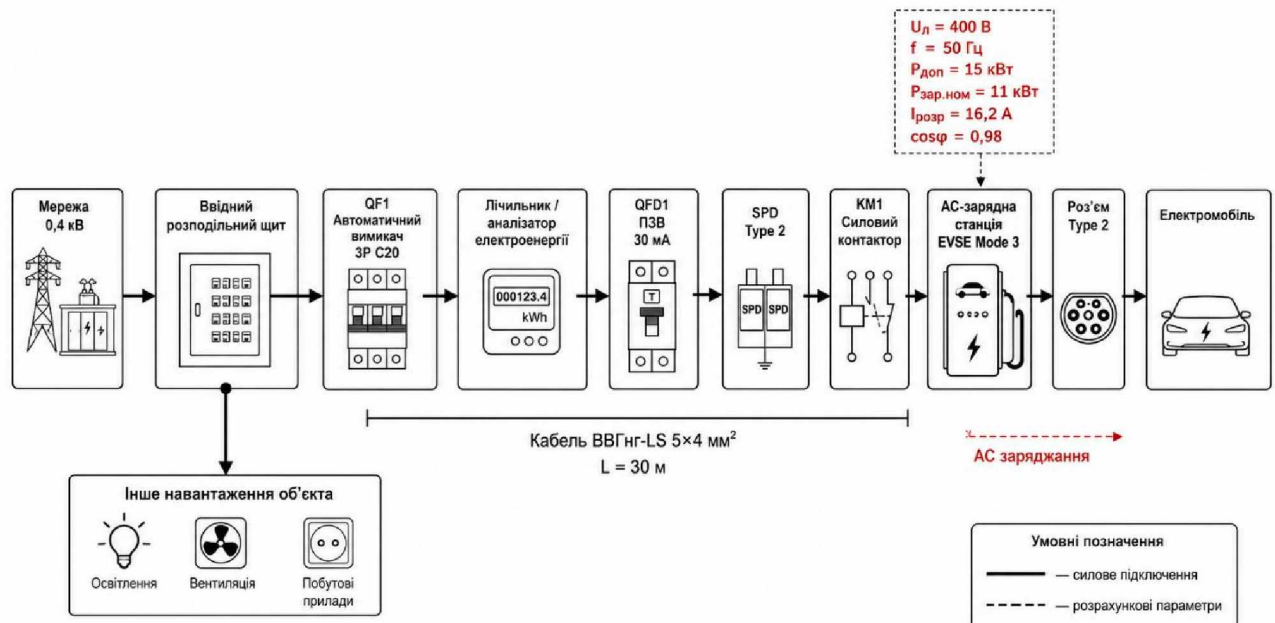


Рисунок 2.1 — Розрахункова схема підключення АС-зарядної станції Mode 3 до мережі 0,4 кВ

2.2. Розрахунок струмів зарядної станції

Основними параметрами, які визначають вибір кабельної лінії, апаратів захисту та комутаційного обладнання, є робочий струм зарядної станції та характер розподілу навантаження по фазах. Для зарядних станцій змінного струму розрахунок струму залежить від типу підключення: однофазного або трифазного [3; 9].

Для однофазного навантаження робочий струм визначається за формулою:

$$I_{1\phi} = P_{\text{зар}} / (U_{\phi} \cdot \cos\phi), \text{ А} \quad (2.1)$$

де $I_{1\phi}$ — струм однофазної зарядної станції, А; $P_{\text{зар}}$ — активна потужність зарядної станції, Вт; U_{ϕ} — фазна напруга мережі, В; $\cos\phi$ — коефіцієнт потужності.

Для однофазної зарядної станції потужністю 7,4 кВт:

$$I_{1\phi} = 7400 / (230 \cdot 1,0) = 32,17 \text{ А}$$

Отже, однофазна зарядна станція потужністю 7,4 кВт створює струм приблизно 32 А в одній фазі. Такий режим є допустимим лише за умови наявності відповідної кабельної лінії, захисної апаратури та достатнього резерву потужності на відповідній фазі.

Для трифазної зарядної станції робочий струм визначається за формулою:

$$I_{3\phi} = P_{зар} / (\sqrt{3} \cdot U_{л} \cdot \cos\phi), \text{ А} \quad (2.2)$$

де $I_{3\phi}$ — фазний струм трифазної зарядної станції, А; $U_{л}$ — лінійна напруга мережі, В.

Для трифазної зарядної станції потужністю 11 кВт:

$$I_{3\phi} = 11000 / (\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0,98) = 16,2 \text{ А}$$

Отже, трифазна зарядна станція потужністю 11 кВт створює струм приблизно 16 А у кожній фазі. Порівняно з однофазним варіантом це забезпечує рівномірніше навантаження мережі та зменшує ризик перевантаження окремої фази.

Таблиця 2.2 — Порівняння струмів однофазної та трифазної зарядної станції

Варіант зарядної станції	Потужність, кВт	Напруга живлення	Розрахунковий струм	Особливість
Однофазна АС Mode 3	7,4	230 В	32,17 А	Значне навантаження однієї фази
Трифазна АС Mode 3	11	400 В	16,2 А на фазу	Рівномірніше навантаження фаз

З урахуванням результатів розрахунку для подальшого проектування приймаємо трифазну АС-зарядну станцію Mode 3 потужністю до 11 кВт. Водночас її робота має бути обмежена алгоритмом динамічного керування потужністю, щоб сумарне навантаження об'єкта не перевищувало дозволenu потужність.

2.3. Перевірка відповідності зарядної станції дозволеній потужності об'єкта

Для мережі малої потужності важливо не лише визначити струм зарядної станції, але й оцінити, яку частину дозволеної потужності об'єкта вона споживатиме. Якщо зарядна станція працює на повній потужності одночасно з іншими споживачами, може виникнути перевищення дозволеної потужності та перевантаження ввідної лінії [8; 9].

Сумарне навантаження об'єкта визначається за формулою:

$$P_{\Sigma} = P_{\text{інш}} + P_{\text{зар}}, \text{ кВт} \quad (2.3)$$

де P_{Σ} — сумарна потужність об'єкта, кВт; $P_{\text{інш}}$ — потужність інших електроприймачів об'єкта, кВт; $P_{\text{зар}}$ — потужність зарядної станції, кВт.

Для безпечної роботи має виконуватися умова:

$$P_{\Sigma} \leq P_{\text{доп}} \quad (2.4)$$

або

$$P_{\text{інш}} + P_{\text{зар}} \leq P_{\text{доп}} \quad (2.5)$$

де $P_{\text{доп}}$ — дозволена потужність об'єкта.

Якщо прийняти $P_{\text{доп}} = 15$ кВт, $P_{\text{інш.мах}} = 9$ кВт, а зарядна станція працює на повній потужності $P_{\text{зар}} = 11$ кВт, то:

$$P_{\Sigma} = 9 + 11 = 20 \text{ кВт}$$

Отримане значення перевищує дозволена потужність об'єкта: $20 \text{ кВт} > 15 \text{ кВт}$. Це означає, що робота зарядної станції на повній потужності при максимальному навантаженні об'єкта є недопустимою. Тому для об'єкта малої потужності необхідно застосувати обмеження зарядної потужності.

Доступну потужність для заряджання можна визначити за формулою:

$$P_{\text{зар.дост}} = P_{\text{доп}} - P_{\text{інш}}, \text{ кВт} \quad (2.6)$$

Якщо $P_{\text{інш}} = 9$ кВт, тоді:

$$P_{\text{зар.дост}} = 15 - 9 = 6 \text{ кВт}$$

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250с-13	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Отже, у режимі максимального локального навантаження зарядна станція має бути обмежена до 6 кВт. Якщо ж локальне навантаження зменшується, зарядна станція може автоматично збільшити потужність заряджання.

Для підвищення надійності роботи доцільно вводити коефіцієнт резерву потужності $k_{рез}$. У такому випадку допустима потужність, яку можна використовувати для розрахунку, визначається як:

$$P_{доп.розр} = k_{рез} \cdot P_{доп}, \text{ кВт} \quad (2.7)$$

Приймаємо $k_{рез} = 0,9$:

$$P_{доп.розр} = 0,9 \cdot 15 = 13,5 \text{ кВт}$$

Тоді доступна потужність заряджання становитиме:

$$P_{зар.дост} = P_{доп.розр} - P_{інш} \quad (2.8)$$

Для різних режимів локального навантаження отримаємо результати, наведені у таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 — Визначення доступної потужності заряджання при різних режимах роботи об'єкта

Режим роботи об'єкта	$P_{інш}$, кВт	$P_{доп.розр}$, кВт	Доступна потужність $P_{зар.дост}$, кВт	Режим зарядної станції
Нічний період, мале навантаження	2,0	13,5	11,5	Робота на номінальній потужності 11 кВт
Денний режим	5,0	13,5	8,5	Обмеження зарядної потужності до 8,5 кВт
Вечірній пік	9,0	13,5	4,5	Суттєве обмеження зарядної потужності
Критичне навантаження	11,0	13,5	2,5	Тимчасове призупинення або

				мінімальний режим
--	--	--	--	-------------------

Таким чином, без динамічного керування зарядна станція може створити перевантаження мережі, а з динамічним керуванням її потужність може змінюватися залежно від поточного навантаження об’єкта.

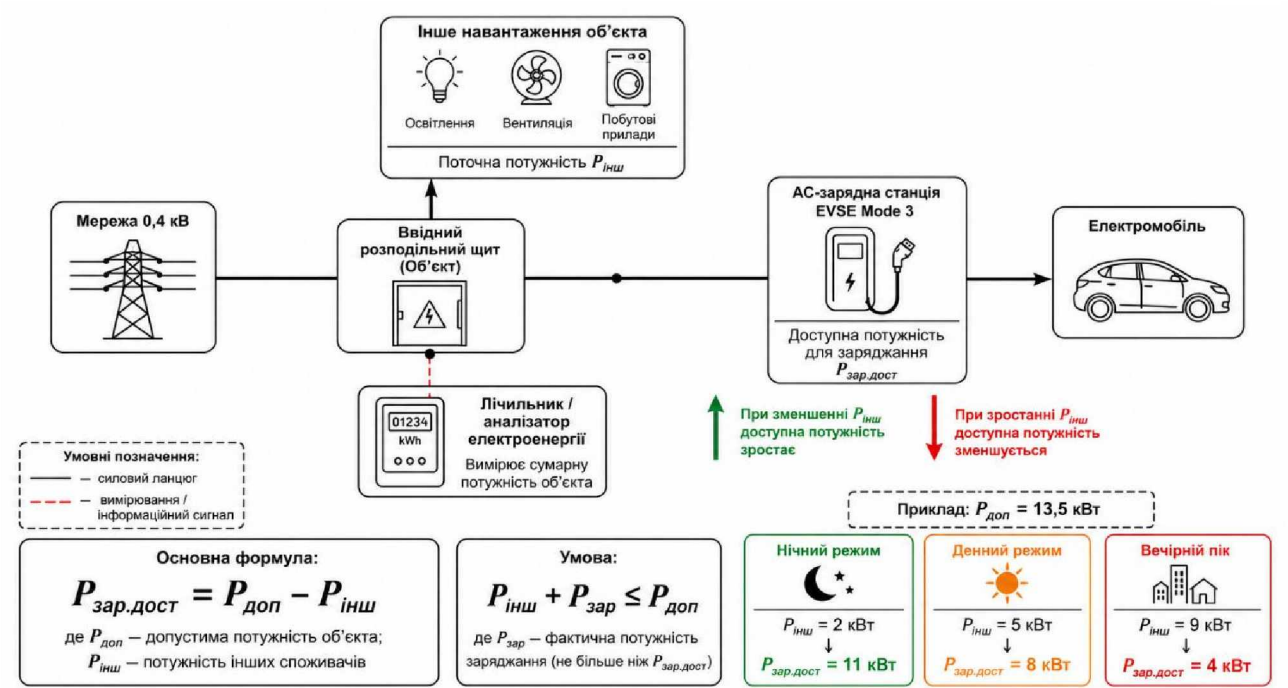


Рисунок 2.2 — Принцип визначення доступної потужності для заряджання електромобіля

2.3. Розрахунок струмів зарядної станції

Кабельна лінія живлення зарядної станції має бути вибрана за умовами допустимого тривалого струму, механічної міцності, способу прокладання, допустимого падіння напруги та умов захисту від короткого замикання і перевантаження. Для зарядної станції важливо враховувати, що навантаження може діяти тривалий час, тому кабель не повинен працювати на межі допустимого нагрівання [10; 11].

Для трифазної зарядної станції потужністю 11 кВт розрахунковий струм становить $I_{3\phi} = 16,2$ А. Для живлення зарядної станції приймаємо мідний кабель

з п'ятьма жилами: ВВГнг-LS 5×4 мм² або аналогічний мідний кабель з негорючою ізоляцією.

Такий кабель має запас за струмом для трифазного навантаження 16 А на фазу та забезпечує зменшення втрат напруги на ділянці від розподільного щита до зарядної станції. Використання кабелю з індексом нг-LS є доцільним для підвищення пожежної безпеки, особливо якщо зарядна станція встановлюється у будівлі або поблизу місць перебування людей [5; 10].

Перевіримо кабель за падінням напруги. Для трифазної мережі орієнтовне падіння напруги можна визначити за формулою:

$$\Delta U\% = (\sqrt{3} \cdot I \cdot L \cdot \rho \cdot 100) / (S \cdot U_{\text{л}}), \% \quad (2.9)$$

де $\Delta U\%$ — відносне падіння напруги, %; I — струм лінії, А; L — довжина кабельної лінії, м; ρ — питомий опір міді, Ом·мм²/м; S — переріз жили кабелю, мм²; $U_{\text{л}}$ — лінійна напруга, В.

Приймаємо: $I = 16,2$ А; $L = 30$ м; $\rho = 0,0175$ Ом·мм²/м; $S = 4$ мм²; $U_{\text{л}} = 400$ В.

$$\Delta U\% = (\sqrt{3} \cdot 16,2 \cdot 30 \cdot 0,0175 \cdot 100) / (4 \cdot 400) = 0,92 \%$$

Отримане падіння напруги є невеликим і не створює суттєвого впливу на роботу зарядної станції. Для порівняння, якщо розглядати однофазний варіант 7,4 кВт з кабелем 3×6 мм² і струмом 32,17 А, падіння напруги можна визначити за формулою:

$$\Delta U_{1\phi}\% = (2 \cdot I \cdot L \cdot \rho \cdot 100) / (S \cdot U_{\phi}), \% \quad (2.10)$$

$$\Delta U_{1\phi}\% = (2 \cdot 32,17 \cdot 30 \cdot 0,0175 \cdot 100) / (6 \cdot 230) = 2,45 \%$$

Отже, обидва варіанти можуть бути технічно реалізованими, але трифазний варіант має менший струм на фазу та менше падіння напруги. Тому для подальшого проектування приймаємо трифазну кабельну лінію ВВГнг-LS 5×4 мм².

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250с-13	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.4. Вибір апаратів захисту, комутації та обліку електроенергії

Електрична частина зарядної станції має забезпечувати захист від короткого замикання, перевантаження, струмів витоку, перенапруги та небезпечних режимів роботи. Оскільки зарядна станція працює у тривалому режимі та безпосередньо взаємодіє з користувачем і електромобілем, вимоги до захисту мають особливе значення [5; 9].

Для трифазної зарядної станції потужністю 11 кВт і розрахунковим струмом 16,2 А на фазу приймаємо склад електричного обладнання, наведений у таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 — Вибір основного електричного обладнання зарядної станції

Елемент схеми	Прийнятий варіант	Призначення
Ввідний автомат зарядної лінії	3Р, характеристика С, 20 А	Захист кабельної лінії від перевантаження та КЗ
Пристрій захисного відключення	Type А, 30 мА, з контролем постійного струму витоку 6 мА або Type В	Захист людини від ураження електричним струмом
Захист від перенапруги	SPD Type 2	Захист обладнання від імпульсних перенапруг
Силовий контактор	3Р або 4Р, не менше 25 А	Кероване вмикання і вимикання силового кола
Лічильник / аналізатор електроенергії	Трифазний, інтерфейсом RS-485/Modbus	Облік та передавання даних до контролера
Контролер EVSE	Mode 3, Control Pilot, Proximity Pilot	Керування процесом заряджання
Роз'єм	Type 2	Підключення електромобіля
Корпус зарядної станції	IP54 або вище	Захист від пилу та вологи залежно від місця встановлення

Вибір автоматичного вимикача номіналом 20 А пояснюється тим, що розрахунковий струм зарядної станції становить 16,2 А. Автоматичний вимикач

має захищати кабельну лінію та одночасно не вимикатися під час нормальної тривалої роботи зарядної станції.

Пристрій захисного відключення має бути розрахований на струм витоку 30 мА. Для зарядних станцій електромобілів важливо враховувати можливість появи постійної складової струму витоку. Тому може використовуватися ПЗВ типу В або ПЗВ типу А у поєднанні з пристроєм виявлення постійного диференційного струму 6 мА [9].

Силовий контактор необхідний для відключення силового кола до моменту встановлення правильного з'єднання з електромобілем. Контролер EVSE дозволяє подати живлення на контактор тільки після перевірки стану підключення та готовності електромобіля до заряджання [3].

Лічильник або аналізатор електроенергії виконує дві функції: облік електроенергії, спожитої електромобілем, і передавання даних про поточне навантаження до контролера або системи керування. Для реалізації динамічного обмеження потужності доцільно використовувати лічильник із цифровим інтерфейсом, наприклад RS-485/Modbus.

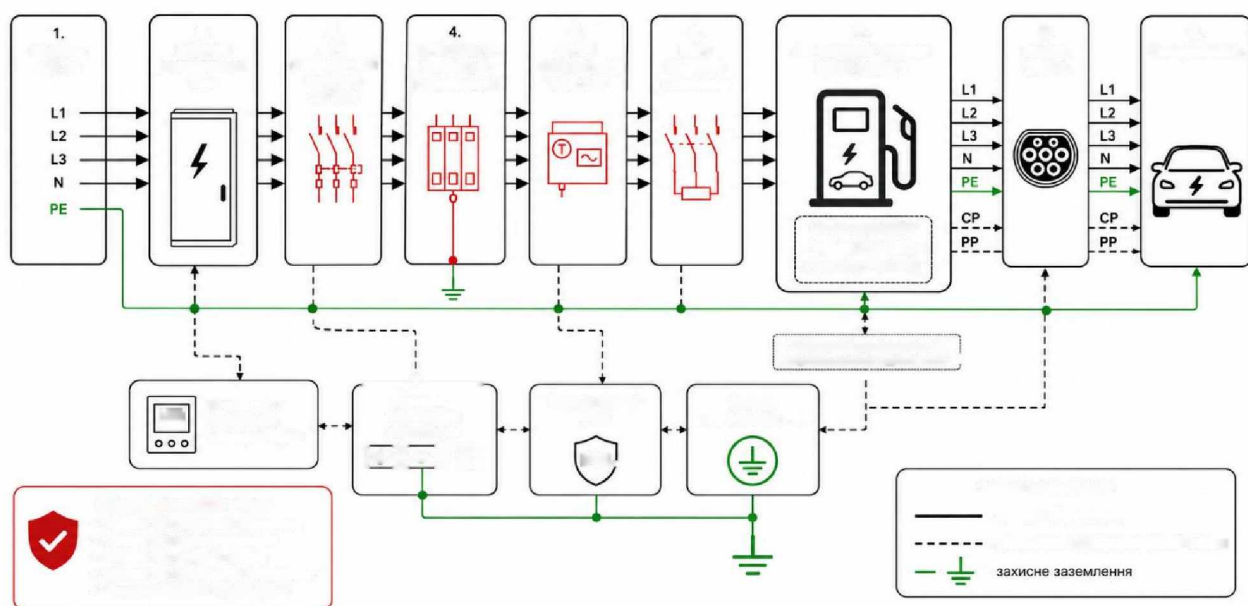


Рисунок 2.4 — Структурна схема електричного захисту АС-зарядної станції Mode 3

2.5. Розрахунок часу заряджання електромобіля

Одним із важливих показників ефективності зарядної станції є тривалість заряджання електромобіля. Вона залежить від ємності акумуляторної батареї, початкового і кінцевого рівня заряду, зарядної потужності та ККД процесу заряджання [1; 3].

Кількість енергії, яку необхідно передати до акумуляторної батареї, визначається за формулою:

$$E_{\text{зар}} = E_{\text{АКБ}} \cdot (SOС_{\text{кін}} - SOС_{\text{поч}}) / 100, \text{ кВт} \cdot \text{год} \quad (2.11)$$

де $E_{\text{зар}}$ — енергія, необхідна для заряджання акумулятора, кВт·год; $E_{\text{АКБ}}$ — повна ємність акумуляторної батареї, кВт·год; $SOС_{\text{поч}}$ — початковий рівень заряду, %; $SOС_{\text{кін}}$ — кінцевий рівень заряду, %.

Для електромобіля з ємністю акумуляторної батареї 60 кВт·год при заряджанні від 20 % до 80 %:

$$E_{\text{зар}} = 60 \cdot (80 - 20) / 100 = 36 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

Час заряджання з урахуванням ККД процесу визначається за формулою:

$$t_{\text{зар}} = E_{\text{зар}} / (P_{\text{зар}} \cdot \eta_{\text{зар}}), \text{ год} \quad (2.12)$$

де $t_{\text{зар}}$ — тривалість заряджання, год; $P_{\text{зар}}$ — зарядна потужність, кВт; $\eta_{\text{зар}}$ — ККД процесу заряджання.

Таблиця 2.5 — Орієнтовний час заряджання електромобіля від 20 % до 80 %

Зарядна потужність, кВт	Енергія для заряджання, кВт·год	ККД заряджання	Час заряджання, год
3,7	36	0,90	10,81
5,0	36	0,90	8,00
7,4	36	0,90	5,41
11,0	36	0,90	3,64

З таблиці видно, що збільшення зарядної потужності суттєво скорочує час заряджання. Однак для мережі малої потужності не завжди можливо постійно

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250с-13	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

використовувати максимальну потужність 11 кВт. Тому в реальних умовах час заряджання може бути більшим і залежатиме від поточного навантаження об'єкта та алгоритму динамічного обмеження потужності.

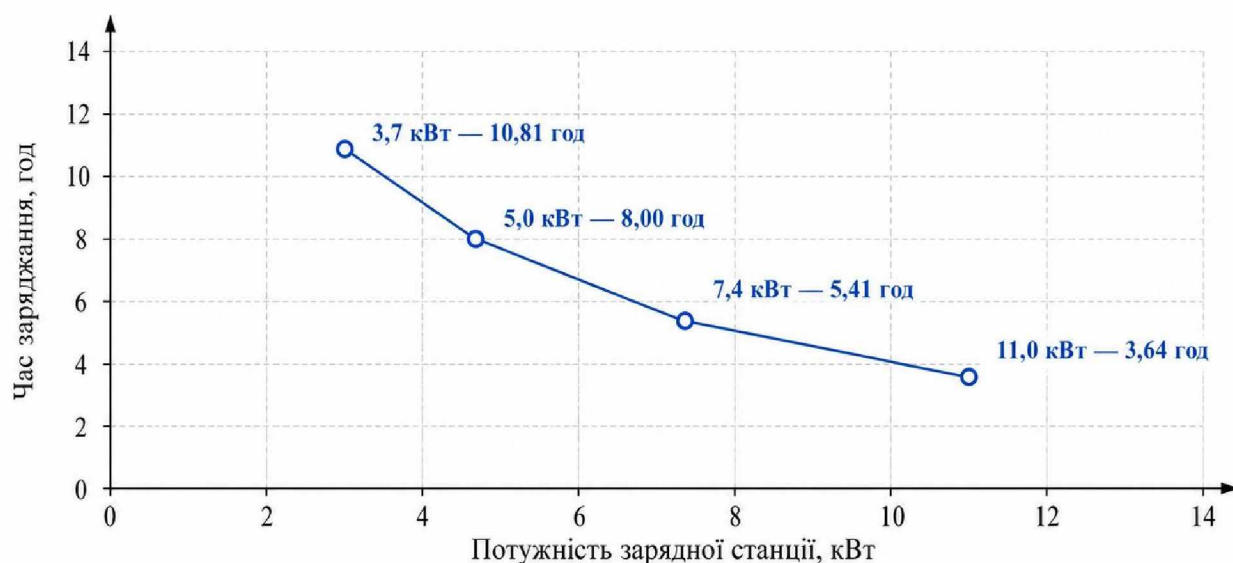


Рисунок 2.5 — Залежність часу заряджання електромобіля від потужності зарядної станції

2.6. Розробка алгоритму динамічного обмеження зарядної потужності

Основною особливістю проєктованої зарядної станції є використання алгоритму динамічного обмеження зарядної потужності. Його завдання полягає у тому, щоб зарядна станція автоматично змінювала зарядний струм залежно від поточного навантаження об'єкта та не допускала перевищення дозволеної потужності мережі [7; 8].

Ключова умова роботи алгоритму:

$$P_{\text{інш}} + P_{\text{зар}} \leq P_{\text{доп.розр}} \quad (2.13)$$

Якщо потужність інших споживачів зростає, зарядна потужність має зменшуватися. Якщо потужність інших споживачів зменшується, зарядна станція може збільшити зарядну потужність до номінального значення.

Доступна потужність для заряджання визначається за формулою:

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250с-13	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

$$P_{\text{зар.дост}} = P_{\text{доп.розр}} - P_{\text{інш}} \quad (2.14)$$

Фактична зарядна потужність визначається з урахуванням номінальної потужності зарядної станції:

$$P_{\text{зар.ф}} = \min(P_{\text{зар.ном}}; P_{\text{зар.дост}}), \text{ кВт} \quad (2.15)$$

Якщо доступна потужність нижча за мінімально допустиму потужність заряджання, заряджання може бути тимчасово призупинене. Для АС-заряджання Mode 3 мінімальний струм заряджання зазвичай приймають 6 А. Для трифазної мережі мінімальна потужність заряджання становить:

$$P_{\text{зар.мін}} = \sqrt{3} \cdot U_{\text{л}} \cdot I_{\text{мін}} \cdot \cos\varphi / 1000, \text{ кВт} \quad (2.16)$$

Приймаємо: $I_{\text{мін}} = 6 \text{ А}$; $U_{\text{л}} = 400 \text{ В}$; $\cos\varphi = 0,98$.

$$P_{\text{зар.мін}} = \sqrt{3} \cdot 400 \cdot 6 \cdot 0,98 / 1000 = 4,07 \text{ кВт}$$

Отже, якщо доступна потужність менша за 4,07 кВт, зарядна станція має тимчасово зупинити заряджання або перейти в режим очікування.

Розрахунок зарядного струму для заданої потужності виконується за формулою:

$$I_{\text{зар}} = P_{\text{зар.ф}} \cdot 1000 / (\sqrt{3} \cdot U_{\text{л}} \cdot \cos\varphi), \text{ А} \quad (2.17)$$

Для прикладу розглянемо декілька режимів роботи.

Таблиця 2.6 — Робота алгоритму динамічного обмеження зарядної потужності

Режим	Рінш, кВт	Рзар.дост, кВт	Рзар.ф, кВт	Ізар, А	Рішення контролера
Нічний режим	2,0	11,5	11,0	16,2	Заряджання на номінальній потужності
Денний режим	5,0	8,5	8,5	12,5	Обмеження струму
Вечірній пік	9,0	4,5	4,5	6,6	Мінімально допустиме заряджання
Критичне навантаження	11,0	2,5	0	0	Заряджання призупинено

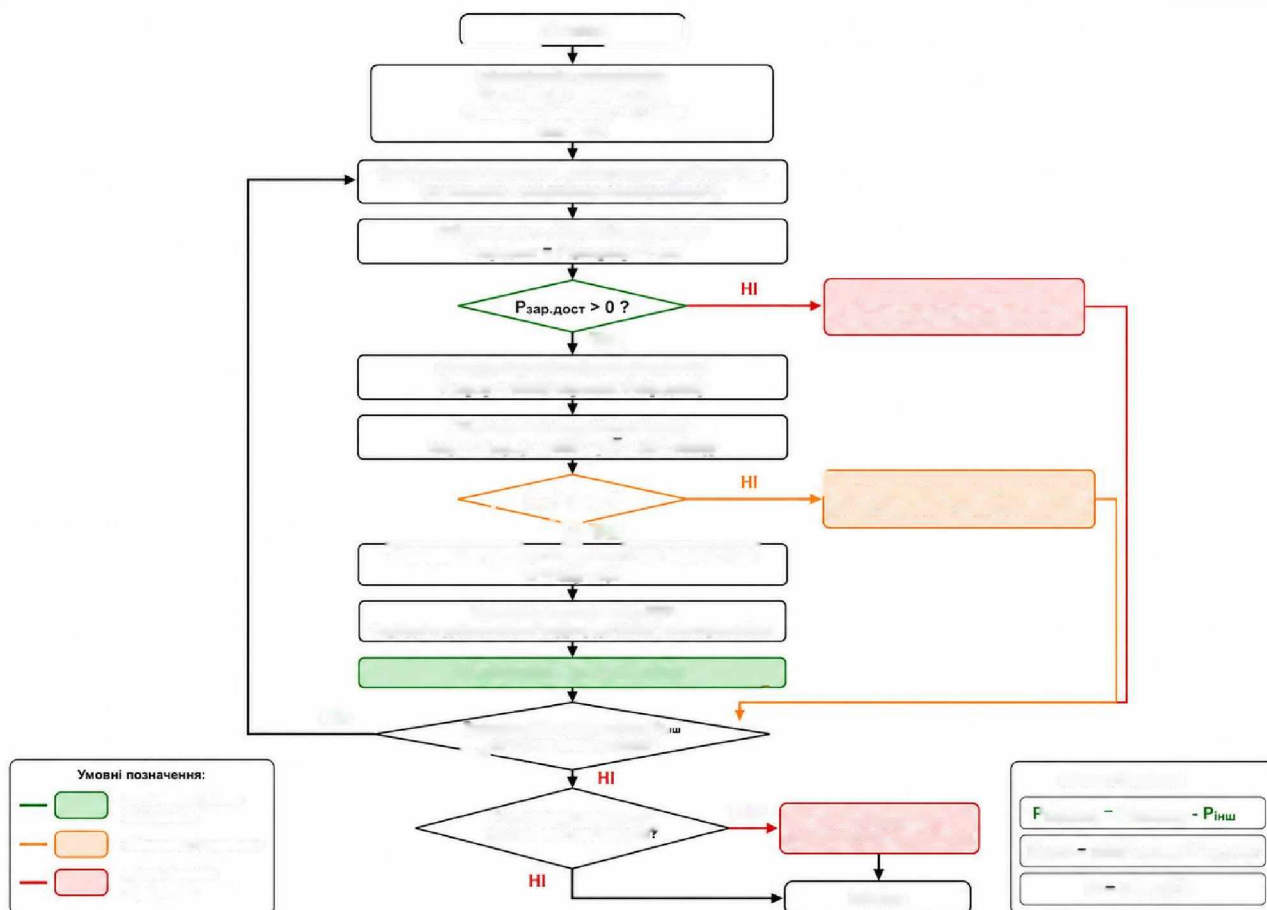


Рисунок 2.6 — Алгоритм динамічного обмеження зарядної потужності в мережі малої потужності

Для передавання електромобілю інформації про максимально допустимий зарядний струм у Mode 3 використовується сигнал Control Pilot з широтно-імпульсною модуляцією. У спрощеному вигляді для діапазону 10–85 % допустимий струм може бути пов’язаний із коефіцієнтом заповнення PWM за формулою:

$$I_{\text{зар.мах}} = 0,6 \cdot D, \text{ А} \quad (2.18)$$

де D — коефіцієнт заповнення PWM-сигналу, %.

Тоді необхідний коефіцієнт заповнення:

$$D = I_{\text{зар.мах}} / 0,6, \% \quad (2.19)$$

Наприклад, для струму 16 А: $D = 16 / 0,6 = 26,7 \%$. Для струму 10 А: $D = 10 / 0,6 = 16,7 \%$. Для струму 6 А: $D = 6 / 0,6 = 10 \%$.

Таким чином, контролер EVSE може реалізувати динамічне обмеження зарядної потужності шляхом зміни допустимого зарядного струму, який передається електромобілю через сигнал PWM Control Pilot.

Висновки до розділу 2

У другому розділі було виконано розрахунок електричної частини зарядної станції для електромобілів з підключенням до мережі малої потужності. Для аналізу було прийнято локальну трифазну мережу 0,4 кВ з дозволеною потужністю 15 кВт. Розглянуто два можливі варіанти зарядної станції: однофазну АС-станцію потужністю 7,4 кВт та трифазну АС-станцію потужністю 11 кВт.

Розрахунком встановлено, що однофазна зарядна станція потужністю 7,4 кВт створює струм приблизно 32,17 А в одній фазі, що може призвести до нерівномірного навантаження мережі. Трифазна зарядна станція потужністю 11 кВт створює струм приблизно 16,2 А у кожній фазі, тому є більш доцільною для мережі 0,4 кВ за умови наявності трифазного вводу.

Виконано перевірку відповідності зарядної станції дозволених потужностей об'єкта. Показано, що при одночасній роботі локального навантаження 9 кВт і зарядної станції 11 кВт сумарна потужність становить 20 кВт, що перевищує дозовану потужність об'єкта 15 кВт. Тому для такої мережі необхідне динамічне обмеження зарядної потужності.

Для живлення зарядної станції прийнято мідний кабель ВВГнг-LS 5×4 мм². Розраховане падіння напруги для трифазного варіанта при довжині кабельної лінії 30 м становить приблизно 0,92 %, що є прийнятним для нормальної роботи зарядної станції.

Для електричного захисту зарядної станції обрано автоматичний вимикач 3Р С20, пристрій захисного відключення 30 мА з урахуванням контролю постійного диференційного струму або ПЗВ типу В, захист від перенапруги SPD

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250с-13	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Type 2, силовий контактор, лічильник або аналізатор електроенергії та контролер EVSE Mode 3.

Розроблено алгоритм динамічного обмеження зарядної потужності, згідно з яким фактична потужність зарядної станції визначається як різниця між допустимою потужністю мережі та поточним навантаженням інших споживачів. Такий алгоритм дозволяє уникнути перевантаження мережі малої потужності та забезпечити раціональне використання доступної електричної потужності.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250с-13	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ ЗАРЯДНОЇ СТАНЦІЇ ТА ОЦІНЮВАННЯ ЇЇ ВПЛИВУ НА МЕРЕЖУ МАЛОЇ ПОТУЖНОСТІ

3.1. Постановка задачі моделювання

Метою моделювання у третьому розділі є перевірка працездатності запропонованого технічного рішення АС-зарядної станції Mode 3 у складі локальної мережі малої потужності. На відміну від попереднього розділу, де було виконано розрахунок окремих електричних параметрів, у цьому розділі розглядається зміна навантаження протягом доби, вплив зарядної станції на сумарну потужність об'єкта, робота алгоритму динамічного обмеження зарядної потужності та зміна стану заряду акумуляторної батареї електромобіля [3; 8; 15].

Моделювання доцільно виконати у середовищі MATLAB за допомогою Live Script. Такий формат дозволяє поєднати текстові пояснення, розрахунковий код, графіки, таблиці та результати в одному виконуваному документі. Згідно з документацією MathWorks, Live Script може містити код, результати його виконання, форматований текст, рівняння, зображення та гіперпосилання, що робить його зручним для навчальних і дослідницьких задач [15].

У межах роботи моделюється не детальна електромагнітна модель силового перетворювача, а енергетична модель взаємодії зарядної станції з мережею 0,4 кВ. Такий підхід є достатнім для оцінювання навантаження мережі малої потужності, оскільки АС-зарядна станція Mode 3 передає електроенергію до бортового зарядного пристрою електромобіля, а керування допустимим струмом заряджання здійснюється через сигнал Control Pilot [3; 12; 14].

У моделі досліджуються два основні режими: некероване заряджання, за якого зарядна станція працює на номінальній потужності, та кероване

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250с-13			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розробив	Маїрка О.				Розділ 2	Літ.	Арк.	Акрушів
Перевірів	Пересунько І.							
Н. Контр.	Пересунько І.					КНУ гр. ЕЕМ-23ск		
Затвердж.	Пересунько І.							

заряджання, за якого потужність зарядної станції змінюється залежно від поточного навантаження об'єкта. Порівняння цих режимів дозволяє визначити, чи може запропонований алгоритм запобігати перевищенню допустимої потужності мережі.

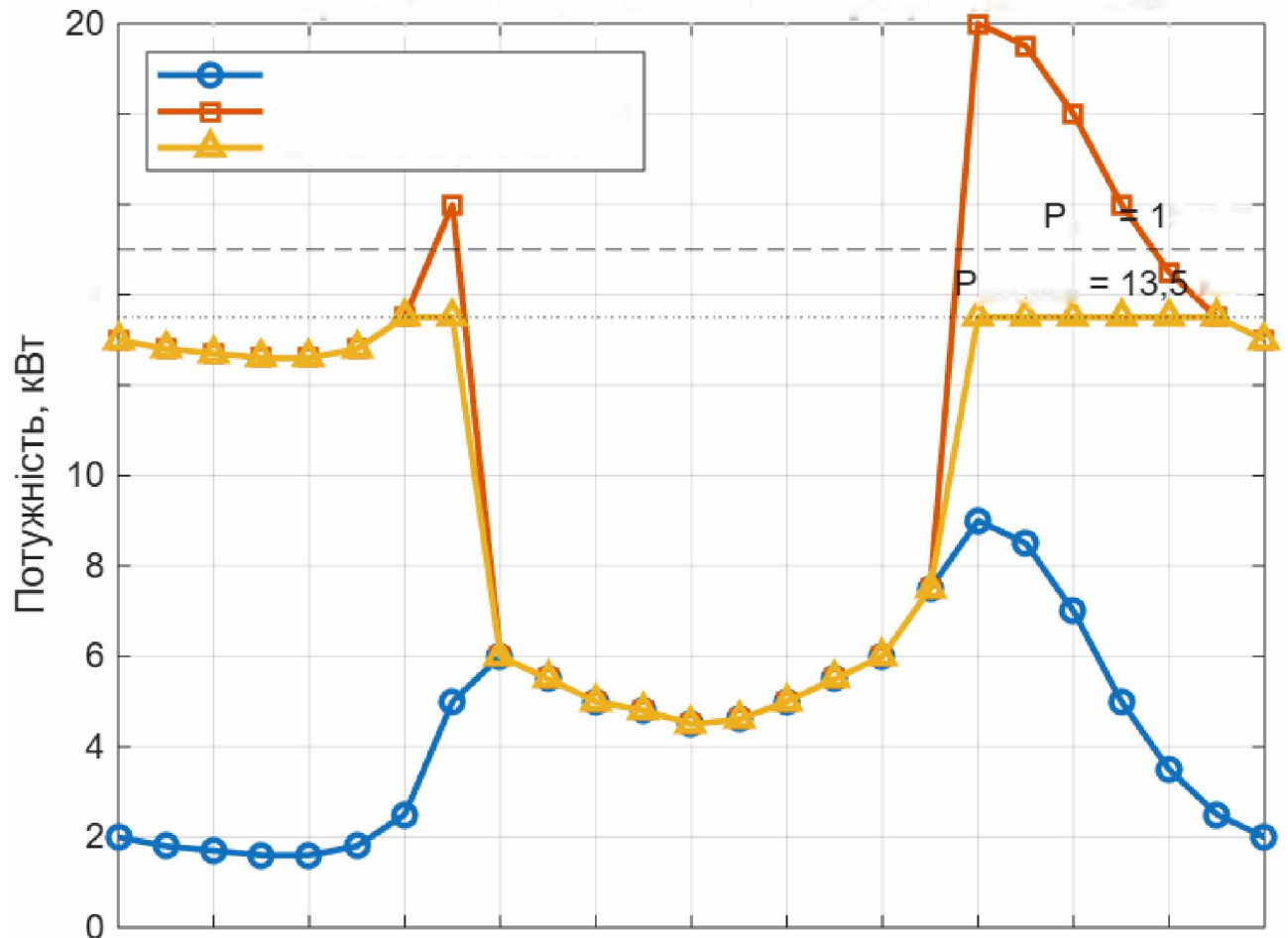


Рисунок 3.1 — Узагальнена модель взаємодії зарядної станції з мережею малої потужності

3.2. Математичний опис моделі мережі малої потужності та зарядної станції

Для моделювання прийнято локальну трифазну мережу 0,4 кВ з дозволеною потужністю 15 кВт. З урахуванням резерву потужності використовується розрахункова межа навантаження, яка становить 90 % від дозволеної потужності. Такий резерв потрібний для врахування короточасних

змін навантаження, неточності вимірювання та уникнення роботи ввідної лінії на граничному значенні [8; 10; 11].

$$P_{\text{доп.розр}} = k_{\text{рез}} \cdot P_{\text{доп}}, \text{ кВт}, \quad (3.1)$$

де $P_{\text{доп.розр}}$ — розрахункова допустима потужність об'єкта, кВт; $k_{\text{рез}}$ — коефіцієнт резерву потужності; $P_{\text{доп}}$ — дозволена потужність об'єкта, кВт.

За прийнятих вихідних даних:

$$P_{\text{доп.розр}} = 0,9 \cdot 15 = 13,5 \text{ кВт}.$$

Сумарна потужність об'єкта в кожний момент часу визначається як сума потужності інших споживачів і потужності зарядної станції:

$$P_{\Sigma}(t) = P_{\text{інш}}(t) + P_{\text{зар}}(t), \text{ кВт}, \quad (3.2)$$

де $P_{\Sigma}(t)$ — сумарна потужність об'єкта у момент часу t , кВт; $P_{\text{інш}}(t)$ — потужність інших споживачів об'єкта, кВт; $P_{\text{зар}}(t)$ — потужність зарядної станції, кВт.

Умова безпечної роботи мережі малої потужності має вигляд:

$$P_{\text{інш}}(t) + P_{\text{зар}}(t) \leq P_{\text{доп.розр}}. \quad (3.3)$$

Доступна потужність для заряджання електромобіля визначається за формулою:

$$P_{\text{зар.дост}}(t) = P_{\text{доп.розр}} - P_{\text{інш}}(t), \text{ кВт}. \quad (3.4)$$

Фактична зарядна потужність не повинна перевищувати номінальну потужність зарядної станції. Тому для керованого режиму приймається така залежність:

$$P_{\text{зар}}(t) = \min(P_{\text{зар.ном}}; P_{\text{зар.дост}}(t)), \text{ кВт}. \quad (3.5)$$

Якщо доступна потужність нижча за мінімальну потужність заряджання, зарядна станція переходить у режим очікування. Для АС-заряджання Mode 3 мінімальний зарядний струм приймається 6 А, що відповідає вимогам практичної реалізації керування через Control Pilot [3; 14]. Мінімальна потужність трифазного заряджання визначається за формулою:

$$P_{\text{зар.min}} = \sqrt{3} \cdot U_{\text{л}} \cdot I_{\text{min}} \cdot \cos\varphi / 1000, \text{ кВт}. \quad (3.6)$$

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250с-13	Арк.
						43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Після підстановки вихідних даних отримаємо:

$$P_{зар.min} = \sqrt{3} \cdot 400 \cdot 6 \cdot 0,98 / 1000 = 4,07 \text{ кВт.}$$

Зарядний струм для трифазної АС-зарядної станції визначається за формулою:

$$I_{зар}(t) = P_{зар}(t) \cdot 1000 / (\sqrt{3} \cdot U_{л} \cdot \cos\varphi), \text{ А.} \quad (3.7)$$

Для оцінювання впливу зарядної станції на напругу в точці підключення розраховується падіння напруги у кабельній лінії:

$$\Delta U\%(t) = \sqrt{3} \cdot I_{зар}(t) \cdot L \cdot \rho \cdot 100 / (S \cdot U_{л}), \%. \quad (3.8)$$

Напруга на затискачах зарядної станції визначається за формулою:

$$U_{зар}(t) = U_{л} \cdot (1 - \Delta U\%(t) / 100), \text{ В.} \quad (3.9)$$

Стан заряду акумуляторної батареї електромобіля розраховується за енергетичним балансом:

$$SOC(t + \Delta t) = SOC(t) + P_{зар}(t) \cdot \eta_{зар} \cdot \Delta t / E_{АКБ} \cdot 100, \%. \quad (3.10)$$

Наведені залежності дозволяють побудувати спрощену, але достатньо інформативну модель роботи зарядної станції у складі локальної мережі малої потужності. Така модель показує не внутрішню структуру бортового зарядного пристрою, а вплив режимів заряджання на сумарне навантаження, струм, падіння напруги та тривалість заряджання електромобіля.

Таблиця 3.1 — Основні параметри моделі зарядної станції та мережі

Параметр	Позначення	Значення	Одиниця
Лінійна напруга мережі	U _л	400	В
Дозволена потужність об'єкта	Р _{доп}	15	кВт
Коефіцієнт резерву	к _{рез}	0,9	в.о.
Розрахункова допустима потужність	Р _{доп.розр}	13,5	кВт

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250с-13	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Номинальна потужність зарядної станції	P _{зар.ном}	11	кВт
Мінімальний зарядний струм	I _{min}	6	А
Ємність акумулятора електромобіля	ЕАКБ	60	кВт·год
Початковий рівень заряду	SOC _{поч}	20	%
Кінцевий рівень заряду	SOC _{кін}	80	%
Довжина кабельної лінії	L	30	м
Переріз жили кабелю	S	4	мм ²

3.3. Формування добового графіка навантаження об'єкта

Для перевірки роботи алгоритму динамічного обмеження потужності необхідно сформувати добовий графік навантаження об'єкта. У реальних умовах потужність споживання залежить від типу об'єкта, кількості електроприймачів, режиму роботи людей, освітлення, вентиляції, побутових приладів та інших навантажень. Для бакалаврської роботи прийнято типовий розрахунковий графік, у якому виділено нічний період з низьким навантаженням, денний режим середнього навантаження та вечірній пік [8; 10].

Електромобіль вважається підключеним до зарядної станції у вечірньо-нічний період з 18:00 до 07:00. Це відповідає типовому сценарію, коли користувач підключає автомобіль до зарядної станції після завершення робочого дня, а заряджання може тривати вночі. У некерованому режимі зарядна станція намагається працювати на номінальній потужності 11 кВт. У керованому режимі зарядна потужність обмежується відповідно до доступної потужності мережі.

Таблиця 3.2 — Розрахунковий добовий графік локального навантаження об'єкта

Період доби	Години	Потужність Рінш, кВт	Характеристика режиму
Нічний період	0:00–6:00	1,6–2,5	Мінімальне навантаження, робота чергових споживачів
Ранковий період	7:00–9:00	5,0–6,0	Увімкнення освітлення, вентиляції та побутових приладів
Денний період	10:00–16:00	4,5–6,0	Стабільне робоче навантаження об'єкта
Вечірній пік	17:00–20:00	7,0–9,0	Максимальне одночасне використання електроприймачів
Пізній вечір	21:00–24:00	2,0–5,0	Поступове зменшення локального навантаження

Для некерованого режиму сумарне навантаження може перевищувати розрахункову допустиму потужність мережі, особливо у вечірній пік. Для керованого режиму зарядна станція має автоматично знижувати потужність заряджання, якщо потужність інших споживачів зростає. Це дозволяє використовувати зарядну станцію навіть у мережі малої потужності без збільшення дозволеної потужності вводу [8; 14].

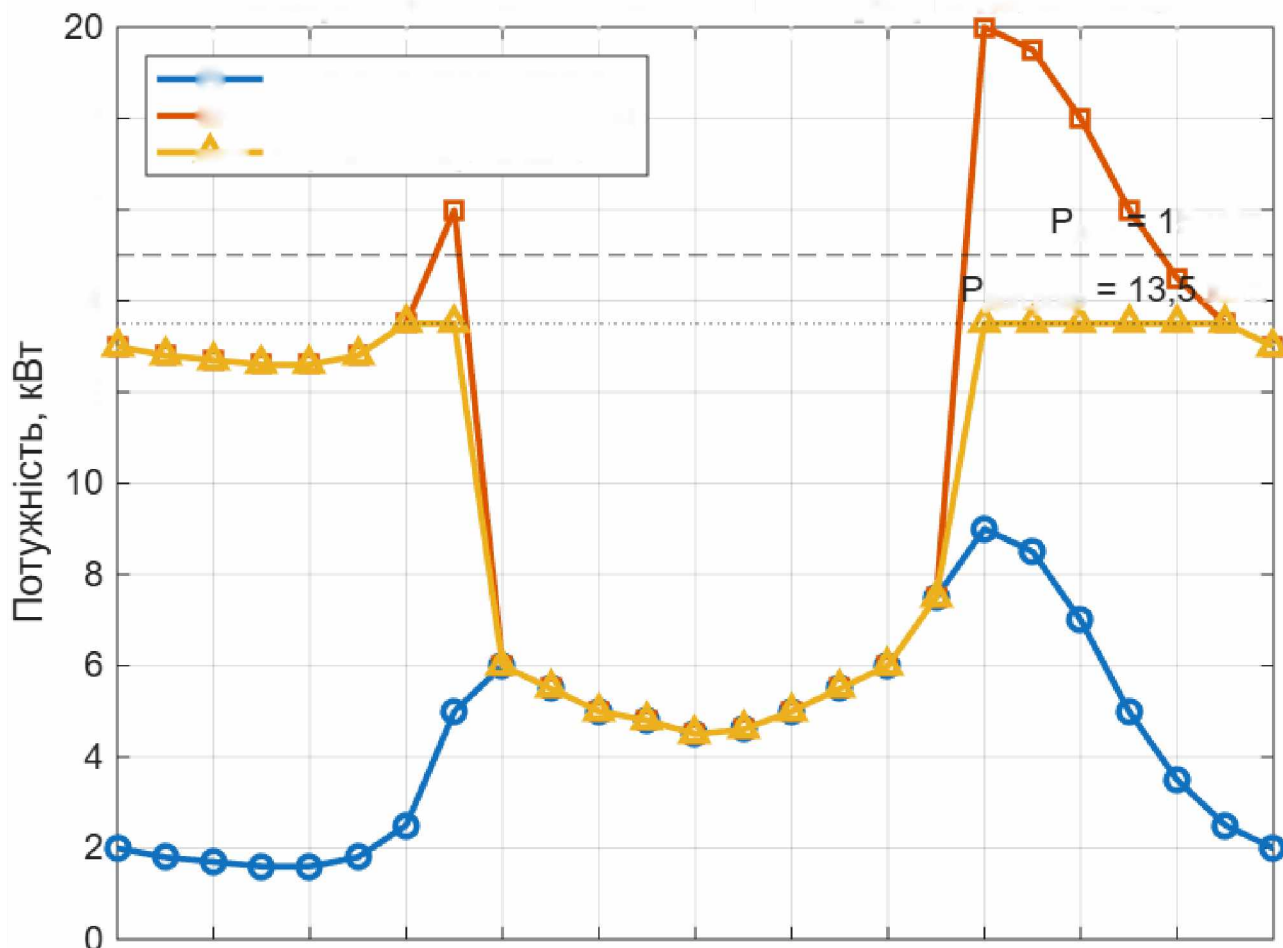


Рисунок 3.2 — Добовий графік локального навантаження об'єкта малої потужності без урахування зарядної станції

3.4. MATLAB Live Script для моделювання режимів заряджання

Для виконання моделювання розроблено єдиний код MATLAB Live Script, який формуює вихідні дані, розраховує потужність некерованого та керованого заряджання, визначає струм зарядної станції, коефіцієнт заповнення PWM Control Pilot, падіння напруги в кабельній лінії, зміну SOC акумулятора та будує всі необхідні графіки. Побудова графіків виконується стандартними засобами MATLAB, зокрема функцією plot, яка використовується для створення двовимірних лінійних графіків [15; 16].

У коді прийнято, що електромобіль може заряджатися у період 18:00–07:00. Для добового графіка ранкові години 0:00–7:00 відображають

продовження нічного періоду заряджання. У разі досягнення заданого рівня заряду акумулятора заряджання може бути завершено, однак для оцінювання навантаження мережі також аналізується потенційна робота зарядної станції у межах усього дозволеного інтервалу.

Лістинг 3.1 — Загальний код MATLAB Live Script для розрахунку та побудови графіків режимів заряджання

```
% Моделювання AC-зарядної станції Mode 3 у мережі малої потужності
% Бакалаврська робота: проектування зарядної станції для електромобілів
% Мета: порівняти некероване і кероване заряджання в мережі 0,4 кВ.

clear; clc; close all;

%% 1. Вихідні дані мережі та зарядної станції
U_line = 400;           % лінійна напруга мережі, В
f = 50;                 % частота мережі, Гц
P_allow = 15;           % дозволена потужність об'єкта, кВт
k_res = 0.90;           % коефіцієнт резерву потужності
P_lim = k_res * P_allow; % розрахункова допустима потужність, кВт

P_ch_nom = 11;          % номінальна потужність зарядної станції, кВт
cosphi = 0.98;          % коефіцієнт потужності зарядного навантаження
I_min = 6;              % мінімальний струм заряджання Mode 3, А
P_ch_min = sqrt(3)*U_line*I_min*cosphi/1000; % мінімальна потужність, кВт

L = 30;                 % довжина кабельної лінії, м
S = 4;                 % переріз жили кабелю, мм^2
rho = 0.0175;           % питомий опір міді, Ом*мм^2/м

E_bat = 60;             % ємність акумулятора електромобіля, кВт*год
SOC0 = 20;              % початковий SOC, %
SOC_target = 80;        % кінцевий SOC, %
eta_ch = 0.90;          % ККД процесу заряджання

%% 2. Добовий графік локального навантаження об'єкта
% Ряд відповідає годинам 0, 1, 2, ..., 24.
t = 0:1:24;
P_other = [2.0 1.8 1.7 1.6 1.6 1.8 2.5 5.0 6.0 5.5 ...
           5.0 4.8 4.5 4.6 5.0 5.5 6.0 7.5 9.0 8.5 ...
           7.0 5.0 3.5 2.5 2.0];

% Електромобіль доступний для заряджання у вечірньо-нічний період.
EV_connected = (t >= 18) | (t <= 7);

%% 3. Некероване заряджання
P_ch_unc = zeros(size(t));
P_ch_unc(EV_connected) = P_ch_nom;
P_total_unc = P_other + P_ch_unc;

%% 4. Кероване заряджання з динамічним обмеженням потужності
P_avail = P_lim - P_other; % доступна потужність, кВт
P_ch_ctrl = min(P_ch_nom, P_avail); % не більше номіналу
P_ch_ctrl(P_ch_ctrl < P_ch_min) = 0; % нижче мінімуму - очікування
P_ch_ctrl(~EV_connected) = 0; % якщо EV не підключений
P_ch_ctrl(P_ch_ctrl < 0) = 0;
P_total_ctrl = P_other + P_ch_ctrl;

%% 5. Струм заряджання, PWM Control Pilot та падіння напруги
I_unc = P_ch_unc*1000 ./ (sqrt(3)*U_line*cosphi);
I_ctrl = P_ch_ctrl*1000 ./ (sqrt(3)*U_line*cosphi);

% Для діапазону 10...85 % у спрощеному вигляді: I_max = 0,6*D.
D_pwm_ctrl = I_ctrl / 0.6; % коефіцієнт заповнення PWM, %
D_pwm_ctrl(I_ctrl == 0) = 0;

DeltaU_unc = sqrt(3)*I_unc*L*rho*100/(S*U_line);
DeltaU_ctrl = sqrt(3)*I_ctrl*L*rho*100/(S*U_line);
```

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250с-13	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		


```

U_ch_unc = U_line*(1 - DeltaU_unc/100);
U_ch_ctrl = U_line*(1 - DeltaU_ctrl/100);

%% 6. Розрахунок SOC у сеансі заряджання з 18:00 до 07:00
session_clock = [18 19 20 21 22 23 24 0 1 2 3 4 5 6 7];
P_unc_session = zeros(size(session_clock));
P_ctrl_session = zeros(size(session_clock));

for k = 1:length(session_clock)
    idx = find(t == session_clock(k));
    P_unc_session(k) = P_ch_unc(idx);
    P_ctrl_session(k) = P_ch_ctrl(idx);
end

E_need = E_bat*(SOC_target - SOC0)/100; % потрібна енергія, кВт*год
cumE_unc = [0 cumsum(P_unc_session*eta_ch)];
cumE_ctrl = [0 cumsum(P_ctrl_session*eta_ch)];
session_h = 0:length(session_clock);
SOC_unc = SOC0 + cumE_unc/E_bat*100;
SOC_ctrl = SOC0 + cumE_ctrl/E_bat*100;

% Орієнтовний час досягнення SOC_target з лінійною інтерполяцією.
t_to_target_unc = interp1(cumE_unc, session_h, E_need, 'linear');
t_to_target_ctrl = interp1(cumE_ctrl, session_h, E_need, 'linear');

%% 7. Підсумкова таблиця результатів
max_unc = max(P_total_unc);
max_ctrl = max(P_total_ctrl);
excess_unc = max(0, max_unc - P_lim);
excess_ctrl = max(0, max_ctrl - P_lim);

Results = table(max_unc, max_ctrl, excess_unc, excess_ctrl, ...
    max(I_unc), max(I_ctrl), max(DeltaU_unc), max(DeltaU_ctrl), ...
    t_to_target_unc, t_to_target_ctrl, ...
    'VariableNames', {'Psum_unc_kW', 'Psum_ctrl_kW', 'Excess_unc_kW', ...
    'Excess_ctrl_kW', 'I_unc_A', 'I_ctrl_A', 'dU_unc_percent', ...
    'dU_ctrl_percent', 't_unc_h', 't_ctrl_h'});

disp('Підсумкові результати моделювання:');
disp(Results);

%% 8. Графік 1: добовий графік навантаження
figure('Name','Daily load profile');
plot(t, P_other, '-o', 'LineWidth', 1.8); hold on;
plot(t, P_total_unc, '-s', 'LineWidth', 1.8);
plot(t, P_total_ctrl, '-^', 'LineWidth', 1.8);
yline(P_allow, '--', 'P_{доп} = 15 кВт');
yline(P_lim, ':', 'P_{доп.розр} = 13,5 кВт');
grid on; xlim([0 24]); xticks(0:2:24);
xlabel('Час доби, год'); ylabel('Потужність, кВт');
title('Вплив зарядної станції на добовий графік навантаження');
legend('Локальне навантаження', ...
    'Некероване заряджання', ...
    'Кероване заряджання', ...
    'Location','northwest');

%% 9. Графік 2: доступна та фактична зарядна потужність
figure('Name','Available and actual charging power');
plot(t, P_avail, '--', 'LineWidth', 1.8); hold on;
plot(t, P_ch_unc, '-s', 'LineWidth', 1.8);
plot(t, P_ch_ctrl, '-^', 'LineWidth', 1.8);
yline(P_ch_nom, ':', 'P_{зар.ном}');
yline(P_ch_min, '--', 'P_{зар.min}');
grid on; xlim([0 24]); xticks(0:2:24);
xlabel('Час доби, год'); ylabel('Потужність, кВт');
title('Доступна та фактична зарядна потужність');
legend('Доступна потужність', ...
    'Некероване заряджання', ...
    'Кероване заряджання', ...
    'Location','northwest');

%% 10. Графік 3: зарядний струм і PWM Control Pilot
figure('Name','Charging current and PWM duty');
yyaxis left;
plot(t, I_ctrl, '-o', 'LineWidth', 1.8);
ylabel('Зарядний струм I_{зар}, А');
yyaxis right;
plot(t, D_pwm_ctrl, '-s', 'LineWidth', 1.8);

```

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250с-13	Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

```

ylabel('Коефіцієнт заповнення PWM, %');
grid on; xlim([0 24]); xticks(0:2:24);
xlabel('Час доби, год');
title('Керування зарядним струмом через PWM Control Pilot');
legend('I_{зар}', 'D_{PWM}', 'Location','northwest');

%% 11. Графік 4: падіння напруги та напруга на зарядній станції
figure('Name','Voltage drop and charger voltage');
yyaxis left;
plot(t, DeltaU_ctrl, '-o', 'LineWidth', 1.8);
ylabel('Падіння напруги, %');
yyaxis right;
plot(t, U_ch_ctrl, '-s', 'LineWidth', 1.8);
ylabel('Напруга на зарядній станції, В');
grid on; xlim([0 24]); xticks(0:2:24);
xlabel('Час доби, год');
title('Падіння напруги у кабельній лінії зарядної станції');
legend('Delta U, %', 'U_{зар}, В', 'Location','southwest');

%% 12. Графік 5: зміна SOC електромобіля
figure('Name','SOC profile');
plot(session_h, SOC_unc, '-s', 'LineWidth', 1.8); hold on;
plot(session_h, SOC_ctrl, '-^', 'LineWidth', 1.8);
yline(SOC_target, '--', 'SOC_{кін} = 80 %');
grid on;
xlabel('Час від початку заряджання, год');
ylabel('SOC акумулятора, %');
title('Зміна стану заряду акумулятора електромобіля');
legend('Некероване заряджання', ...
       'Кероване заряджання', ...
       'Location','southeast');

```

3.5. Результати моделювання добового навантаження

За результатами моделювання встановлено, що у режимі некерованого заряджання сумарне навантаження об'єкта може досягати 20 кВт. Це перевищує як дозволена потужність об'єкта 15 кВт, так і розрахункову межу 13,5 кВт. Найбільш небезпечним є вечірній період, коли локальне навантаження об'єкта є максимальним, а електромобіль підключається до зарядної станції одразу після прибуття користувача [8; 14].

У режимі керованого заряджання контролер EVSE обмежує зарядну потужність залежно від поточного навантаження об'єкта. У результаті сумарне навантаження не перевищує розрахункову межу 13,5 кВт. Це свідчить про ефективність динамічного обмеження зарядної потужності для мереж малої потужності.

Таблиця 3.3 — Порівняння результатів моделювання некерованого та керованого заряджання

Показник	Некероване заряджання	Кероване заряджання
----------	-----------------------	---------------------

Максимальна сумарна потужність об'єкта	20,0 кВт	13,5 кВт
Перевищення Рдоп.розр = 13,5 кВт	6,5 кВт	0 кВт
Максимальний струм зарядної станції	16,2 А	16,2 А
Мінімальна активна потужність заряджання у піковий період	11,0 кВт	4,5 кВт
Максимальне падіння напруги в кабелі зарядної лінії	0,92 %	0,92 %
Мінімальна напруга на затискачах зарядної станції	396,3 В	396,3 В
Орієнтовний час заряджання від 20 % до 80 %	3,64 год	5,50 год

З таблиці 3.3 видно, що динамічне керування не зменшує технічну можливість зарядної станції працювати на номінальній потужності у періоди низького навантаження, але обмежує її роботу у періоди пікового споживання. Таким чином, основним результатом керування є не постійне зменшення зарядної потужності, а її перерозподіл у часі з урахуванням доступної потужності мережі.

3.6. Аналіз зарядного струму, PWM Control Pilot і падіння напруги

Для АС-зарядної станції Mode 3 важливою особливістю є те, що електромобіль отримує інформацію про максимально допустимий зарядний струм через сигнал Control Pilot. У спрощеній моделі прийнято залежність між допустимим струмом і коефіцієнтом заповнення PWM-сигналу. Зміна PWM-сигналу дозволяє контролеру EVSE зменшувати або збільшувати зарядний струм без механічного втручання користувача [3; 14].

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250с-13	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

У вечірній пік, коли локальне навантаження об'єкта становить 9 кВт, доступна потужність заряджання з урахуванням резерву становить лише 4,5 кВт. Відповідний зарядний струм визначається за формулою (3.7):

$$I_{зар} = 4,5 \cdot 1000 / (\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0,98) = 6,62 \text{ А.}$$

Такий струм є близьким до мінімально допустимого значення 6 А. Якщо локальне навантаження зросте ще більше, заряджання має бути тимчасово зупинене. У нічний період, коли локальне навантаження становить приблизно 2 кВт, доступної потужності достатньо для роботи зарядної станції на номінальній потужності 11 кВт, що відповідає струму приблизно 16,2 А.

Падіння напруги у кабельній лінії залежить від зарядного струму. Для максимального струму 16,2 А, довжини кабельної лінії 30 м та перерізу жили 4 мм² падіння напруги становить приблизно 0,92 %. Мінімальна напруга на затискачах зарядної станції у цьому режимі становить близько 396,3 В. Отримане значення є прийнятним для розглянутої зарядної лінії та підтверджує правильність вибору кабелю ВВГнг-LS 5×4 мм² [10; 11].

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250с-13	Арк.
						52
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

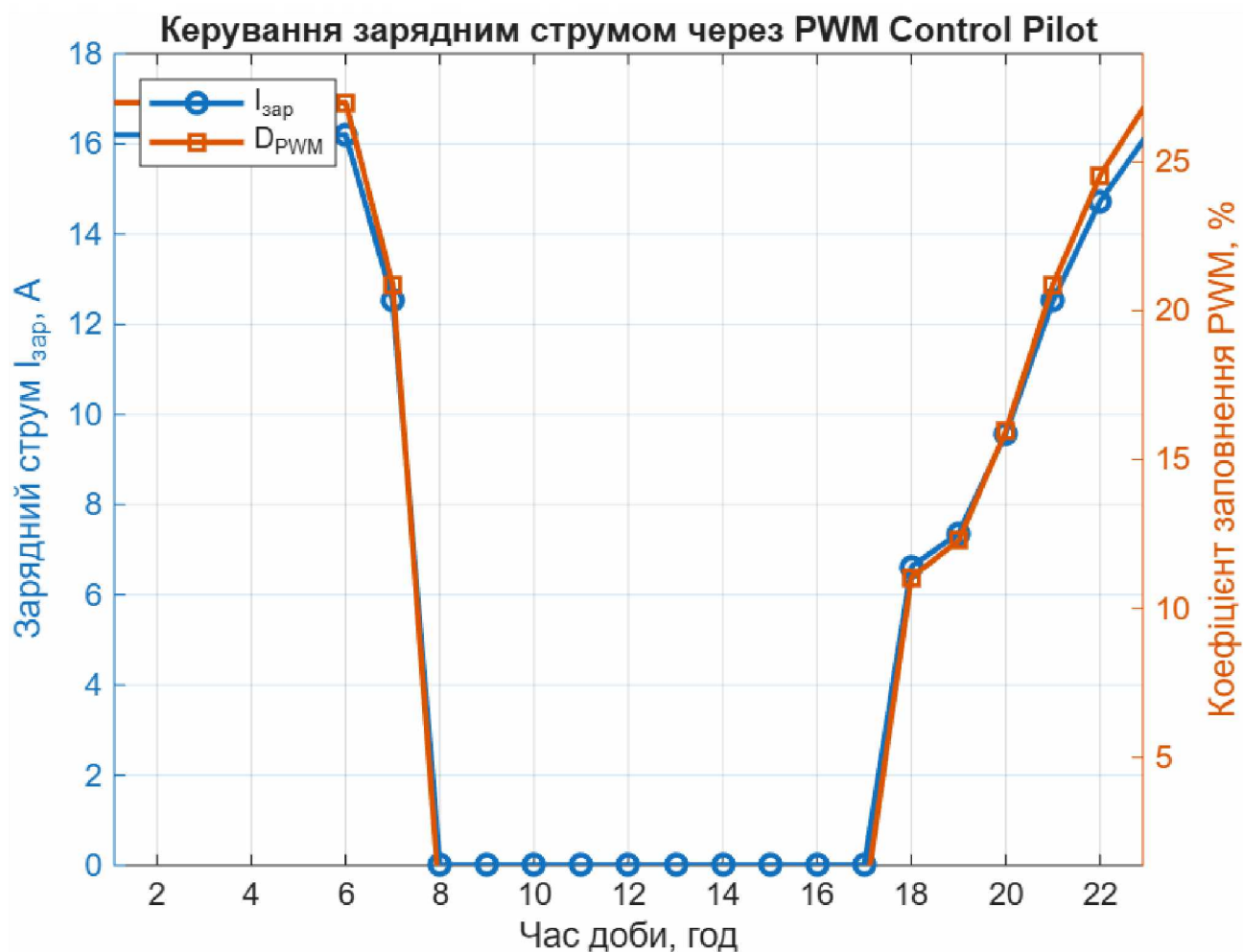


Рисунок 3.5 — Зміна зарядного струму та коефіцієнта заповнення PWM Control Pilot

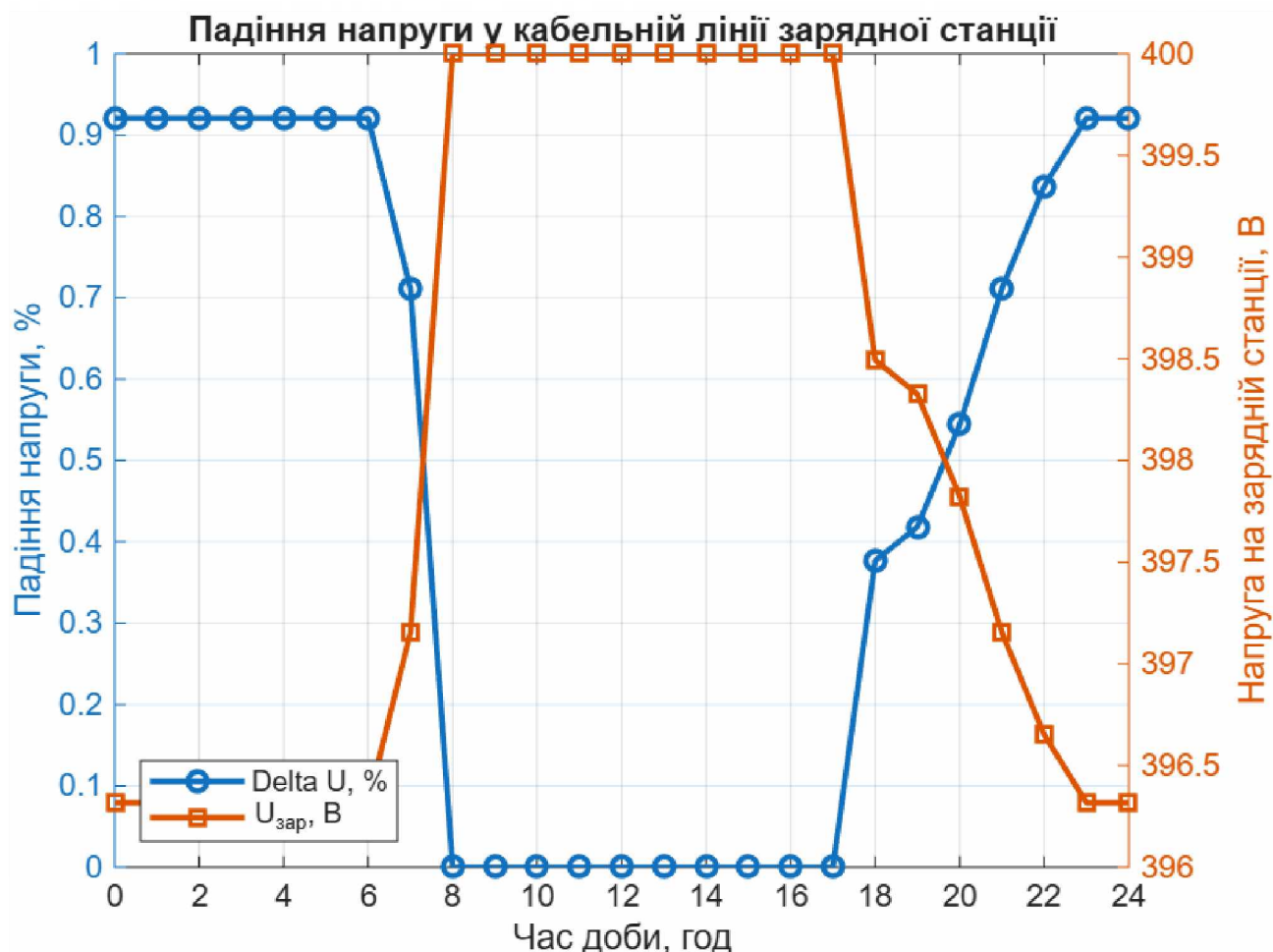


Рисунок 3.6 — Падіння напруги в кабельній лінії та напруга на затискачах зарядної станції

3.7. Аналіз процесу заряджання акумулятора електромобіля

Для оцінювання практичної придатності запропонованого рішення було змодельовано процес заряджання акумуляторної батареї електромобіля ємністю 60 кВт·год від 20 % до 80 %. Необхідна кількість енергії для такого заряджання становить 36 кВт·год. З урахуванням ККД зарядного процесу 0,90 час заряджання при постійній потужності 11 кВт становить приблизно 3,64 год, що відповідає результатам розрахунку другого розділу [1; 3].

У режимі динамічного обмеження зарядної потужності тривалість заряджання збільшується, оскільки у вечірній період потужність зарядної станції обмежується до 4,5–8,5 кВт залежно від локального навантаження. За прийнятим графіком навантаження час досягнення 80 % SOC становить приблизно 5,50 год. Це більше, ніж у некерованому режимі, однак така різниця є прийнятною для

нічного заряджання, оскільки електромобіль залишається підключеним до зарядної станції протягом декількох годин.

Таким чином, динамічне обмеження зарядної потужності збільшує тривалість заряджання, але дозволяє уникнути перевантаження мережі малої потужності. Для більшості побутових, офісних або навчальних об'єктів такий компроміс є технічно доцільним, оскільки він зменшує потребу в реконструкції електропостачання.

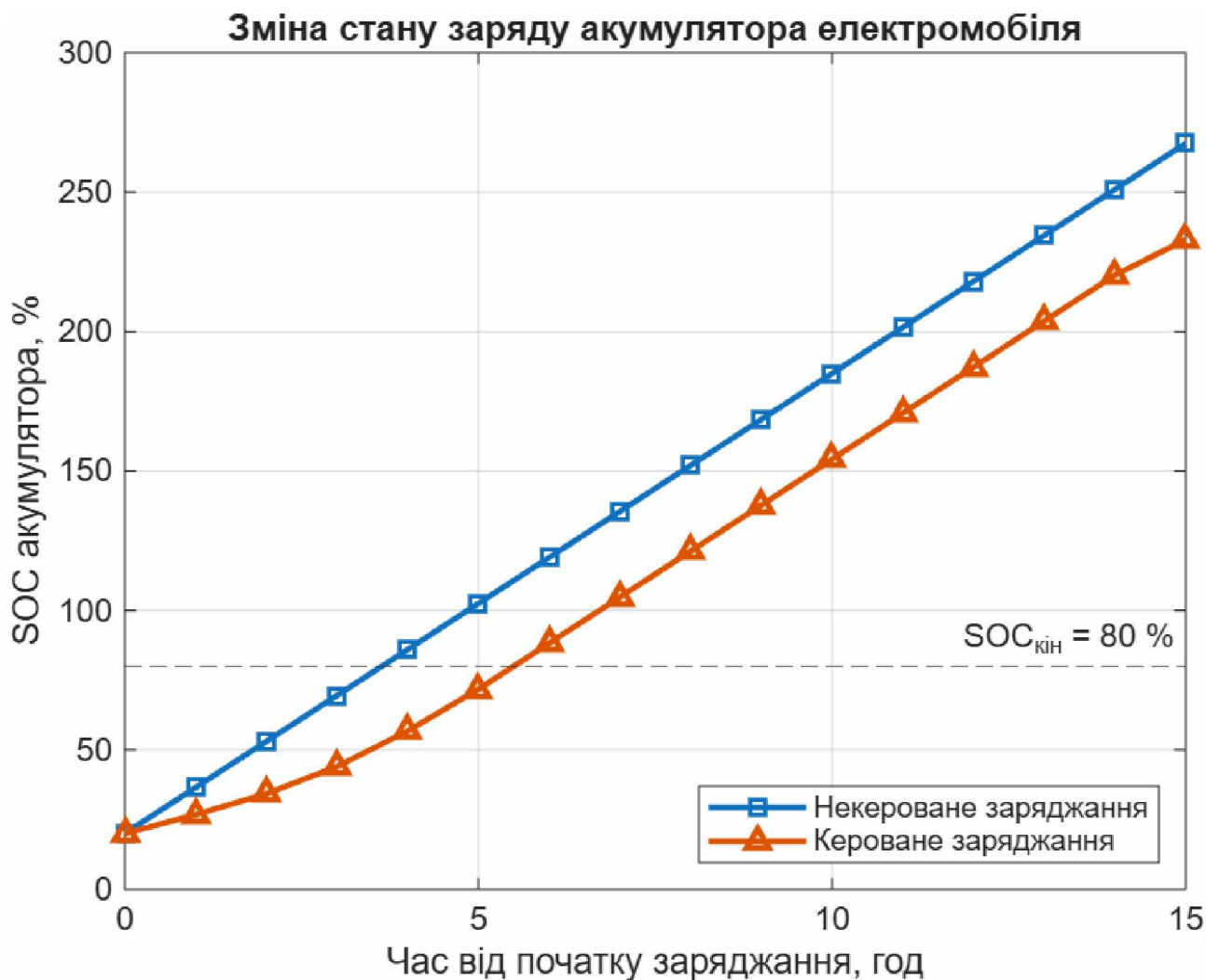


Рисунок 3.7 — Зміна стану заряду акумуляторної батареї електромобіля при некерованому та керованому заряджанні

3.8. Оцінка ефективності запропонованого рішення

За результатами розрахунків і моделювання можна зробити висновок, що запропонована структура АС-зарядної станції Mode 3 з динамічним обмеженням зарядної потужності є доцільною для мережі малої потужності. Основна перевага

рішення полягає у тому, що зарядна станція не створює неконтрольованого додаткового навантаження, а працює в межах доступної потужності об'єкта [8; 14].

У некерованому режимі підключення зарядної станції потужністю 11 кВт до об'єкта з дозволеною потужністю 15 кВт може призвести до перевищення навантаження до 20 кВт. Це створює ризик спрацювання ввідного автомата, перегрівання кабельних ліній, зниження напруги та порушення умов електробезпеки. У керованому режимі сумарна потужність об'єкта обмежується на рівні 13,5 кВт, що відповідає прийнятому резерву потужності.

Перевагами запропонованого підходу є: можливість підключення зарядної станції без значної реконструкції вводу; зменшення ризику перевантаження мережі; автоматична адаптація зарядної потужності до поточного навантаження; раціональне використання нічних періодів низького навантаження; можливість реалізації на базі серійного контролера EVSE, лічильника електроенергії та сигналу PWM Control Pilot [3; 7; 14].

Обмеженням запропонованого рішення є збільшення тривалості заряджання у періоди високого навантаження. Однак для мереж малої потужності це обмеження є прийнятним, оскільки головним критерієм є не максимальна швидкість заряджання, а безпечна інтеграція зарядної станції в наявну електричну мережу. Для подальшого розвитку роботи можна додати моделювання тарифних зон, локальної фотоелектричної генерації, акумуляторного накопичувача або декількох зарядних постів.

Висновки до розділу 3

У третьому розділі виконано моделювання режимів роботи АС-зарядної станції Mode 3 у складі локальної мережі малої потужності. Для моделювання використано середовище MATLAB Live Script, що дозволило поєднати вихідні дані, математичні залежності, програмний код, розрахункові таблиці та графіки.

Побудовано модель добового графіка локального навантаження об'єкта та розглянуто два режими роботи зарядної станції: некероване заряджання на

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250с-13	Арк.
						56
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

номінальній потужності 11 кВт і кероване заряджання з динамічним обмеженням потужності. У некерованому режимі максимальна сумарна потужність об'єкта становить 20 кВт, що перевищує допустиму розрахункову межу 13,5 кВт. У керованому режимі сумарна потужність не перевищує 13,5 кВт.

Розраховано зміну зарядного струму, коефіцієнта заповнення PWM Control Pilot, падіння напруги в кабельній лінії та стану заряду акумуляторної батареї електромобіля. Встановлено, що максимальне падіння напруги у зарядній лінії становить приблизно 0,92 %, а мінімальна напруга на затискачах зарядної станції становить близько 396,3 В, що підтверджує правильність вибору кабельної лінії.

Показано, що динамічне обмеження зарядної потужності збільшує орієнтовний час заряджання від 20 % до 80 % з 3,64 год до 5,50 год, але дозволяє уникнути перевантаження мережі малої потужності. Отже, запропоноване рішення є технічно доцільним для малих об'єктів з обмеженою виділеною потужністю.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250с-13	Арк.
						57
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Global EV Outlook 2025 / International Energy Agency. Paris : IEA, 2025. URL: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2025> (дата звернення: 08.06.2026).
2. Electric vehicle charging. Global EV Outlook 2025 / International Energy Agency. Paris : IEA, 2025. URL: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2025/electric-vehicle-charging> (дата звернення: 08.06.2026).
3. Global EV Outlook 2026 / International Energy Agency. Paris : IEA, 2026. URL: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2026> (дата звернення: 08.06.2026).
4. Trends in electric cars. Global EV Outlook 2026 / International Energy Agency. Paris : IEA, 2026. URL: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2026/trends-in-electric-cars> (дата звернення: 08.06.2026).
5. Electric car stocks / International Energy Agency ; processed by Our World in Data. Our World in Data, 2026. URL: <https://ourworldindata.org/grapher/electric-car-stocks> (дата звернення: 08.06.2026).
6. Alternative Fuels Infrastructure / European Commission. URL: https://transport.ec.europa.eu/transport-themes/clean-transport/alternative-fuels-sustainable-mobility-europe/alternative-fuels-infrastructure_en (дата звернення: 08.06.2026).
7. Regulation (EU) 2023/1804 of the European Parliament and of the Council of 13 September 2023 on the deployment of alternative fuels infrastructure. Official Journal of the European Union. 2023. URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2023/1804/oj> (дата звернення: 08.06.2026).

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250с-13			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розробив		Шевченко Т.			Список використаних джерел	Літ.	Арк.	Акрушів
Перевірів		Грушевський					59	4
						КНУ		
Н. Контр.		Грушевський				гр. ЕЕМ-141		
Затвердж.		Амосов М.						

8. IEC 61851-1:2017. Electric vehicle conductive charging system — Part 1: General requirements. Geneva : International Electrotechnical Commission, 2017. URL: <https://webstore.iec.ch/en/publication/33644> (дата звернення: 08.06.2026).
9. IEC 62196-2:2025. Plugs, socket-outlets, vehicle connectors and vehicle inlets — Conductive charging of electric vehicles — Part 2: Dimensional compatibility requirements for AC pin and contact-tube accessories. Geneva : International Electrotechnical Commission, 2025. URL: <https://webstore.iec.ch/en/publication/86317> (дата звернення: 08.06.2026).
10. IEC 60364-7-722:2018. Low-voltage electrical installations — Part 7-722: Requirements for special installations or locations — Supplies for electric vehicles. Geneva : International Electrotechnical Commission, 2018. URL: <https://webstore.iec.ch/en/publication/29958> (дата звернення: 08.06.2026).
11. IEC 62752:2016. In-cable control and protection device for mode 2 charging of electric road vehicles. Geneva : International Electrotechnical Commission, 2016.
12. ДСТУ 9222:2023. Пожежна безпека. Протипожежний захист систем зарядки електромобілів. Основні положення. Чинний від 2023-11-01. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2023. URL: https://zakon.isu.net.ua/sites/default/files/normdocs/dstu_9222_2023_0.pdf (дата звернення: 08.06.2026).
13. ДСТУ HD 60364-5-52:2021. Низьковольтні електричні установки. Частина 5-52. Вибірання та монтування електричного устаткування. Системи електропроводки. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2021.
14. Правила улаштування електроустановок. 6-те вид., перероб. і допов. Харків : Форт, 2017. 760 с. URL: <https://zakon.isu.net.ua/sites/default/files/normdocs/pue.pdf> (дата звернення: 08.06.2026).
15. Impact of Electric Vehicles on the Grid / U.S. Department of Energy. Washington, 2024. URL: <https://www.energy.gov/sites/default/files/2024->

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250с-13	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		59

10/Congressional%20Report%20EV%20Grid%20Impacts.pdf (дата звернення: 08.06.2026).

16.OCPP : Discover our open standards for future-ready EV charging / Open Charge Alliance. URL: <https://openchargealliance.org/protocols/open-charge-point-protocol/> (дата звернення: 08.06.2026).

17.Communication Protocols / Vector Informatik GmbH. URL: <https://www.vector.com/int/en/know-how/smart-charging/communication-protocols/> (дата звернення: 08.06.2026).

18.Phoenix Contact. How can the charging process be optimally controlled? Phoenix Contact E-Mobility, 2025. URL: <https://www.phoenixcontact-emobility.com/en/news-and-events/charging-infrastructure/charging-process-optimal-control/> (дата звернення: 08.06.2026).

19.User Manual UM EN EV Charge Control. Phoenix Contact, 2015. 108 p. URL: <https://asset.conrad.com/media10/add/160267/c1/-/en/000554895ML02/gebruiksaanwijzing-554895-em-cp-pp-eth-oplader.pdf> (дата звернення: 08.06.2026).

20.Electrical power distribution for Electric Vehicle Charging Infrastructure (EVCI). ABB, 2024. 46 p. URL: https://library.e.abb.com/public/8aba80dc993a45259c616eb4aab5d913/9AKK108468A6297_WP%20EVCI.pdf (дата звернення: 08.06.2026).

21.Power Topologies in Electric Vehicle Charging Stations. Texas Instruments, 2020. 22 p. URL: <https://www.ti.com/lit/pdf/slla497> (дата звернення: 08.06.2026).

22.EV Charging Station. NXP Semiconductors, 2021. 4 p. URL: <https://www.nxp.com/assets/block-diagram/en/EVChargingStation.pdf> (дата звернення: 08.06.2026).

23.Electrical infrastructure for e-car charging stations. Siemens TIP technical series. Edition 9. Siemens, 2021. URL: <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:8d1d198c465395b165>

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250с-13	Арк.
						60
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

b9e7bf8066243371ef5b0a/09-electrical-infrastructure-for-e-car-charging-stations.pdf (дата звернення: 08.06.2026).

24. EV charging — electrical installation design / Electrical Installation Guide. Schneider Electric. URL: https://www.electrical-installation.org/enwiki/EV_charging_-_electrical_installation_design (дата звернення: 08.06.2026).
25. Technical Guidelines on Charging Facilities for Electric Vehicles. Hong Kong : Electrical and Mechanical Services Department, 2015. URL: https://www.emsd.gov.hk/filemanager/en/content_444/Charging_Facilities_Electric_Vehicles.pdf (дата звернення: 08.06.2026).
26. Rata M., Rata G., Filote C., Graur A. The Electrical Vehicle Simulator for Charging Station in Mode 3 of IEC 61851-1 Standard. Energies. 2020. Vol. 13, No. 1. Article 176. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/13/1/176> (дата звернення: 08.06.2026).
27. MATLAB Documentation / MathWorks. URL: <https://www.mathworks.com/help/matlab/> (дата звернення: 08.06.2026).
28. Live Editor: Create live scripts in MATLAB / MathWorks. URL: <https://www.mathworks.com/help/matlab/live-scripts-and-functions.html> (дата звернення: 08.06.2026).
29. Simulink Documentation / MathWorks. URL: <https://www.mathworks.com/help/simulink/> (дата звернення: 08.06.2026).
30. Simscape Electrical Documentation / MathWorks. URL: <https://www.mathworks.com/help/sps/> (дата звернення: 08.06.2026).
31. Ukraine has set a new record in the development of electric mobility / UkraineInvest. URL: <https://ukraineinvest.gov.ua/en/news/ukraine-has-set-a-new-record-in-the-development-of-electric-mobility/> (дата звернення: 08.06.2026).

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250с-13	Арк.
						61
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		