

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Навчально-науковий інститут енергозбереження та енергоменеджменту

Кафедра електропостачання

«На правах рукопису»
УДК 621.311

«До захисту допущено»

В.о. завідувача кафедри

_____ Денис ДЕРЕВ'ЯНКО

« ____ » _____ 2024 р.

Магістерська дисертація

зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

за освітньо-професійною програмою «Енергетичний менеджмент та енергоефективні технології»

на тему: «Оптимізація режимів роботи зарядних станцій електромобілів постійним струмом»

Виконала: студентка II курсу, групи ОН-з21мп

Лавренова Єлизавета Русланівна

(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Науковий керівник д.т.н., проф. Денисюк С. П.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали)

(підпис)

Консультант з нормоконтролю к.т.н., доц. Шовкалюк М. М.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали)

(підпис)

Рецензент доц. кафедри АЕМК НН ІЕЕ, к.т.н., доц. Данілін О.В.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали)

(підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студентка _____

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Навчально-науковий інститут енергозбереження та енергоменеджменту
Кафедра електропостачання

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітньо-професійна програма «Енергетичний менеджмент та енергоефективні технології»

В.о. завідувача кафедри

_____ Денис ДЕРЕВ'ЯНКО

«___» _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію студентці

Лавреновій Єлизаветі Русланівні

1. Тема дисертації «Оптимізація режимів роботи зарядних станцій електромобілів постійним струмом»

Науковий керівник дисертації д.т.н., проф. Денисюк С. П

затверджені наказом по університету від «08» листопада 2023 р. № 5199-с

2. Строк подання студентом дисертації «11» січня 2024 року

3. Об'єкт дослідження: процес диспетчеризації генерації, акумулювання та купівлі/продажу електричної енергії на зарядній станції електромобілів постійним струмом.

4. Предмет дослідження: оптимізація процесів диспетчеризації генерації, акумулювання та купівлі/продажу електричної енергії для зарядної станції електромобілів постійним струмом на основі мікромережі з фотоелектричним модулем, системою накопичення та підключенням до громадської мережі.

5. Перелік завдань, які потрібно виконати: 1) Проаналізувати ринки електромобілів та зарядні станції: компоненти, типи процесу зарядки, рівні заряджання; 2) Виконати аналіз архітектур зарядних станцій на основі Microgrid з інтегрованими ВДЕ; 3) Дослідити світовий досвід систем енергетичного менеджменту громадських зарядних станцій; 4) Змоделювати та оптимізувати систему зарядної станції електромобілів постійним струмом на основі мікромережі; 5) Розробити стартап проекту.

6. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: презентація «Оптимізація режимів роботи зарядних станцій електромобілів постійним струмом».

7. Орієнтовний перелік публікацій: стаття у фаховому виданні категорії «Б» та тези доповідей на двох конференціях.

8. Консультанти розділів дисертації:

Нормоконтроль

к.т.н., доц. Шовкалюк М. М.

9. Дата видачі завдання 30 січня 2023 року

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Строк виконання етапів МД	Примітка
1	Отримання завдання	30.01.2023	Вик.
2	Аналіз літературних джерел	01.02.2023-31.05.2023	Вик.
3	Складання плану роботи	01.06.2023-30.06.2023	Вик.
4	Аналіз зарядних станцій електромобілів: компоненти, типи процесу зарядки, рівні заряджання	01.09.2023-14.09.2023	Вик.
5	Аналіз архітектур зарядних станцій на основі Microgrid та інтеграція ВДЕ	15.09.2023-30.09.2023	Вик.
6	Системи енергетичного менеджменту громадських зарядних станцій	01.10.2023-05.10.2023	Вик.
7	Моделювання та оптимізація системи зарядної станції електромобілів постійним струмом на основі мікромережі	06.10.2023-31.10.2023	Вик.
8	Розроблення стартап проекту	01.11.2023-30.11.2023	Вик.
9	Оформлення реферату та презентації, проходження перевірки на плагіат та рецензування	01.12.2023-15.12.2023	Вик.
10	Передзахист МД	15.12.2023	Вик.
11	Захист дисертації	15.01.2024	Вик.

Студентка

(підпис)

Є. Р. Лавренова

Науковий керівник дисертації

(підпис)

С. П. Денисюк

РЕФЕРАТ

Структура і обсяг роботи: магістерська дисертація викладена на 113 сторінках. Складається зі вступу, 4 розділів, висновків та додатку А. Містить 38 рисунків, 15 таблиць, 24 формули. Список використаних джерел налічує 80 бібліографічних найменувань за переліком посилань.

Актуальність теми. Поширення електромобілів є основним напрямком розвитку автомобільної галузі в усьому світі. Вони мають нульові викиди та низький рівень шуму, тому є ідеальним рішенням для боротьби з проблемами екології та нестачі викопного палива. Однією із перепон розповсюдження електромобілів є нестача зарядної інфраструктури та час необхідний для їх заряджання.

Екологічною складовою електромобілів також є первинний ресурс електроенергії. Для підтримки ідеї нульової толерантності до викидів парникових газів найкращим рішенням є розбудова зарядних станцій на основі мікромереж із відновлюваними джерелами енергії. Фотоелектричні системи можуть бути встановлені на навісах для паркування автомобілів - карпортах або на дахах будівель, підключені до зарядної станції, яка в свою чергу може працювати в острівному режимі або в режимі підключення до мережі. Через переривчастість відновлюваних джерел енергії необхідно підключення станції до громадської електромережі для забезпечення стабільної роботи станції, навіть у періоди низької сонячної генерації.

Якщо електромобілі будуть заряджатися зеленою енергією ринок електромобілів буде заохочуватися, оскільки використання електромобілів сприятиме мінімізації впливу транспорту на навколишнє середовище.

Випадковий або неузгоджений підхід до заряджання електромобілів негативно впливає на розподільчу мережу, включаючи приріст реальних втрат електроенергії, зміну напруги в мережі, надмірне навантаження на мережу. Тому робота станції контролюється відповідним органом - агрегатором. Агрегатор — це взаємодіючий орган між клієнтами - власниками електромобілів та оператором розподільчої мережі, який

оптимально задовольняє вимоги клієнтів щодо зарядки без шкоди для мережевих обмежень. Контроль за роботою станції може виконуватись, централізовано або розподілено. Обидва підходи переслідують одну, або кілька цілей, серед яких мінімізація витрат; мінімізація втрат потужності; стабільність напруги; зниження пікового навантаження; скорочення довгих черг на зарядних станціях; а також зменшення перевантаження лінії, мережі та трансформатора.

Агрегатор зарядної станції також може отримувати вигоду, беручи участь в енергетичному ринку і продаючи надлишкову енергію в мережу за допомогою концепції PV to Grid (PV2G). Використовуючи наявні дані щодо попиту на навантаження, фотоелектричної потужності та потужності накопичувача, доступної на зарядній станції, можна розрахувати оптимальний алгоритм роботи зарядної станції, максимізуючи прибуток.

Метою даної роботи є формування графіку розподілу потужностей зарядної станції на основі мікромережі з фотоелектричним модулем при мінімізації вартості первинної енергії для агрегатора зарядної станції.

Об'єкт дослідження: процес диспетчеризації генерації, акумулювання та купівлі/продажу електричної енергії на зарядній станції електромобілів постійним струмом.

Предмет дослідження: оптимізація процесів диспетчеризації генерації, акумулювання та купівлі/продажу електричної енергії для зарядної станції електромобілів постійним струмом на основі мікромережі з фотоелектричним модулем, системою накопичення та підключенням до громадської мережі.

Методи дослідження: Дане дослідження було проведено з використанням сучасного методу обчислювальної математики - цілочисельного змішаного лінійного програмування з розв'язувачем interior-point solver. Для обчислення цільової функції і моделювання роботи зарядної станції використано програмне середовище *Jupyter Notebook*, бібліотеку для задач оптимізації *GEKKO* на мові програмування *Python*.

Наукова новизна результатів дослідження. Проведено комплексні дослідження зарядних станцій електромобілів, їх компоненти, типи процесу зарядки, рівні заряджання. Проаналізовано світовий досвід розбудови зарядних станцій на основі Microgrid та інтеграція в них ВДЕ. Зроблено висновки щодо перспективних напрямів розвитку зарядної інфраструктури в Україні та можливості ефективного використання енергоресурсів.

Підтверджено ефективність використання методу цілочисельного змішаного лінійного програмування з розв’язувачем *interior-point solver* для оптимізації роботи зарядної станції постійного струму. Для чотирьох експериментальних варіантів роботи станції було знайдено оптимальні рішення, які мінімізують вартість первинної енергії для агрегатора зарядної станції.

Практичне значення роботи. Отримані результати моделювання можна використовувати для подальшого раціонального вибору методу оптимізації роботи зарядних станцій електромобілів постійним струмом з метою мінімізації вартості первинної енергії для агрегатора.

Апробація результатів роботи: Результати магістерської дисертації були оприлюднені на IX Міжнародній науково-практичній та навчально-методичній конференції «Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку – PEMS’23».

Публікації:

1) Lavrenova Y.R., Denysiuk S.P. “Optimization of power dispatching schedule of a charging station based on a micro grid with a photovoltaic module”. Applied Aspects of Information Technology. 2023; Vol. 6, No. 4: 391–403. DOI:<https://doi.org/10.15276/aait.06.2023.26>.

2) Лавренова Є.Р., Денисюк С.П. Стратегії менеджменту попиту на енергію для зарядних станцій електромобілів // Збірник наук. праць IX міжнар. наук.-техн. та навч.-метод. конф. "Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку –PEMS’2023". [Київ, 22-24 листопада 2023 р.]

3) Лавренова Є.Р., Денисюк С.П. Математичні методи оптимізації роботи зарядних станції електромобілів // Збірник наук. праць ІХ міжнар. наук.-техн. та навч.-метод. конф. "Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку –REMS'2023". [Київ, 22-24 листопада 2023 р.]

Ключові слова: СТАНЦІЯ ЗАРЯДКИ ПОСТІЙНИМ СТРУМОМ, ЕЛЕКТРОМОБІЛЬ, МІКРОМЕРЕЖА, СОНЯЧНА ГЕНЕРАЦІЯ, ОПТИМІЗАЦІЯ.

ABSTRACT

Structure and scope of the work: the master's thesis is set out on 115 pages. It consists of an introduction, 4 chapters, conclusion and appendix A. Contains 38 figures, 15 tables, 24 formulas. The list of references includes 80 bibliographic items according to the list of references.

Relevance of the topic. The expansion of electric vehicles is the main direction of development of the automotive industry worldwide. They have zero emissions and low noise levels, making them an ideal solution to address environmental issues and the shortage of fossil fuels. One of the obstacles to the spread of electric vehicles is the lack of charging infrastructure and the time it takes to charge them.

The primary resource of electricity is also an environmental component of electric vehicles. To support the idea of zero tolerance for greenhouse gas emissions, the best solution is to build charging stations based on microgrids with renewable energy sources. Photovoltaic systems can be installed on carports or on the rooftops of buildings, connected to a charging station, which in turn can operate in island mode or in grid-connected mode. Due to the intermittency of renewable energy sources, it is necessary to connect the station to the public power grid to ensure stable operation of the station, even during periods of low solar generation.

Provided that electric vehicles are charged with green energy, the market for electric vehicles will be encouraged, as the use of electric vehicles will help minimize the environmental impact of transportation.

A random or uncoordinated approach to charging electric vehicles has a negative impact on the distribution network, including an increase in real electricity losses, changes in the grid voltage, and excessive load on the grid. Therefore, the operation of the station is controlled by the relevant authority - the aggregator. An aggregator is an interacting body between customers - owners of electric vehicles and the distribution network operator, which optimally meets the customers' charging requirements without compromising network restrictions.

Control over the station's operation can be centralized or distributed. Both approaches pursue one or more objectives, including minimizing costs; minimizing power losses; voltage stability; reducing peak load; reducing long queues at charging stations; and reducing line, grid and transformer overload.

The charging station aggregator can also benefit by participating in the energy market and selling excess energy to the grid through the PV to Grid (PV2G) concept. Using the available data on load demand, photovoltaic power, and storage capacity available at the charging station, the optimal charging station algorithm can be calculated to maximize profits.

The purpose of this work is to generate a schedule for distributing the power of a charging station based on a microgrid with a photovoltaic module in such a way as to minimize the cost of primary energy for the charging station aggregator.

Object of research: the process of dispatching the generation, accumulation and purchase/sale of electricity at a DC charging station for electric vehicles.

Subject of research: optimization of the processes of dispatching the generation, accumulation and purchase/sale of electricity for a DC charging station for electric vehicles based on a microgrid with a photovoltaic module, a storage system and a connection to the public grid.

Research methods: This study was conducted using a modern method of computational mathematics - mixed integer linear programming with an interior-point solver. The Jupyter Notebook software environment and the GEKKO library for optimization problems in the Python programming language were used to calculate the objective function and model the charging station operation.

Scientific novelty of the research results. Comprehensive studies of electric vehicle charging stations, their components, types of charging processes, and charging levels have been conducted. The world experience in the development of charging stations based on Microgrid and the integration of RES into them was analyzed. Conclusions are drawn on the promising directions of

charging infrastructure development in Ukraine and the possibility of efficient use of energy resources.

The effectiveness of using the method of integer mixed linear programming with an interior-point solver to optimize the operation of a DC charging station is confirmed. For four experimental variants of the station's operation, optimal solutions were found that minimize the cost of primary energy for the charging station aggregator.

Practical significance of the work. The obtained modeling results can be used for further rational selection of a method for optimizing the operation of electric vehicle charging stations with direct current in order to minimize the cost of primary energy for the aggregator.

Validation of work results: The results of the master's thesis were presented at the IX International Scientific, Practical and Educational Conference "Energy Management: State and Prospects of Development - PEMS'23".

Publications:

1) Lavrenova Y.R., Denysiuk S.P. "Optimization of power dispatching schedule of a charging station based on a micro grid with a photovoltaic module". Applied Aspects of Information Technology. 2023; Vol. 6, No. 4: 391–403. DOI:<https://doi.org/10.15276/aait.06.2023.26>.

2) Lavrenova Y.R., Denysiuk S.P. Energy demand management strategies for electric vehicle charging stations // Proceedings of the IX International Scientific, Technical and Educational Conference "Energy Management: State and Prospects of Development - PEMS'2023" [Kyiv, November 22-24, 2023].

3) Lavrenova Y.R., Denysiuk S.P. Mathematical methods for optimizing the operation of electric vehicle charging stations // Proceedings of the IX International Scientific, Technical and Educational Conference "Energy Management: State and Prospects of Development - PEMS'2023" [Kyiv, November 22-24, 2023].

Key words: DC CHARGING STATION, ELECTRIC VEHICLE, MICROGRID, SOLAR GENERATION, OPTIMIZATION.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	13
ВСТУП	14
1. ОСОБЛИВОСТІ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ ТА ЇХ ЗАРЯДЖАННЯ	18
1.1 Електрообільність	18
1.2 Типи процесу зарядки	25
1.2.1 Кондуктивний заряд	26
1.2.2 Індуктивний заряд	28
1.2.3 Заміна акумулятора	30
1.3 Типи зарядних станцій	32
1.4 Рівні заряджання	33
1.4.1 Зарядка рівня 1	33
1.4.2 Зарядка рівня 2	33
1.4.3 Зарядка рівня 3	33
1.5 Архітектура зарядної станції на основі мікромережі	34
1.6 Фотоелектричні зарядні станції	38
Висновки за розділом 1	39
2. АНАЛІЗ ПІДХОДІВ ДО УПРАВЛІННЯ НАВАНТАЖЕННЯМ ГРОМАДСЬКИХ ЗАРЯДНИХ СТАНЦІЙ	41
2.1 Зарядна інфраструктура	45
2.2 Ходові характеристики та профілі зарядної потужності	48
2.3 Скоординована система заряджання електромобілів	49
2.4 Математичні методи оптимізації роботи зарядних станцій електромобілів	57
Висновки за розділом 2	62
3. ОПТИМІЗАЦІЯ РОБОТИ ЗАРЯДНОЇ СТАНЦІЇ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ	63
3.1 Характеристики зарядної станції постійного струму	63
3.2 Оптимізаційна модель	74

	12
3.3 Практичне вирішення задачі оптимізації для планування зарядки електромобілів	77
Висновки за розділом 3	89
4. СТАРТАП-ПРОЄКТ	90
4.1 Інформаційна карта стартап-проекту	90
4.2 Бізнес-модель стартапу	91
4.3 Технологічна здійсненність ідеї стартапу	93
4.4 Аналіз потенціалу ринку продукту стартапу	94
4.5 Організаційний план реалізації стартапу	98
Висновки за розділом 4	100
ВИСНОВКИ	101
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	103
ДОДАТОК А. ЛІСТИНГ ПРОГРАМНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ ОПТИМІЗАЦІЇ	113

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

EV (electric vehicle) - електромобіль

CS (charging station) - зарядна станція

PV (Photovoltaic) - фотоелектричні панелі

PV2G - PV to Grid

BEV (battery electric vehicle) - акумуляторний електромобіль

PHEV (plug-in hybrid electric vehicle) - гібридні електромобілі

IEA (International Energy Agency) - Міжнародна енергетична агенція

DOD (Depth of discharge) - рівень глибини розряду

MPPT (Maximum Power Point Tracking) - відстеження точки максимальної потужності

PVCS (photovoltaic charging station) - зарядна станція з фотоелектричним модулем

DG (Distributed Generator) - розподілений генератор

SSCA (Supply Side Control Action) - програма управління постачанням

DSCA (Demand Side Control Action) - програма управління попитом

DSM (Demand-Side Management) - керування попитом на енергію

DR (Demand Respons) - реагування на попит

TOU - time-of-use

RTP - real time pricing

SOC (state of charge) - рівень заряду

ВДЕ - відновлювані джерела енергії

ДВЗ - двигун внутрішнього згорання

РДН - ринок «на добу наперед»

ВСТУП

Поширення електромобілів (EV) є основним напрямком розвитку автомобільної галузі в усьому світі. EV мають нульові викиди та низький рівень шуму, тому вони є ідеальним рішенням для боротьби з проблемами екології та нестачі викопного палива. Однією із перепон розповсюдження електромобілів є нестача зарядної інфраструктури та час заряджання.

Екологічним аспектом електромобілів також є первинний ресурс електроенергії. Для підтримки ідеї нульової толерантності до викидів парникових газів найкращим рішенням є розбудова зарядних станцій (charging station, CS) на основі мікромереж (microgrid, MG) із відновлюваними джерелами енергії. Фотоелектричні системи можуть бути встановлені на навісах для паркування автомобілів - карпортах або на дахах будівель підключені до зарядної станції, яка в свою чергу може працювати в острівному режимі або в режимі підключення до мережі. Якщо електромобілі будуть заряджатися зеленою енергією ринок електромобілів буде заохочуватися, оскільки електромобілі сприятимуть мінімізації впливу транспорту на навколишнє середовище. Через переривчастість відновлюваних джерел енергії стабільну роботу CS забезпечують архітектурою MG з під'єднанням до громадської мережі.

Випадковий або неузгоджений підхід до заряджання електромобілів негативно впливає на розподільчу мережу, включаючи приріст реальних втрат електроенергії, зміну напруги в мережі, надмірне навантаження на мережу. У будь-якій системі керування діяльність з нарахування плати забезпечує агент, який називається агрегатором. Агрегатор — це взаємодіючий орган між клієнтами власниками електромобілів та оператором розподільчої мережі, який оптимально задовольняє вимоги клієнтів щодо зарядки без шкоди для мережевих обмежень. Залучення агрегатора дає можливість споживачам зв'язатися з ринком електроенергії та захищає їхні фінансові інтереси. Подібним чином агрегатор однаково працює для мережевих операторів, щоб оптимізувати продуктивність їх мережі. Окрім

керування процесом заряджання електромобілів, агрегатор також сприяє підтримці напруги та частоти, балансуванню навантаження та зменшенню втрат електроенергії, керуючи роботою розряджання акумуляторів електромобілів. Робота, тобто зарядка/розрядка, контролюється централізовано або розподілено. Ці підходи переслідують одну, або кілька цілей, серед яких мінімізація витрат; мінімізація втрат потужності; стабільність напруги; зниження пікового навантаження; скорочення довгих черг на зарядних станціях; а також зменшення перевантаження лінії, мережі та трансформатора.

Агрегатор зарядної станції також може отримувати вигоду, беручи участь в енергетичному ринку і продаючи надлишкову енергію назад в мережу за допомогою концепції PV to Grid (PV2G). Використовуючи наявні дані щодо попиту на навантаження, фотоелектричної потужності та потужності накопичувача, доступної на зарядній станції, можна розрахувати оптимальний алгоритм роботи зарядної станції, максимізуючи прибуток.

Метою даної роботи є формування графіку розподілу потужностей зарядної станції на основі мікромережі з фотоелектричним модулем таким чином, щоб мінімізувати вартість первинної енергії для зарядної станції.

Для досягнення зазначеної мети дослідження було виконано наступні задачі:

- 1) Проаналізовано ринки електромобілів та зарядні станції: компоненти, типи процесу зарядки, рівні заряджання;
- 2) Виконано аналіз архітектур зарядних станцій на основі Microgrid з інтегрованими ВДЕ;
- 3) Досліджено світовий досвід систем енергетичного менеджменту громадських зарядних станцій;
- 4) Змодельовано та оптимізовано систему зарядної станції електромобілів постійним струмом на основі мікромережі;
- 5) Розроблено стартап проєкт.

Об’єкт дослідження: процес диспетчеризації генерації, акумулювання та купівлі/продажу електричної енергії на зарядній станції електромобілів постійним струмом.

Предмет дослідження: оптимізація процесів диспетчеризації генерації, акумулювання та купівлі/продажу електричної енергії для зарядної станції електромобілів постійним струмом на основі мікромережі з фотоелектричним модулем, системою накопичення та підключенням до громадської мережі.

Методи дослідження: Дане дослідження було проведено з використанням сучасного методу обчислювальної математики - цілочисельного змішаного лінійного програмування з розв’язувачем *interior-point solver*. Для обчислення цільової функції і моделювання роботи зарядної станції використано програмне середовище *Jupyter Notebook*, бібліотеку для задач оптимізації *GEKKO* на мові програмування *Python*.

Наукова новизна результатів дослідження. Проведено комплексні дослідження зарядних станцій електромобілів, їх компоненти, типи процесу зарядки, рівні заряджання. Проаналізовано світовий досвід розбудови зарядних станцій на основі *Microgrid* та інтеграція в них ВДЕ. Зроблено висновки щодо перспективних напрямів розвитку зарядної інфраструктури в Україні та можливості ефективного використання енергоресурсів.

Підтверджено ефективність використання методу цілочисельного змішаного лінійного програмування з розв’язувачем *interior-point solver* для оптимізації роботи зарядної станції постійного струму. Для чотирьох експериментальних варіантів роботи станції було знайдено оптимальні рішення, які мінімізують вартість первинної енергії для агрегатора зарядної станції.

Практичне значення роботи. Отримані результати моделювання можна використовувати для подальшого раціонального вибору методу оптимізації роботи зарядних станцій електромобілів постійним струмом з метою мінімізації вартості первинної енергії для агрегатора.

Апробація результатів роботи: Результати магістерської дисертації були оприлюднені на IX Міжнародній науково-практичній та навчально-методичній конференції «Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку – PEMS’23».

Публікації:

1) Lavrenova Y.R., Denysiuk S.P. “Optimization of power dispatching schedule of a charging station based on a micro grid with a photovoltaic module”. *Applied Aspects of Information Technology*. 2023; Vol. 6, No. 4: 391–403. DOI:<https://doi.org/10.15276/aait.06.2023.26>.

2) Лавренова Є.Р., Денисюк С.П. Стратегії менеджменту попиту на енергію для зарядних станцій електромобілів // Збірник наук. праць IX міжнар. наук.-техн. та навч.-метод. конф. "Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку –PEMS’2023". [Київ, 22-24 листопада 2023 р.]

3) Лавренова Є.Р., Денисюк С.П. Математичні методи оптимізації роботи зарядних станції електромобілів // Збірник наук. праць IX міжнар. наук.-техн. та навч.-метод. конф. "Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку –PEMS’2023". [Київ, 22-24 листопада 2023 р.]

Ключові слова: СТАНЦІЯ ЗАРЯДКИ ПОСТІЙНИМ СТРУМОМ, ЕЛЕКТРОМОБІЛЬ, МІКРОМЕРЕЖА, СОНЯЧНА ГЕНЕРАЦІЯ, ОПТИМІЗАЦІЯ.

1. ОСОБЛИВОСТІ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ ТА ЇХ ЗАРЯДЖАННЯ

Враховуючи зростаюче занепокоєння щодо глобального потепління та забруднення, спричиненого електростанціями, що працюють на викопному паливі, відновлювані джерела енергії пропонують життєздатне рішення для зменшення викидів вуглецю та викидів парникових газів. Крім того, енергетичний перехід стимулює розширення використання відновлюваних джерел енергії. Однак інтеграція цих джерел в існуючу електричну мережу може призвести до створення структурно складнішої системи, що спрямовано на забезпечення надійності та якості. Таким чином, з'являється поняття мікромережі (Microgrid, MG), яка залежить від відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), систем зберігання, навантаження та підключення до загальної мережі. Ця концепція має потенціал для вирішення цих проблем шляхом збалансованого виробництва та споживання енергії. Впровадження MG може принести переваги для кінцевих користувачів, включаючи зниження витрат на електроенергію, зниження витрат на передачу та розподіл, а також зменшення втрат енергії на довгих лініях електропередачі.

Автомобільні перевезення використовують значну частку нафтових і газових ресурсів, що спричиняє викиди вуглецю та забруднює навколишнє середовище. Для обмеження використання викопного палива та зменшення викидів CO₂ було розроблено альтернативне рішення: акумуляторний електромобіль (battery electric vehicle, BEV) [1]. Крім того, завдяки розвитку MG електромобільність, пов'язана з появою електромобілів у містах, більше не ускладнюватиме енергосистему, у вигляді незбалансованого навантаження, а натомість передбачатиме надання послуг гнучкості.

1.1 Електромобільність

Згідно з останнім звітом Міжнародної енергетичної агенції (International Energy Agency, IEA) Global EV Outlook 2023 [2] ринки електромобілів спостерігають експоненціальне зростання, оскільки продажі перевищили 10

мільйонів у 2022 році. Загалом 14% усіх проданих нових автомобілів були електричними у 2022 році, порівняно з приблизно 9% у 2021 році та менше ніж 5% у 2020 році. Три ринки домінували у світових продажах. Лідером знову став Китай, на який припадає близько 60% світових продажів електромобілів. Більше половини електромобілів на дорогах у всьому світі зараз знаходяться в Китаї, і країна вже перевищила цільовий показник 2025 року з продажу нових автомобілів на електроенергії. У Європі, другому за величиною ринку, у 2022 році продажі електромобілів зросли більш ніж на 15%, тобто більше ніж кожна п'ята продана машина була електричною. Продажі електромобілів у Сполучених Штатах, третьому за величиною ринку, зросли на 55% у 2022 році, досягнувши частки продажів у 8%.

Очікується, що активні продажі електромобілів триватимуть упродовж 2023 року. У першому кварталі було продано понад 2,3 мільйона електромобілів, що приблизно на 25% більше, ніж за аналогічний період минулого року. Наразі очікується 14 мільйонів продажів до кінця 2023 року, що становить 35% зростання порівняно з минулим роком із прискоренням нових закупівель у другій половині цього року. У результаті на електромобілі може припадати 18% від загального обсягу продажів автомобілів за весь календарний рік. Національна політика та стимули допоможуть підвищити продажі, тоді як повернення до надзвичайно високих цін на нафту, які спостерігалися минулого року, може додатково мотивувати потенційних покупців.

Багатообіцяючим є прогноз для ринків електромобілів, що розвиваються. За межами основних ринків продажі електромобілів зазвичай низькі, але 2022 рік був роком зростання в Індії, Таїланді та Індонезії. Загалом продажі електромобілів у цих країнах зросли більш ніж утричі порівняно з 2021 роком і досягли 80 000. У Таїланді частка електромобілів у загальному обсязі продажів у 2022 році становила трохи більше 3%, тоді як в Індії та Індонезії в середньому вона становила близько 1,5% минулого року. В Індії набирає обертів виробництво електромобілів і компонентів за підтримки урядової

програми стимулювання вартістю 3,2 мільярда доларів США, яка залучила інвестиції на загальну суму 8,3 мільярда доларів США. Таїланд та Індонезія також зміцнюють свою політику підтримки виробників, потенційно надаючи цінний досвід для інших країн з ринковою економікою, що розвивається, які прагнуть сприяти впровадженню електромобілів.

Як повідомляє Федерація автопрому України на основі даних МВС, у червні було зареєстровано рекордну кількість легкових автомобілів з електричним приводом – 3155 одиниць. Це вперше щомісячні реєстрації перевищили позначку у 3 тисячі електромобілів. Це втричі більше, ніж рік тому. І на 23,6% більше за результати травня. Загалом за перше півріччя було зареєстровано 12672 легкових електромобілів, що втричі більше за аналогічний період минулого року [3].

Ринкові тенденції та політичні зусилля на основних автомобільних ринках сприяють перспективі росту продажів електромобілів. Відповідно до сценарію визначеної політики MEA (STEPS), глобальний прогноз частки продажів електромобілів на основі існуючої політики та цілей компанії зріс до 35% у 2030 році порівняно з менш ніж 25% у попередньому прогнозі. Згідно з прогнозами, Китай збереже позицію найбільшого ринку для електромобілів з 40% від загального обсягу продажів до 2030 року в STEPS. Сполучені Штати подвоюють свою частку ринку до 20% до кінця десятиліття завдяки нещодавнім оголошенням про політику, що стимулює попит, тоді як Європа зберігає свою поточну частку в 25%.

Прогнозований попит на електромобілі на основних автомобільних ринках матиме серйозні наслідки для енергетичних ринків і кліматичних цілей у поточному політичному середовищі. Виходячи з існуючої політики, прогнозується, що пік попиту на нафту з боку автомобільного транспорту буде досягнуто приблизно в 2025 році, згідно STEPS (IEA Stated Policies Scenario), а кількість нафти, що витісняється електромобілями, перевищить 5 мільйонів барелів на день у 2030 році. За прогнозами STEPS у 2030 році

використання електромобілів дозволить уникнути викидів у розмірі 700 млн. тонн CO₂-екв.

Виробництво акумуляторів продовжує розширюватися завдяки перспективам розвитку електромобілів. Станом на березень 2023 року заяв щодо потужностей з виробництва акумуляторів, які будуть створені до 2030 року, більш ніж достатньо, щоб задовольнити попит, передбачений урядом, і навіть зможе покрити попит на електромобілі за сценарієм чистих нульових викидів (Net Zero Emissions by 2050 Scenario) до 2050 року. Тому цілком можливо, що для електромобілів можна досягти більшої частки продажів, ніж очікується на основі поточної урядової політики та національних цілей.

У 2022 році продажі електромобілів знову стали рекордними, незважаючи на перебої в ланцюзі поставок, макроекономічну та геополітичну невизначеність, а також високі ціни на сировину та енергоносії. Зростання продажів електромобілів відбулося в контексті глобального скорочення автомобільних ринків: загальний обсяг продажів автомобілів у 2022 році впав на 3% порівняно з 2021 роком. Продажі електромобілів, включаючи електромобілі на акумуляторах (BEV) і гібридні електромобілі (PHEV) минулого року перевищили 10 мільйонів, що на 55% більше, ніж у 2021 році. Ця цифра – 10 мільйонів продажів електромобілів у всьому світі – перевищує загальну кількість автомобілів, проданих у всьому Європейському Союзі (близько 9,5 мільйонів автомобілів), і становить майже половину від загальної кількості автомобілів, проданих у Китаї у 2022 році. Лише за п'ять років, з 2017 по 2022 рік, продажі електромобілів підскочили з приблизно 1 мільйона до понад 10 мільйонів. Раніше потрібно було п'ять років з 2012 по 2017 рік, щоб продажі електромобілів зросли зі 100 000 до 1 мільйона, що підкреслює експоненціальний характер зростання продажів електромобілів. Частка електромобілів у загальному обсязі продажів автомобілів підскочила з 9% у 2021 році до 14% у 2022 році, що більш ніж у 10 разів перевищує їх частку у 2017 році.

Збільшення продажів збільшило загальну кількість електромобілів на дорогах світу до 26 мільйонів, що на 60% більше, ніж у 2021 році, причому на BEV припадає понад 70% загального річного зростання, як і в попередні роки. У результаті близько 70% світового запасу електромобілів у 2022 році становили BEV. Збільшення продажів з 2021 по 2022 рік було таким же високим, як і з 2020 по 2021 рік в абсолютному вираженні – на 3,5 мільйона, але відносне зростання було нижчим (продажі подвоїлися з 2020 по 2021 рік). Винятковий бум у 2021 році можна пояснити тим, що ринки електромобілів наздоганяють відставання після пандемії коронавірусу (COVID-19). Порівняно з останніми роками (рис 1.1) річний темп зростання продажів електромобілів у 2022 році був подібним до середнього показника за 2015-2018 роки, а річний темп зростання світового запасу електромобілів у 2022 році був подібним до показника 2021 року та пізніше. період 2015-2018 рр., демонструючи надійне відновлення розширення ринку електромобілів до допандемічного темпу.

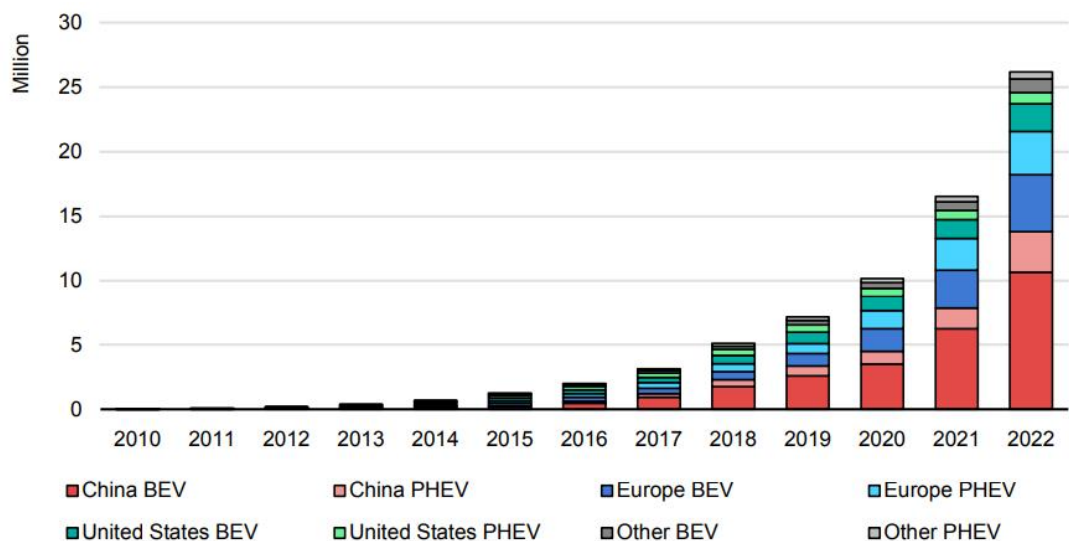


Рисунок 1.1 - Ринок електромобілів в обраних регіонах, 2010-2022 р.

У Європі продажі електромобілів у 2022 році зросли більш ніж на 15% порівняно з 2021 роком і досягли 2,7 мільйона. У попередні роки продажі зростали швидше: річне зростання становило понад 65% у 2021 році та в

середньому 40% у 2017-2019 роках. У 2022 році продажі BEV зросли на 30% порівняно з 2021 роком (порівняно зі зростанням на 65% у 2021 році порівняно з 2020 роком), тоді як продажі PHEV впали приблизно на 3%. На Європу припало 10% світового зростання продажів нових електромобілів. Незважаючи на уповільнення зростання у 2022 році, продажі електромобілів у Європі все ще збільшуються в умовах тривалого скорочення автомобільних ринків: загальний обсяг продажів автомобілів у Європі впав на 3% у 2022 році порівняно з 2021 роком.

Уповільнення, яке спостерігається в Європі порівняно з попередніми роками, було частково відображенням виняткового зростання продажів електромобілів, яке відбулося в 2020 і 2021 роках в Європейському Союзі, оскільки виробники швидко скоригували корпоративну стратегію відповідно до прийнятих стандартів викидів CO₂. у 2019 р. Ці стандарти охоплювали період 2020–2024 рр., а загальноєвропейські цілі щодо викидів стануть суворішими лише з 2025 та 2030 років.

Високі ціни на енергоносії у 2022 році мали різний вплив на конкурентоспроможність електромобілів порівняно з автомобілями з двигуном внутрішнього згоряння (ДВЗ). Підскочили ціни на бензин і дизельне паливо для автомобілів з ДВЗ, але в деяких випадках також зросли тарифи на електроенергію для населення. Більш високі ціни на електроенергію та газ також підвищили витрати на виробництво автомобілів із двигуном внутрішнього згоряння та електромобілів, причому деякі автовиробники стверджують, що високі ціни на енергоносії можуть обмежити майбутні інвестиції у нові потужності з виробництва акумуляторів.

У 2022 році Європа залишалась другим за величиною ринком електромобілів у світі після Китаю, на неї припадало 25% усіх продажів електромобілів і 30% світових запасів. Частка продажів електромобілів досягла 21%, збільшившись з 18% у 2021 році, 10% у 2020 році та менше 3% до 2019 року. Європейські країни продовжують займати високі позиції за часткою продажів електромобілів (рис 1.2), на чолі з Норвегією (88%).

Швеція – 54%, Нідерланди – 35%, Німеччина – 31%, Сполучене Королівство – 23% і Франція – 21% у 2022 році. За обсягом Німеччина є найбільшим ринком у Європі з продажами 830 000 у 2022 році. Великобританія з 370 000 і Франція з 330 000. Продажі також перевищили 80 000 в Іспанії. Частка електромобілів у загальному обсязі продажів автомобілів у Німеччині зростає в десять разів з часів до пандемії Covid-19, що частково можна пояснити збільшенням підтримки після пандемії, як-от стимулювання купівлі через Umweltbonus, а також збільшенням продажів у 2022 році в очікуванні подальшого скорочення субсидій на купівлю електромобілів з 2023 року. Однак в Італії продажі електромобілів скоротилися зі 140 000 у 2021 році до 115 000 у 2022 році, а також вони зменшилися або залишилися на попередньому рівні в Австрії, Данії та Фінляндії.

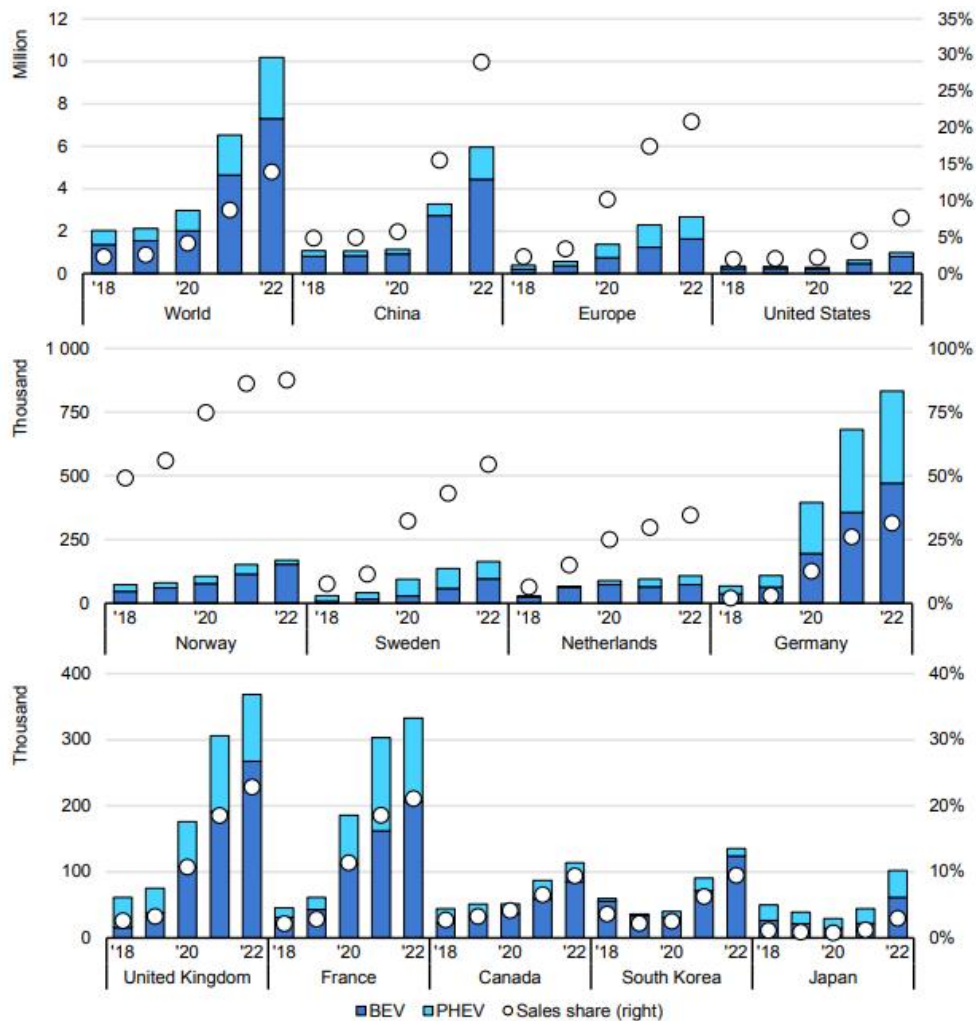


Рисунок 1.2 - Реєстрація та продажі електромобілів в обраних країнах, 2018-2022 рр.

Кількість електроавтомобілів в Україні теж зростає (рис 1.3). За даними Опендатабот [4] за півроку поточного року було ввезено 12844 електрокарів. Це майже стільки ж, як за весь минулий рік та у півтора рази більше, аніж за весь 2021. Так, якщо у 2021 році в країну завезли 8867 електроавто, й це складало лише 1,3% від загальної кількості імпортованих машин, ще торік це було 2,5% або 13722 електроавтівки. Лише за півроку 2023 в країну вже потрапили 12844 електрокарів — це 7,2% від загальної кількості імпортованих машин. Важливо, що частка електромобілів росте на тлі зменшення загальної кількості ввезених в Україну автівок. Так, в 2021 році було зареєстровано 673 859 транспортних засобів, ввезених з-за кордону, торік — 554 103, а з січня по червень включно поточного року — 178 075.

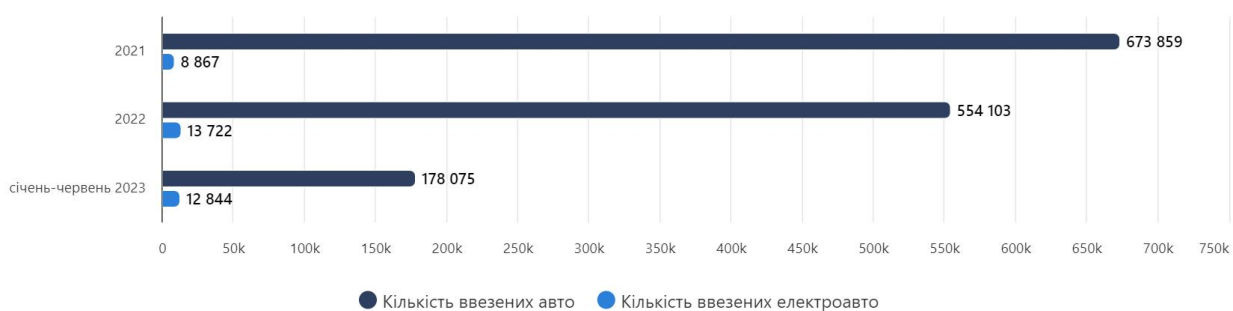


Рисунок 1.3 - Кількість зареєстрованих електроавто в Україні, 2021-перше півріччя 2023 р.

1.2 Типи процесу зарядки

Існує три поширених способи зарядки електромобіля [5]:

- кондуктивний заряд - змінним і постійним струмом;
- індуктивний заряд - статичний і динамічний;
- технологія заміни батарей.

Фізично розташування компонентів для перетворення електроенергії, що подається мережею, на енергію, необхідну акумулятору автомобіля, можна класифікувати як бортові та зовнішні зарядні пристрої. Бортові зарядні пристрої розташовані в автомобілі, а розмір і номінальна потужність

обмежені наявним простором всередині автомобіля. Зовнішні зарядні пристрої розташовані поза транспортним засобом, і це налаштування забезпечує більшу гнучкість щодо потужності, яку можна надати. Обидва класи зарядних пристроїв повинні містити схеми керування та обмінюватись інформацією з акумулятором автомобіля в режимі реального часу. Це робиться для того, щоб акумулятор заряджався оптимальним чином, уникаючи будь-якого пошкодження акумулятора через перезарядження. Для заряджання змінним струмом використовується вбудований зарядний пристрій, тоді як для постійного струму та заміни батареї використовується зовнішній зарядний пристрій. У випадку індуктивного зарядного пристрою потрібна комбінація як бортового, так і зовнішнього зарядного пристрою.

1.2.1 Кондуктивний заряд. Зараз це найпоширеніший спосіб заряджання, і він має 2 категорії заряджання: змінним струмом (рис 1.4) і постійним струмом (рис 1.5).

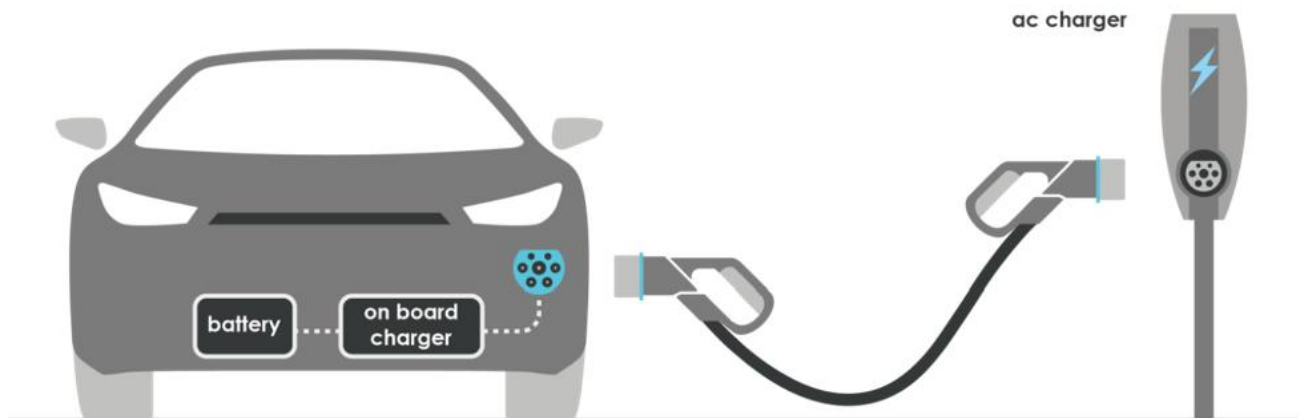


Рисунок 1.4 - Кондуктивний заряд змінним струмом

Перевагами кондуктивного заряду є:

1. Акумулятор можна заряджати будь-де за допомогою мережі змінного струму та бортового зарядного пристрою EV;
2. Зарядний пристрій для електромобілів може легко спілкуватися із системою керування батареями (Battery Management Systems, BMS), і в зарядному пристрої для електромобілів не потрібні додаткові електронні

перетворювачі. Це призводить до підвищення продуктивності та зниження вартості.

Серед недоліків можна відзначити:

1. Електроживлення змінного струму має перетворюватися на постійний струм в автомобілі, і існує обмеження вихідної потужності для заряджання змінним струмом через обмеження розміру та ваги бортового зарядного пристрою.

2. Заряджання змінним струмом потребує відносно тривалого часу через відносно нижчу потужність заряджання.

Заряджання постійним струмом підходить для зарядки електромобілів великої потужності, а вихідна потужність швидких зарядок обмежена лише здатністю акумуляторів сприймати потужність заряджання.

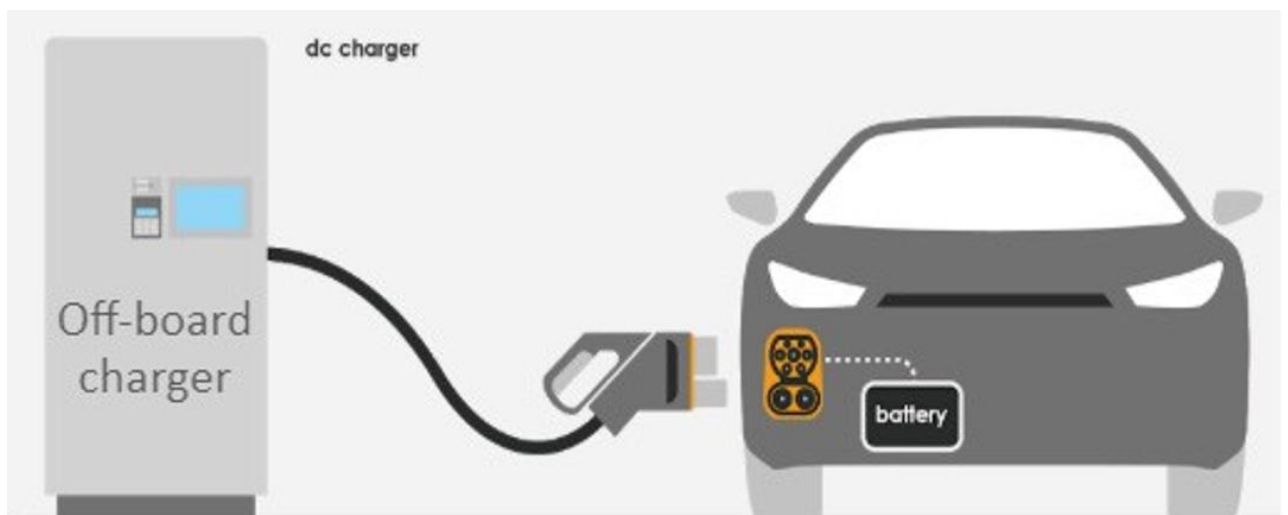


Рисунок 1.5 - Кондуктивний заряд постійним струмом

Перевагами кондуктивного заряду постійним струмом є:

1. Він може бути налаштований на високу або низьку швидкість заряджання, і не має обмежень у своїй вазі та розмірі.

2. Заряджання постійного струму з високою потужністю вимагає малого часу заряджання.

Серед недоліків можна відзначити:

3. Вищі інвестиції для встановлення зарядного пристрою порівняно з заряджанням змінним струмом.

4. Неприятливий вплив на енергосистему: висока потреба електроенергії в мережі, особливо. в години пік

5. Оскільки зовнішні зарядні пристрої та BMS фізично розділені, надійний зв'язок важливий для забезпечення правильних умов заряджання.

1.2.2 Індуктивний заряд. Розрізняють статичний (рис. 1.6) та динамічний (рис 1.7).

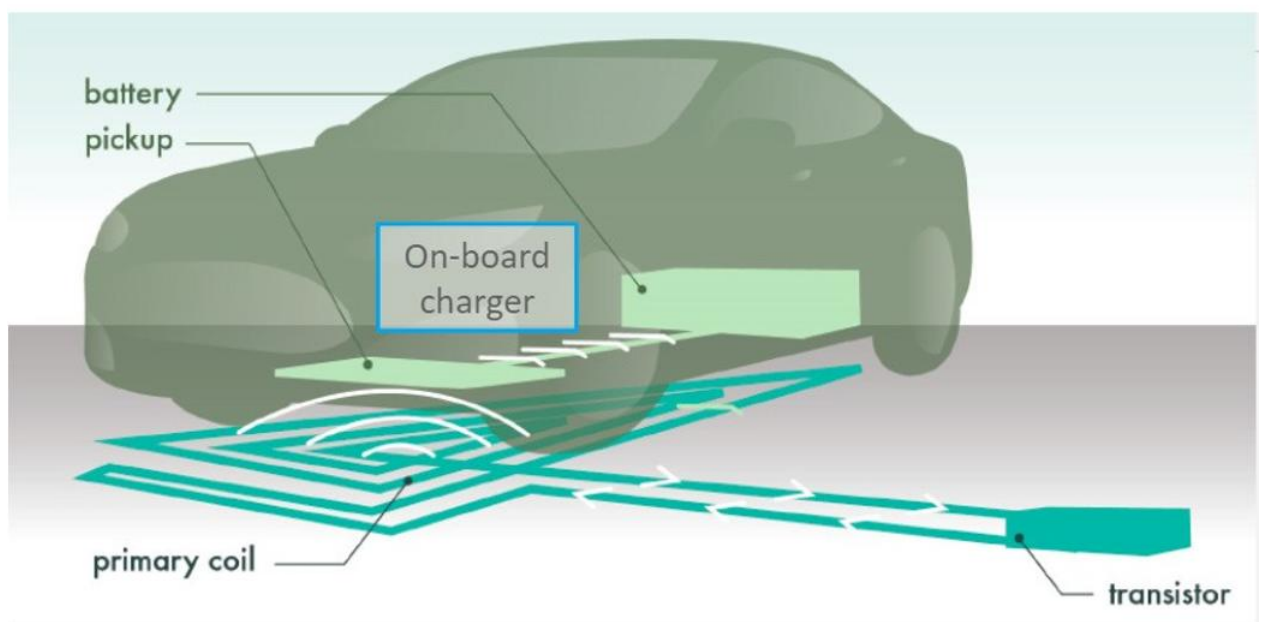


Рисунок 1.6 - Статичний індуктивний заряд

Основна ідея індуктивного заряджання полягає у використанні двох електромагнітно пов'язаних котушок. Первинна котушка розміщена на поверхні дороги, у вигляді колодки, підключеної до електричної мережі. Вторинна котушка розміщується на транспортному засобі, в ідеалі внизу або вгорі автомобіля. Змінний струм частотою 50 Гц від мережі випрямляється в постійний, а потім перетворюється на високочастотний змінний струм у зовнішній зарядній станції. Потім ця високочастотна потужність передається на сторону EV за допомогою електромагнітної індукції. Котушки на автомобілі перетворюють цю високочастотну енергію змінного струму назад

у постійний для зарядки електромобіля за допомогою бортового зарядного пристрою.

Перевагами цього методу є:

1. Зручність
2. Підходить для самокерованих автомобілів

Серед недоліків можна відзначити:

1. Високі інвестиції
2. Обмежений простір і вага зарядних панелей
3. Допустима несумісність між транспортним засобом і зарядним майданчиком
4. Втрати потужності та відносно нижча ефективність, ніж провідна зарядка
5. Вплив електромагнітного випромінювання

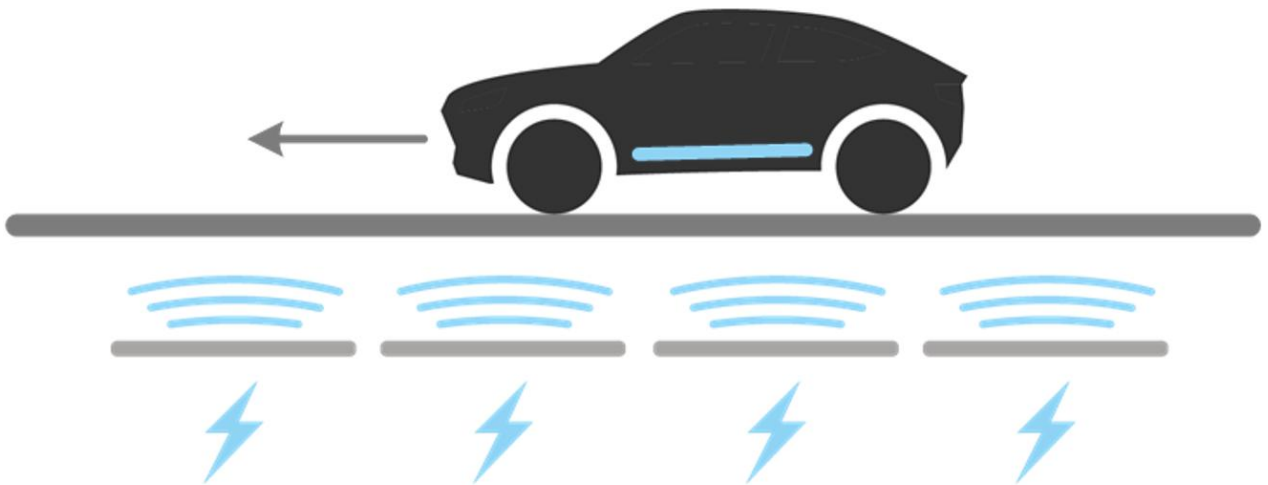


Рисунок 1.7 - Динамічний індуктивний заряд

Інший спосіб бездротової зарядки автомобіля називається динамічною зарядкою. Котушки, підключені до електричних кабелів, які раніше забезпечували живлення, приховані в дорозі. Котушки випромінюють електромагнітне поле, яке сприймається транспортними засобами, що проїжджають по них, і перетворюється на електричну енергію для зарядки автомобілів.

Переваги:

1. Низький час зарядки в режимі очікування
2. Низький рівень глибини розряду, DOD
3. Менший розмір батареї

Поки що динамічна індукційна зарядка все ще знаходиться на експериментальній стадії, тому що існує багато проблем для її стандартизації.

Виклики:

1. Висока вартість інвестицій
2. Сторонні предмети, зміни структури котушки та зміщення котушки на дорозі
3. Застосовність різних типів автомобілів і універсальний вибір типу котушки

1.2.3 Заміна акумулятора. Третій спосіб зарядки електромобіля – це заміна акумулятора. Він працює на основі вилучення розрядженої батареї та заміни її на повну. Процес передбачає заїзд у відсік для перемикання акумуляторів, і автоматизований процес позиціонує автомобіль, вилучає поточний акумулятор і замінює його на повністю заряджений. Розряджені батареї заряджаються на станції для подальшого встановлення. Система працює на бізнес-концепції, згідно з якою користувач електромобіля володіє транспортним засобом, а не акумулятором. Для заміни батареї потрібен безпомилковий спосіб оцінки стану батареї, щоб перевірити схему її використання та переконатися, що лише авторизовані транспортні засоби та зарядні станції можуть заряджати її.

Перевагами цього методу є:

1. Відсутнє хвилювання щодо діапазону
2. Швидке та просте заправлення, як бак автомобіля з двигуном внутрішнього згорання
3. Довший час заряджання акумулятора EV порівняно зі швидким заряджанням постійним струмом

Основною проблемою цього методу є необхідність стандартизованого інтерфейсу батареї для багатьох виробників автомобілів.

З таблиці 1.1 можна побачити загальне порівняння за 5-ти бальною шкалою всіх методів живлення від батареї .

	Кондуктивна зарядка		Індуктивна зарядка		Заміна батареї
	Змінним струмом	Постійним струмом	Статична	Динамічна	
Зручність	1	1	2	3	2
Вартість	1	2	2-3	6	1
Час послуги	Відносно довго	Дуже швидко	Відносно довго	Дуже гнучко	Найшвидше
Потужність	2	4	1-2	2-3	1-3
Ефективність	4	3	2	1	4
Життєвий цикл батареї	3	2	3	5	1
Вплив на мережу	1-2	4	2	2-3	3
Виклики стандартизації	1	1	2	4	3

Можна помітити, що динамічна індукційна зарядка є найзручнішим, але й найдорожчим способом заряджання. Навіть якщо статична індуктивна зарядка дешевша порівняно з динамічною, середня вартість індукційної зарядки вища, ніж будь-який інший метод. Динамічна індукційна зарядка має найбільшу гнучкість, оскільки автомобіль можна заряджати в будь-який час, коли він у дорозі, і не потрібно зупинятися в пункті обслуговування.

Для всіх методів заряджання, окрім заміни батареї, час процесу заряджання сильно залежить від рівня потужності. У цьому випадку метод кондуктивної зарядки постійним струмом має найбільшу потужність серед усіх методів.

Є багато факторів, які впливають на ефективність, наприклад, кількість перетворювачів живлення та їх типи, потужність заряджання та способи заряджання. З таблиці 1 видно, що загалом кондуктивний метод заряджання має вищу загальну ефективність, ніж індукційний. Це тому, що процес перетворення електроенергії за допомогою повітряного зазору менш ефективний, ніж пряма передача електроенергії за допомогою кабелів. Крім

того, ефективність індуктивного заряджання знижується в результаті розбіжності між передавальною та приймальною зарядними площадками.

Термін служби батареї залежить від багатьох факторів, наприклад, потужності заряджання (C-rate) і глибини розряду (Depth of discharge, DOD). Термін служби батареї під час заряджання постійним струмом має найнижчий термін служби, оскільки потужність заряджання та відповідно C-rate є найвищими. Крім того, як правило, на станціях швидкої зарядки люди хочуть заряджати свої акумулятори здебільшого для далеких поїздок, збільшуючи глибину розряду. Навпаки, батареї, які працюють за допомогою динамічного індуктивного методу заряджання, мають найдовший термін служби, оскільки батареї можна заряджати/розряджати з невеликою DOD.

З точки зору впливу на мережу, спосіб заряджання постійним струмом має найбільший вплив, оскільки він має найвищий рівень потужності. Крім того, заміна батареї також може мати великий вплив на мережу, якщо потужність зарядки також висока.

Нарешті, враховуючи проблему стандартизації, динамічна індукційна зарядка та заміна акумулятора стикаються з найскладнішими проблемами. Це тому, що обидва методи вимагають стандартизації між типами автомобілів, розміром акумулятора, рівнем потужності та навіть формою.

1.3 Типи зарядних станцій

Існує два типи зарядних пристроїв для електромобілів [6]: бортовий зарядний пристрій, коли зарядний пристрій знаходиться всередині електромобіля, і зовнішній зарядний пристрій, коли зарядний пристрій знаходиться поза електромобілем, і його вага зменшена. Вбудована зарядка призначена для повільної зарядки, а електромобілі заряджаються від джерел змінного струму, тоді як зовнішня зарядка призначена для швидкої зарядки постійним струмом і можливості брати участь у V2G. Основним недоліком бортового зарядного пристрою є максимальна потужність заряджання, і він не пропонує можливості Vehicle-to-Grid; з іншого боку, зовнішній зарядний

пристрій стикається з проблемою нагрівання батареї, тому вартість зарядки є високою.

1.4 Рівні заряджання

Зарядні станції класифікуються на основі рівня напруги, який відповідає номінальній потужності, де рівень 1 і рівень 2 відповідають переважно бортовій зарядці, а рівень 3 відповідає зовнішній зарядці. Швидкість заряджання визначає час заряджання, вартість заряджання, зарядне обладнання та використання громадської мережі [7]. В таблиці 1.2 надано порівняння рівнів зарядки.

1.4.1 Зарядка рівня 1. Для заряджання рівня 1 використовується стандартна побутова розетка 120 В для підключення електромобіля для заряджання. Зарядку рівня 1 можна проводити вдома. Рівень 1 — це найповільніший спосіб зарядки електромобіля. Вона додає діапазону заряду від 3 до 5 миль на годину. Зарядка рівня 1 найкраще підходить для гібридних електромобілів (PHEV).

1.4.2 Зарядка рівня 2. Для зарядки рівня 2 потрібна спеціалізована станція, яка забезпечує живлення 240 В. Обладнання рівня 2 знаходиться в громадських місцях, але також можна встановити вдома. Рівень 2 може додати діапазону заряду від 12 до 40 миль на годину.

Зарядка рівня 2 зазвичай використовується для щоденного заряджання електромобілів, оскільки вона заряджається набагато швидше, ніж зарядка рівня 1.

1.4.3 Зарядка рівня 3. Зарядка третього рівня або швидка зарядка постійним струмом наразі є найшвидшим рішенням для зарядки, доступним на ринку електромобілів. Для заряджання рівня 3 використовується постійний струм (DC), на відміну від заряджання рівня 1 і 2, який використовує змінний струм (AC). Зазвичай він розрахований на 480 В. Зарядка рівня 3 доступна на спеціальних зарядних станціях для електромобілів. Вона заряджає акумулятор до 80% за 20-30 хвилин.

Таблиця 1.2 - Порівняння типів зарядки

Тип обладнання	Рівень зарядки	Напруга	Сила струму	Потужність	Тип зарядної станції
Однофазна АС	Рівень 1	120 В	13 А	1.9 кВт	Бортова
		240 В	13-16А	3 кВт	
Одно/трифазна АС	Рівень 2	208-240 В	80 А	20 кВт	
Трифазна/Комбо	Рівень 3	300-600 В	400 А макс	120-240 кВт	Зовнішня
DC	Рівень 1	200-500 В	< 80 А	40 кВт	
	Рівень 2	200-500 В	< 200 А	100 кВт	
	Рівень 3	200-600 В	< 400 А	240 кВт	

Зарядження постійним струмом є кращим за зарядженням змінним струмом, оскільки фотоелектричні та стаціонарні накопичувачі є джерелами постійного струму, потік енергії в електромобілях є постійним струмом, V2G простіше впроваджувати із зарядженням постійним струмом.

1.5 Архітектура зарядної станції на основі мікромережі

Зарядна станція на базі MG може мати три архітектури залежно від типу загальної шини [8], MG змінного струму, MG постійного струму та гібридного MG.

В архітектурі зарядної станції на основі АС MG, як показано на рис. 1.8, усі джерела та навантаження підключаються через свої спеціальні перетворювачі до загальної шини змінного струму. Фотоелектричні джерела підключені до інвертора постійного/змінного струму, включаючи відстеження точки максимальної потужності (Maximum Power Point Tracking, MPPT), стаціонарний накопичувач підключено до двонаправленого перетворювача постійного/змінного струму. У той час як вітрові турбіни підключаються до перетворювачів змінного/змінного струму, зарядні пристрої для електромобілів підключаються до інверторів змінного/постійного струму, а для підключення до мережі не потрібен інвертор, оскільки він може забезпечити більшу гнучкість для зарядки/розрядки стаціонарного сховища, але вимагає компенсації

потужності для вимірювання активної потужності в точці загального з'єднання. Ця архітектура дає можливість незалежного визначення розміру кожного компонента, а шляхом окремого керування реактивною та активною потужністю можна стабілізувати напругу шини. У разі несправності або виходу з ладу мережі, MG ізолюють шляхом вимкнення точки загального з'єднання на шині змінного струму та вона продовжує жити навантаження.

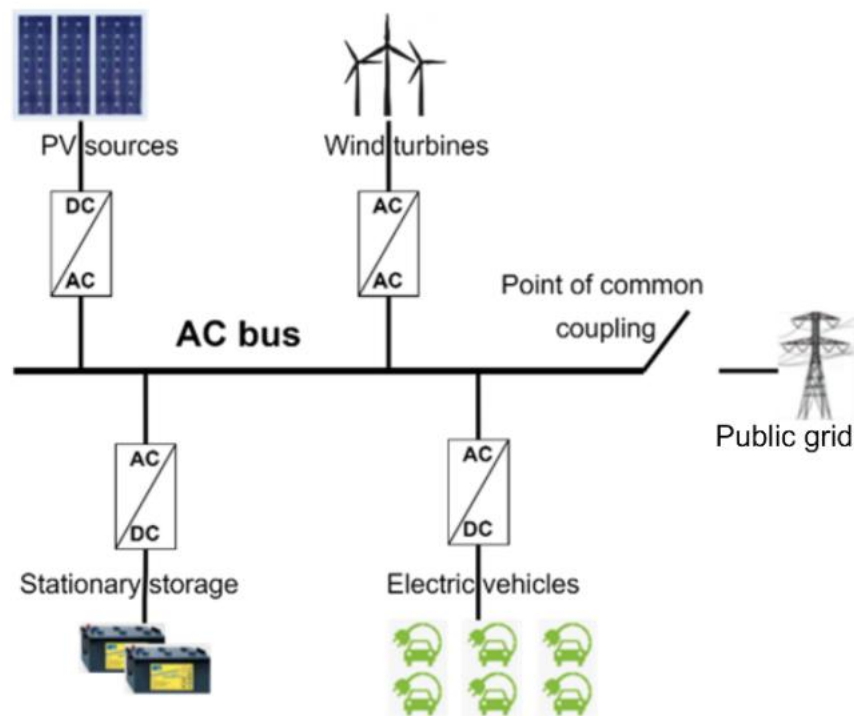


Рисунок 1.8 - Типова архітектура зарядної станції змінного струму

В архітектурі зарядної станції на основі DC MG, як показано на рисунку 1.9, усі джерела та навантаження підключаються через свої спеціальні перетворювачі до загальної шини постійного струму.

Фотоелектричні джерела під'єднані до перетворювача постійного/постійного струму, що працює з MPPT, стаціонарне сховище під'єднано до двонаправленого перетворювача постійного/постійного струму, а зарядні пристрої для електромобілів підключено до перетворювачів постійного/постійного струму, вони можуть бути двонаправленими, якщо застосовно V2G. У той час як вітрові турбіни підключаються до

перетворювачів змінного/постійного струму, а для підключення до мережі потрібен двонаправлений інвертор змінного/постійного струму, що важливо для забезпечення безперервності заряджання, оскільки фотоелектричне джерело є переривчастим. Оскільки заряджання електромобілів здійснюється постійним струмом, архітектура DC MG є більш ефективною завдяки меншій кількості ступенів перетворення. Зазвичай контроль падіння використовується для підтримки стабільності напруги в шині.

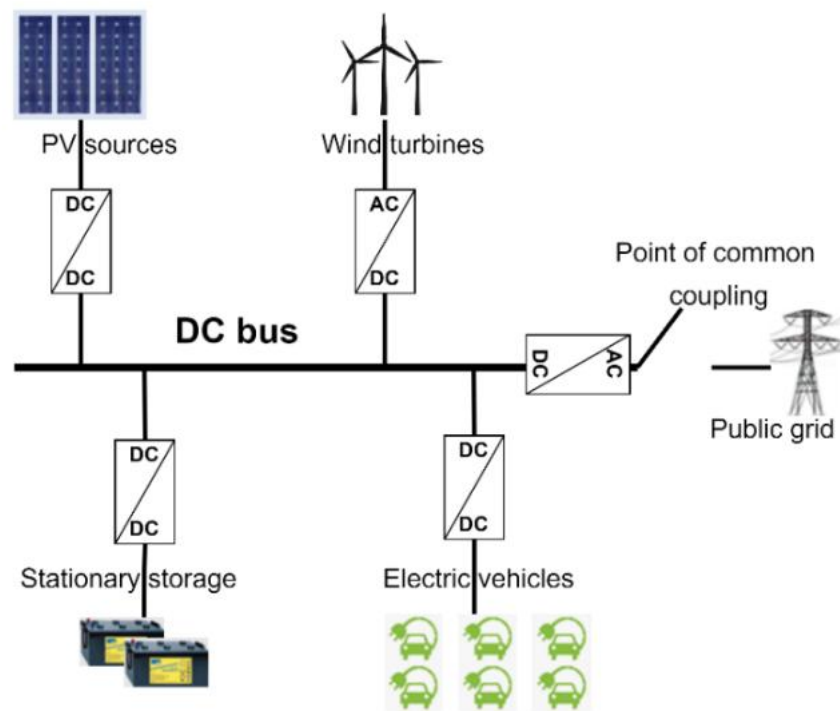


Рисунок 1.9 - Типова архітектура зарядної станції постійного струму

Архітектура зарядної станції на основі гібридної MG, як показано на рисунку 1.10, поєднує MG як змінного, так і постійного струму, де є дві шини, що живлять навантаження змінного та постійного струму. Вона поєднує в собі переваги як змінного, так і постійного струму, де джерела постійного струму підключаються до перетворювача постійного/постійного струму, оскільки фотоелектричні джерела та стаціонарні накопичувачі підключаються до перетворювачів постійного/постійного струму, а зарядні пристрої для електромобілів підключаються до понижуючих перетворювачів

постійного/постійного струму. Тоді як для підключення до мережі не потрібен інвертор і підтримується напруга змінного струму для живлення навантажень змінного струму. Взаємозв'язаний перетворювач необхідний для з'єднання частин змінного та постійного струму, він передає потужність в обох напрямках і може працювати в обох режимах, щоб забезпечити баланс потужності між двома частинами на основі фактичних потреб.

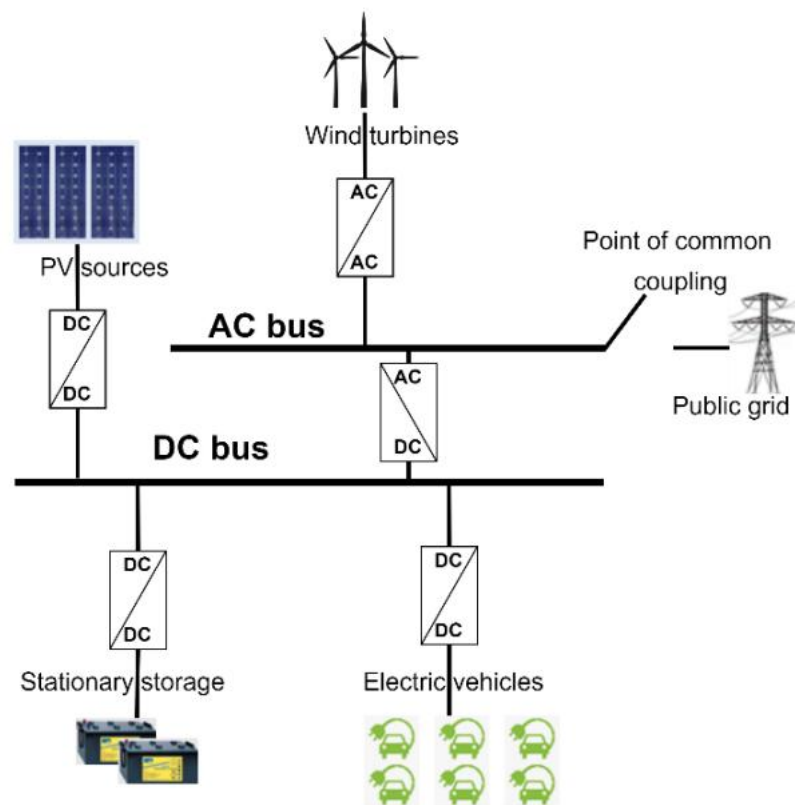


Рисунок 1.10 - Типова архітектура зарядної станції гібридного типу

MG постійного струму нещодавно стали більш привабливими та популярними, ніж MG змінного струму, на промислових об'єктах, у комерційних будівлях і домогосподарствах, оскільки труднощі для MG AC полягають у стабілізації напруги та частоти шини. Основні переваги DC MG:

- ВДЕ на основі постійного струму потребує лише одного етапу перетворення для підключення до шини постійного струму, тоді як їм потрібні одно- або трифазні інвертори для підключення до шини змінного струму. Тоді як ВДЕ на основі змінного струму потребують

двоступневих перетворень для підключення до шини змінного струму. Це скорочення етапів перетворення може призвести до зниження вартості системи;

- Джерела постійного струму відрізняються високою надійністю та ефективністю;
- У джерелах постійного струму немає реактивної потужності, тому досягаються низькі втрати потужності та висока пропускна здатність;
- Керувати DC MG можна просто, керуючи джерелом живлення на шині постійного струму.

1.6 Фотоелектричні зарядні станції

Таким чином, зарядка електромобілів від ВДЕ, особливо з фотоелектричними джерелами, сприяє збільшенню екологічних переваг електромобілів і є ключовим елементом у скороченні викидів парникових газів від автомобіля. Фотоелектричні системи можуть бути встановлені на навісах для паркування автомобілів - карпортах або на дахах будівель і призначені для заряджання електромобілів; вони викликаються PVCS і можуть працювати в острівному режимі або в режимі підключення до мережі. На рисунку 1.10 показано типову зарядну станцію з фотоелектричним модулем (photovoltaic charging station, PVCS), яка складається з:

- Фотоелектричних джерел, встановлених на паркінгу;
- Силових електронних пристроїв, які представлені спеціальними перетворювачами (DC-DC, MPPT або DC-AC);
- Системи накопичення енергії, яка використовується для компенсації різниці у виробництві фотоелектричної енергії та зарядному навантаженні. широко використовуються літій-іонні батареї, а також можуть використовуватися свинцево-кислотні батареї;

— Обладнання необхідне для підключення EV до зарядного терміналу: кабель живлення, роз'єм, захисні пристрої та інтерфейс користувача зарядної станції;

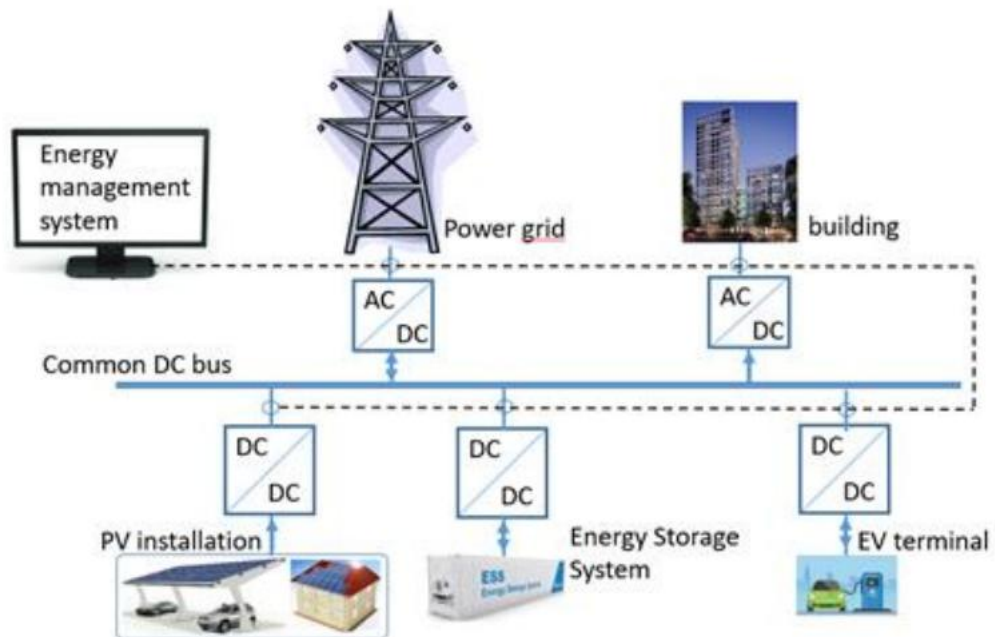


Рисунок 1.10 - Типова архітектура зарядної станції з модулем системи енергетичного менеджменту

Система управління енергією потрібна для контролю та моніторингу потоків енергії в PVCS для досягнення визначеної мети, як мінімізація витрат на зарядку та задоволення користувача EV повним процесом зарядки. Ці фотоелектричні інфраструктури призначені для заряджання електромобілів, подачі енергії в будівлі або подачі електроенергії в мережу.

Висновки за розділом 1

1. Проаналізовано основні тренди розвитку електромобільності у світі. За даними звітів Міжнародної енергетичної агенції та Федерації автопрому України можна відзначити швидке зростання ринків електромобілів. Невід'ємною складовою поширення електромобілів є потреба в зарядній інфраструктурі.

2. Досліджено три основні способи заряджання електромобілів: Кондуктивний заряд - змінним і постійним струмом; індуктивний заряд - статичний і динамічний та технологія заміни батарей.

3. Фізично розташування компонентів для перетворення електроенергії, що подається мережею, на енергію, необхідну акумулятору автомобіля, можна класифікувати як бортові (заряджання змінним струмом) та зовнішні зарядні пристрої (заряджання постійним струмом) або їх комбінація у випадку індуктивного заряду.

4. Визначено, що зарядні станції класифікуються на основі рівня напруги, який відповідає номінальній потужності, де рівень 1 і рівень 2 відповідають переважно бортовій зарядці, а рівень 3 відповідає зовнішній зарядці.

5. Проаналізовано типи архітектур зарядних станцій на базі MG: MG змінного струму, MG постійного струму та гібридні MG.

6. Зарядка електромобілів від ВДЕ, особливо з фотоелектричними джерелами, сприяє збільшенню екологічних переваг електромобілів і є ключовим елементом у скороченні викидів парникових газів від автомобіля. Фотоелектричні системи можуть бути встановлені на навісах для паркування автомобілів - карпортах або на дахах будівель і призначені для заряджання електромобілів; вони викликаються PVCS і можуть працювати в острівному режимі або в режимі підключення до мережі.

2. АНАЛІЗ ПІДХОДІВ ДО УПРАВЛІННЯ НАВАНТАЖЕННЯМ ГРОМАДСЬКИХ ЗАРЯДНИХ СТАНЦІЙ

Електромобілі розглядаються як майбутнє транспортної промисловості і демонструють рівень енергоефективності набагато вище, ніж звичайні бензинові або дизельні транспортні засоби. Однак сталість електромобілів виправдана тільки в тому випадку, якщо електроенергія, яка використовується для їх зарядки, використовується зі сталого джерела енергії, а не з будь-якого викопного палива або джерела вуглецевих викидів.

Поточна мережева інфраструктура не здатна підтримувати бажаний швидкісний 3-ій рівень зарядки. Таким чином, досягнення швидкісної зарядки, яка залежить виключно від електричної мережі, вимагає не лише вдосконалення системи зарядки, але й підвищення пропускну здатності електричної мережі. Крім того, споживання великої кількості струму з електричної мережі збільшить вартість генерації, особливо в години пік, і, як наслідок, збільшить вартість функціонування усієї системи. Можливим вирішенням цих проблем може бути встановлення розподіленого генератора (Distributed Generator, DG) поблизу місця швидкої зарядної станції, оскільки він генерує електроенергію, яка призначена для використання на місці [9]. Кілька десятиліть тому низка подій почала змінювати основи промисловості функціонування електромереж, що призвело до появи DG. Амбітні цілі щодо вищих темпів розгортання DG в електричному пулі досяжні завдяки прогресу технологій і вдосконаленням у галузях силової електроніки та інтелектуальних мереж. Крім того, постійно випускаються нові нормативні акти та політика, які сприяють розподіленій генерації та концепції чистого вимірювання. Однак тип енергії, що використовується для живлення DG на стороні попиту, є вирішальним фактором економічної життєздатності концепції DG на сучасному ринку розподілу електроенергії.

Що стосується розподіленої генерації, відновлювані джерела енергії (ВДЕ) мають явну перевагу в їх здатності бути розгорнутими в житлових і міських районах, завдяки своїй екологічно чистій експлуатації та

мінімальним вимогам до технічного обслуговування. Отже, фотоелектрика (PV) розглядається як ефективне рішення, завдяки своїй стійкості та повсюдності. Основна перевага PV-систем полягає в тому, що вони ефективно використовуються для різних рівнів генерації електроенергії, починаючи від малопотужних внутрішніх додатків до мега електростанцій на основі PV. Мережеві PV установки використовуються з більш глибоким рівнем проникнення в порівнянні з автономними PV установками. Це пов'язано з безперервною залежністю від електричної мережі як стабільного джерела/навантаження, яке може компенсувати коливання потужності PV [10].

Заряджання електромобілів стане серйозною проблемою та збільшить навантаження на державну мережу. Заряджання електромобілів протягом дня збільшить пікове навантаження, як показано на малюнку 2.1a. Однак електромобілі вважаються гнучким навантаженням на відміну від неконтрольованих навантажень; отже, зарядку електромобілів можна контролювати та переносити на інший час, щоб запобігти піковому навантаженню, запровадивши інтелектуальну структуру заряджання, наприклад, нічну зарядку, як показано на малюнку 2.1b. Однак це може стримувати користувачів електромобілів, поведінку яких важко передбачити та контролювати.

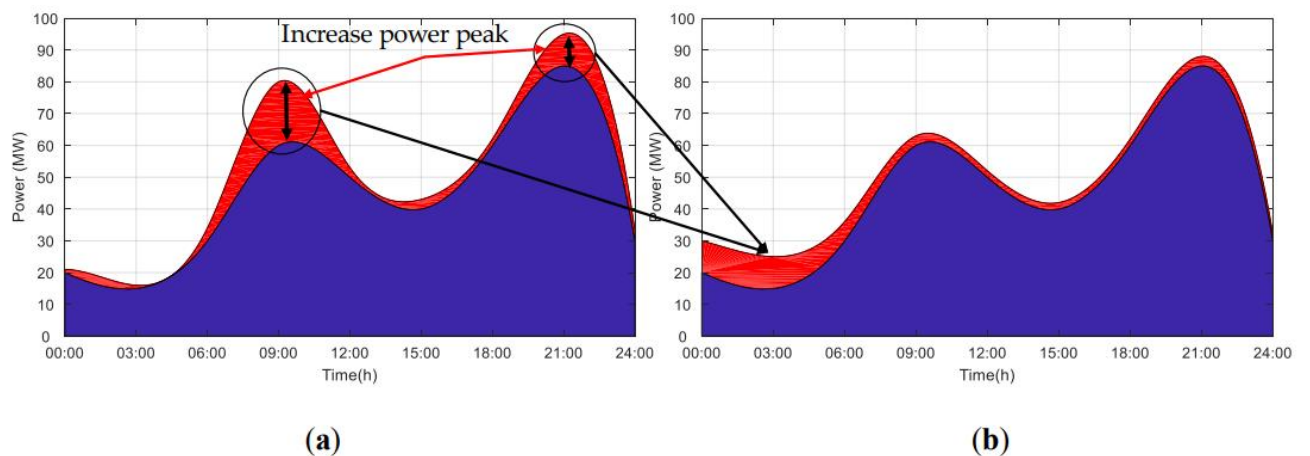


Рисунок 2.1 - (a) зарядка електромобілів і пікове навантаження; (b)

Перенесене заряджання електромобілів на ніч.

Щоб подолати ці обмеження, електромобілі можуть заряджатися фотоелектричною енергією, що є надійним і ефективним варіантом для зменшення навантаження на державну мережу [11]. Таким чином, у той час як електромобілі будуть заряджатися зеленою енергією [12] ринок електромобілів буде заохочуватися, оскільки електромобілі сприятимуть мінімізації впливу транспорту на навколишнє середовище [13].

Існують різні схеми зарядки/розрядки електромобілів [14]:

Неконтрольоване заряджання: електромобіль починає заряджатися негайно, доки його акумулятор не буде повністю заряджено або користувач електромобіля не від'єднає свій автомобіль. Ця структура може бути виражена як некоординована зарядка або негайна зарядка, коли EV заряджається на максимальній потужності без обмежень. У цій структурі немає жодної взаємодії між користувачами електромобілів та електричною мережею. Це найгірший сценарій, оскільки він заряджає EV з максимальною потужністю для повної зарядки за найкоротший час, створюючи труднощі для мережі та пікове навантаження [15].

Відкладене заряджання: коли час паркування (тривалість часу для EV, припаркованого на станції) довший за фактично необхідний час заряджання, отже, заряджання EV може бути відкладено, враховуючи ціну часу використання, і може заряджатися під час низьковартісного та позапікового енергетичного періоду [16].

Середнє заряджання: EV заряджається на постійній потужності залежно від часу паркування, протягом якого EV здатний досягти запитуваного SOC або повного SOC, коли не потрібно заряджати на повну потужність [15].

Розумне заряджання: користувачі електромобілів надають громадській мережі інформацію про час паркування та необхідну зарядку, яку необхідно здійснити перед тим, як покинути станцію. Таким чином, відновлювані джерела енергії спочатку використовуються для забезпечення навантаження, а потім державна мережа буде контролювати та формувати профілі зарядки електромобілів і мінімізувати витрати на зарядку [16].

Інтелектуальна розрядка: відома як V2G, електромобілі діють як стаціонарні накопичувачі, що дозволяє розряджати електроенергію назад у загальнодоступну мережу [16]. Це підвищить ефективність і надійність електричної мережі.

Відкладене заряджання можна розглядати як інтелектуальну систему заряджання, оскільки воно змінює час початку заряджання, час завершення заряджання та потужність заряджання, але, що найважливіше, забезпечує доставку необхідної енергії до електромобіля. Крім того, середнє заряджання можна розглядати як неузгоджену структуру заряджання, оскільки воно починає заряджатися одразу після підключення електромобіля, але з обмеженою потужністю [15]. Профіль відкладеного заряджання подібний до профілю неконтрольованого заряджання, але пікове навантаження зміщується на ніч/світанок (приблизно о 5:00 ранку та 9:00 ранку). У той час як при середньому зарядженні профіль вирівнюється замість того, щоб мати пік [17].

Нескоординоване заряджання електромобілів може збільшити пікове навантаження, накладаючи велике навантаження на державну мережу, що призводить до збільшення втрат. Таким чином, завдяки інтелектуальній зарядці або скоординованій зарядці, електромобілі можуть стати активом для мережі, допомагаючи збільшити проникнення відновлюваних джерел енергії, збалансувати енергетичну систему та підвищити ефективність системи, задовольняючи потреби користувачів електромобілів [18]. Координована зарядка класифікується на два типи: зарядка, координована за часом, і зарядка, координована за потужністю. Під час узгодженої зарядки за часом контролюється кількість електромобілів, які можуть заряджатися, щоб забезпечити загальне навантаження в межах доступної потужності для заряджання електромобілів. У той час як під час узгодженої зарядки за потужністю контролюється потужність заряджання електромобіля, щоб гарантувати, що загальне навантаження знаходиться в межах доступної потужності для заряджання електромобіля.

Найважливішими параметрами в моделюванні процесу заряджання електромобілів є швидкість заряджання/розряджання, початковий SOC, ємність акумулятора, відстань виснаження заряду та поведінка користувача, яку важко передбачити заздалегідь. Крім того, час прибуття на зарядну станцію, час відправлення та відстань руху електромобіля є змінними залежно від звичок користувача. Однак їх можна спрогнозувати та користуватись функціями розподілу ймовірностей [19]. Для цього генеруються функції розподілу ймовірностей, щоб визначити час прибуття на зарядну станцію, час відправлення та відстань руху електромобіля. Потім розраховується енергія, необхідна для повного заряджання електромобіля, і загальний час заряджання електромобіля є енергією, необхідною для повного заряджання електромобіля протягом рівня заряджання.

2.1 Зарядна інфраструктура

Розміщення зарядної інфраструктури залежить від співвідношення між потребами водіїв, зарядного обладнання, часткою електромобілів і технічними можливостями. Щільність населення, запас ходу та поведінка зарядки є специфічними факторами, які мають безпосередній вплив на географічне розташування обладнання для забезпечення електромобілів енергією і на швидкість заряджання для електричних транспортних засобів малої вантажопідйомності.

Повільна зарядка здебільшого розрахована на 3 кВт, але насправді вона коливається від 1,8 кВт до 6 кВт. Час заряджання залежить від швидкості заряджання та енергоємності EV, таким чином, повна зарядка займає 6–12 годин для 3 кВт. Повільні зарядні станції є звичайними для більшості електромобілів, їх можна знайти скрізь, наприклад, удома, на роботі та в громадських місцях. Користувачі електромобілів, як правило, заряджаються вдома протягом ночі для тривалої зарядки.

Швидке заряджання зазвичай розраховане на потужність від 7 кВт до 22 кВт (одно- або трифазний 32 А), де заряджання електромобіля ємністю 40

кВт/год займає 4–6 годин з потужністю 7 кВт і 1–2 години з 22 кВт. Більшість швидких зарядних пристроїв забезпечують заряджання змінним струмом, однак деякі інфраструктури оснащені зарядними пристроями постійного струму потужністю 25 кВт із роз'ємами CHAdeMO. Швидкі зарядні пристрої можна знайти в громадських місцях, таких як торговельні центри, автостоянки, робочі місця, супермаркети, вокзали та стоянки аеропорту [19].

Розміри та характеристики зарядної станції залежать від фотоелектричної установки (парковка або інтегрована в будівлю фотоелектрична система), потенціалу сонячного випромінювання, стаціонарного сховища та прийнятої бізнес-моделі. Життєздатність добре розроблених фотоелектричних зарядних станцій для електромобілів залежить від соціального визнання, переваг фотоелектричної енергії та бізнес-моделі.

Хоча більшість попиту на заряджання зараз задовольняється за рахунок домашньої зарядки, все більше зростає потреба у громадських зарядних пристроях, щоб забезпечити такий же рівень зручності та доступності, як і для заправки звичайних транспортних засобів. Зокрема, у густонаселених міських районах, де доступ до домашньої зарядки є більш обмеженим, громадська зарядна інфраструктура є ключовим фактором впровадження електромобілів. Наприкінці 2022 року в усьому світі налічувалося 2,7 мільйона громадських зарядних станцій, понад 900 000 з яких було встановлено у 2022 році, що приблизно на 55% більше, ніж у 2021 році, і співставно з темпами зростання на 50% до пандемії між 2015 і 2019 роками [2].

Приватні зарядні системи становили 90% світових зарядних станцій для електромобілів у 2019 році, оскільки прибутковість, зручність, а також різноманітна підтримка та стимули є основними мотивами універсальності приватних зарядних пристроїв. Переважними місцями для зарядки електромобіля є дім і приватні робочі місця. Інфраструктура для домашньої

зарядки – це сумісна електрична розетка та вилка зарядного пристрою, які вже є в домівках.

Як видно на рисунку 2.2, частка приватних зарядних пристроїв набагато більша, ніж частка громадських зарядних пристроїв. Приватні зарядні пристрої складають майже 90% загальної кількості зарядних пристроїв у світі. Кожен електромобіль, як правило, оснащений власним зарядним пристроєм, що допомогло збільшити глобальну кількість приватних зарядних пристроїв для електромобілів. Крім того, зручність приватних зарядних пристроїв є ще одним із основних чинників поширеності. Місцями встановлення приватних зарядних пристроїв можуть бути житлові приміщення, а також робочі місця. Дивлячись на світову частку приватних зарядних пристроїв на рисунку 2.3, можна побачити, що Китай має найбільшу частку приватних зарядних пристроїв — майже 2,4 мільйона зарядних пристроїв. Для порівняння, станом на 2019 рік у США було близько 1,56 мільйона приватних зарядних пристроїв [20].

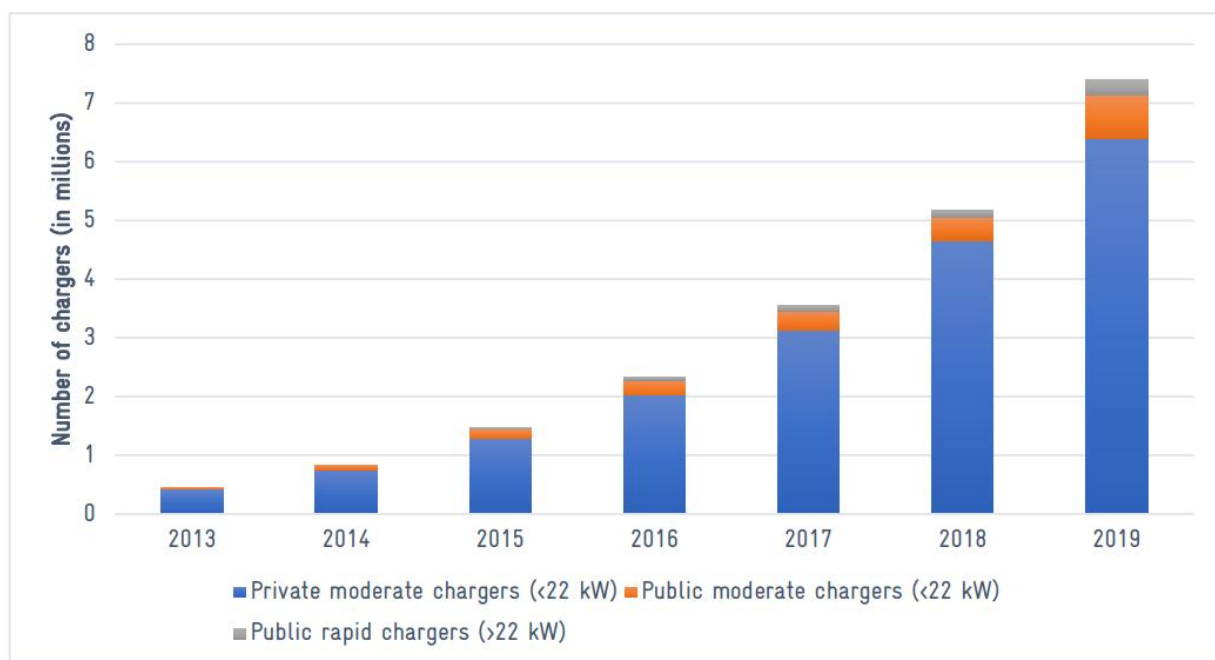


Рисунок 2.2 - Частка зарядних станцій різного типу у період з 2013-2019р

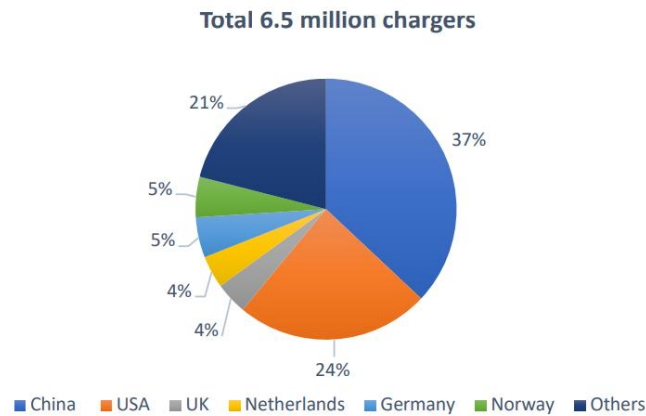


Рисунок 2.3 - Частка приватних зарядних станцій по країнах

2.2 Ходові характеристики та профілі зарядної потужності

Люди мають різні погляди та стилі життя, а отже, вони відрізняються моделями водіння, що суттєво впливає на просторово-часовий розподіл зарядного навантаження. Однак профілі заряджання електромобілів відрізняються й залежать головним чином від типу заряджання, звичок користувачів електромобілів та рівня споживання енергії, як це видно з рисунку 2.4. У [21] дані про водіння для різних користувачів аналізуються в часових і просторових вимірах, щоб зрозуміти моделі водіння різних груп населення, згрупованих за віком як демографічним атрибутом. Щоденна відстань є фактором для порівняння поведінки різних користувачів електромобілів.



	Battery	On-board charger	CHARGING STATION				Range with average (20 kWh/100 km)
			3.7 kW	7.4 kW	11kW	22 kW	
 NISSAN LEAF	40 kWh	7.4 kW	~10h	~5h	~5h	~5h	200 km
 AUDI E-TRON	60 kWh	11 kW	~16h	~8h	~5h	~5h	300 km
 TESLA MODEL S	85 kWh	22 kW	~23h	~11,5h	~8h	~4h	400 km

Рисунок 2.4 - Характеристика електромобілів та час заряджання залежно від потужності

На основі цих даних середньодобову міську/приміську поїздку можна оцінити як 20–40 км. З двома режимами водіння: звичайна їзда з 15 кВт-год/100 км і еко-драйв з 10 кВт-год/100 км, отже, добова норма споживання енергії становить 3-6 кВт-год для звичайної їзди та 2-4 кВт-год для еко-драйву.

2.3 Скоординована система заряджання електромобілів

Випадковий або неузгоджений підхід до заряджання електромобілів негативно впливає на розподільчу мережу, включаючи приріст реальних втрат електроенергії, зміну напруги в мережі, надмірне навантаження на мережу [22]. Скоординоване заряджання може покращити експлуатаційні показники комунального підприємства завдяки розумному управлінню зарядним навантаженням електромобілів і може мінімізувати витрати на заряджання за допомогою динамічної політики ціноутворення. У середовищі інтелектуальної мережі скоординовану операцію заряджання електромобілів можна здійснити двома способами: 1) централізованим підходом та 2) децентралізованим. У будь-якій системі керування діяльність з нарахування плати забезпечує агент, який називається агрегатором [23]. Агрегатор — це взаємодіючий орган між клієнтами електромобілів та оператором розподільчої мережі, який оптимально задовольняє вимоги клієнтів щодо зарядки без шкоди для мережевих обмежень [24]. Залучення агрегатора дає можливість споживачам зв'язатися з ринком електроенергії та захищає їхні фінансові інтереси. Подібним чином агрегатор однаково працює для мережевих операторів, щоб оптимізувати продуктивність їх мережі. Окрім керування процесом заряджання електромобілів, агрегатор також сприяє підтримці напруги та частоти, балансуванню навантаження та зменшенню втрат електроенергії, керуючи роботою розряджання акумуляторів електромобілів. Робота, тобто зарядка/розрядка, контролюється централізовано або розподілено.

Централізоване керування зарядкою електромобілів також називають архітектурою прямого керування зарядкою [25]. Виключно агрегатор відповідає за забезпечення координації процесу зарядки електромобілів, враховуючи інтереси обох сторін, тобто оператора мережі та клієнтів, що заряджаються. Централізована структура повністю підтримує допоміжні послуги. Проте вона включає в себе вищий рівень складності і може обслуговувати обмежену кількість клієнтів для зарядки [26]. Обчислювальна складність для цієї структури більша, оскільки вона включає в себе великий обсяг даних [27]. Цей підхід вимагає великої кількості умов для розподілу навантаження зарядки, що призводить до меншої гнучкості. У децентралізованій системі керування зарядкою, можливість прийняття рішення щодо зарядки електромобілів розподіляється між окремими клієнтами, що заряджаються [28]. Незважаючи на те, що ця логіка керування надає клієнтам можливість самостійно вирішувати питання щодо зарядки, вона не завжди гарантує оптимальне рішення для розподільчої мережі, оскільки агрегатори не можуть безпосередньо регулювати процес зарядки. Вони можуть лише змінювати поведінку клієнтів, що заряджаються, пропонуючи їм привабливі стимули через динамічні тарифи на електроенергію. Для координації в реальному часі, прибуття електромобілів вважається випадковою величиною; тому важливо мати підхід з високим рівнем масштабованості. Децентралізована модель пропонує більшу масштабованість в цьому відношенні. Порівняння централізованої та децентралізованої логіки управління зарядкою електромобілів наведено в таблиці 2.1. Порівняно з централізованим керуванням зарядкою, децентралізована структура є більш гнучкою, масштабованою і надає клієнтам більше прав в процесі прийняття рішень щодо зарядки електромобілів. Тому ця модель дуже актуальна в проектуванні управління розкладом зарядки електромобілів [29].

Таблиця 2.1 - Порівняння централізованої та децентралізованої логіки

Характеристика	Логіка управління заряджанням	
	Централізована	Розподілена
Рішення щодо зарядки	Агрегатор	Клієнт
Контроль	Прямий контроль	Контроль на основі ціни
Допоміжні послуги	Повністю забезпечені	Частково забезпечені
Обчислювальна складність	Висока	Низька
Гнучкість	Низька	Висока
Масштабованість	Низька	Висока

Одночасна або неузгоджена зарядка парку електромобілів значно збільшує споживання електроенергії, що викликає несподівані піки в системі і призводить до перевантаження розподільчої мережі, що призводить до погіршення якості напруги, збільшення втрат електроенергії та використання неекономічних джерел енергії. Існує два потенційних рішення для управління зростаючим попитом на заряджання електромобілів без впливу на операційну продуктивність мережі:

Програма управління постачанням (Supply Side Control Action, SSCA) відноситься до збільшення і управління потужністю генерації системи для задоволення пікового попиту, викликаного одночасною зарядкою електромобілів. Це дорогий підхід і потребує сучасної градації мережевої інфраструктури.

Програма управління попитом (Demand Side Control Action, DSCA), яка є альтернативним рішенням для управління попитом на зарядку електромобілів, прихована в програмі реагування на попит. Йдеться про кроки з динамічним ціноутворенням, яких вживають комунальні підприємства та споживачі, щоб впливати на споживання електроенергії задля оптимізації кінцевих рахунків.

Неузгоджена зарядка електромобілів може збільшити попит на електроенергію до 5% у години пікового навантаження [30]. Динамічна цінова політика відіграє важливу роль у вирішенні проблем пікового навантаження з невизначеністю, викликаного частою зміною ціни. Керування

попитом на енергію (Demand-Side Management, DSM) є основною частиною розумного ціноутворення для ефективного функціонування системи шляхом оптимізації використання електроенергії, а також мінімізації витрат шляхом модифікації кривої навантаження, сформованої шістьма основними методами формування навантаження: зсувом навантаження (load shifting), стратегічним збереженням (strategic conservation), піковим відсіканням (peak clipping), стратегічним зростанням (strategic growth), заповненням долини (valley filling) та гнучка форма навантаження (flexible load shape).

Програма реагування на попит (Demand Response, DR)— це фактично зміна споживання електроенергії кінцевим споживачем у відповідь на зміну ціни на електроенергію з часом або через стимулюючі виплати, запроваджені для зменшення споживання електроенергії під час високих оптових ринкових цін (market-driven DSM), або коли надійність мережі знаходиться під загрозою (network-driven DSM).

Важливим завданням управління реагуванням на попит (DR) є переведення споживачів електроенергії з фіксованого тарифу на пікове та позапікове ціноутворення.

Зарядні станції електромобілів зазвичай забезпечують зарядку з фіксованою ціною, що може призвести до довгих черг на станціях. Якщо ціни будуть часто змінюватись відповідно до навантаження на зарядну станцію, це зменшить довгі черги. Real time pricing (RTP) буде заохочувати водія електромобіля їхати на віддалені зарядні станції, які будуть менш переповненими і дешевшими. Завдяки впровадженню схеми ціноутворення time-of-use (TOU) можна мінімізувати ціну подорожі електромобіля та оптимізувати роботу батареї транспортного засобу [29].

Реагування на попит можна реалізувати в інфраструктурі зарядки електромобілів за допомогою розумних систем заряджання (Smart Charging). Ці системи дозволяють комунальним компаніям контролювати процес заряджання електромобілів дистанційно або через зв'язок з автомобілем. Координуючи схеми заряджання, комунальні підприємства можуть

оптимізувати час заряджання відповідно до періодів низького попиту на електроенергію або високої генерації відновлюваної енергії.

Технологія Vehicle-to-Grid дозволяє електричним транспортним засобам віддавати накопичену енергію назад у мережу, коли це необхідно. У цьому сценарії електромобілі діють як мобільні накопичувачі енергії, які можуть постачати електроенергію в періоди пікового попиту. Беручи участь у програмах реагування на попит, власники електромобілів можуть продавати надлишок електроенергії зі своїх автомобілів у мережу, отримуючи натомість фінансові стимули.

Власники електромобілів стурбовані заряджанням акумулятора, оскільки вони хочуть досягти цільового стану заряду (SoC) на момент відправлення, з іншого боку, оператор мережі прагне підтримувати ефективність роботи мережі. Централізований і розподілений підходи до управління заряджанням переслідують одну, або кілька цілей, серед яких мінімізація вартості заряджання; мінімізація втрат потужності; стабільність напруги; зниження пікового навантаження; скорочення довгих черг на зарядних станціях; а також зменшення перевантаження лінії, мережі та трансформатора. Короткий перелік основних цілей оптимізації, які використовуються для планування зарядки електромобілів, і пов'язаних обмежень представлено на рис. 2.5.

— Мінімізація втрат енергії

Зарядка електромобілів за динамічного ціноутворення досліджується для мінімізації втрат електроенергії в розподільній мережі в [29]. Оптимізований графік заряджання зменшує втрати електроенергії, збільшуючи термін служби батареї та ефективність розподільної мережі. В дослідженні [31] було запропоновано багатоцільову стратегію інтелектуального заряджання, в якій потужність мережі та профіль напруги системи оптимізовані для узгодженого графіка заряджання для зарядки електромобілів. Вони розробили реалістичну зарядку, враховуючи пріоритети зарядки клієнтів електромобілів. Автори [32] також успішно запропонували скоординований

графік заряджання електромобілів, враховуючи легкість клієнта отримати бажаний рівень SOC під час відправлення. Небажані наслідки випадкового заряджання електромобілів, такі як низька якість напруги та високі втрати потужності, зменшуються завдяки пропозиції онлайнового графіка заряджання електромобілів [33].



Рисунок 2.5 - Цілі оптимізації та обмеження

— Мінімізація вартості електроенергії

Автори в дослідженні [34] обговорювали питання мінімізації витрат на електроенергію з урахуванням динамічної цінової політики для узгодженого графіка роботи. У роботі [35] автори запропонували оптимальну структуру планування, спрямовану на мінімізацію витрат на електроенергію в

середовищі ціноутворення в реальному часі. В іншому дослідженні [36] розглядається модель ціноутворення в реальному часі для планування процесу заряджання електромобілів. Витрати на електроенергію мінімізуються шляхом впровадження моделі динамічного можливого попиту на енергію. У роботі [37] також було зосереджено увагу на зниженні витрат на електроенергію для зарядки електромобілів шляхом розгляду статичних і динамічних моделей. Метою роботи [38] було запропонувати модель зарядки для електромобілів, яка могла б сприяти зниженню витрат на електроенергію. Було прийнято регіональну модель часу використання, яка складалася з чотирьох субрегіонів, і було реалізовано продуктивність окремої зони. Мінімізація витрат на електроенергію була досягнута шляхом впровадження стратегії зарядки в реальному часі [39]. Дослідження [40] запропонувало економічно ефективний механізм оплати для PHEV шляхом прийняття розподіленої динамічної політики ціноутворення в інфраструктурі кількох мікромереж. Був введений набір правил для використання енергії та торгівлі нею з іншими енергодефіцитними мікромережами. Розроблено рентабельний онлайн-механізм зарядки для зарядки електромобілів з урахуванням задоволеності клієнтів [33]. Економічне рішення для клієнтів можна знайти, розглядаючи мінімізацію витрат на зарядку як цільову функцію для процесу заряджання електромобілів для інтервалу годин пік і поза піком».

— Збалансоване пікове навантаження

Навантаження електричних транспортних засобів підвищують піки попиту на електроенергію в електромережі, які необхідно мінімізувати. Координація зарядки електромобілів із динамічним ціноутворенням відіграє важливу роль у зниженні пікового навантаження. У дослідженні [41] авторам вдалося мінімізувати пікове навантаження, запровадивши бажані часові інтервали для заряджання, враховуючи зміну ціни на електроенергію в часі. Піковий попит у роботі [42] контролюється оптимальним механізмом коригування ціни. Дослідження [30] запропонувало миттєве скорочення пікової політики ціноутворення в реальному часі. Модель динамічного

прийняття рішень була запропонована в [43] для ефективного зниження пікового попиту. Автори в [36] сформулювали динамічний вектор ціни RTP (Real Time Pricing) на основі алгоритму кластеризації. Модель успішно знизил витрати на електроенергію та пікове навантаження. Нового піку через зарядне навантаження електромобілів уникнуто в [44] за допомогою методу ціноутворення в реальному часі, який передбачає коригування дії заряджання. В роботі [31] запропоновано модель ціноутворення RTOU (Regional time of use) для зарядки електромобілів. Була запроваджена програма стимулювання, щоб проаналізувати реакцію клієнтів. Метою цієї програми було зниження пікового попиту системи. У [40] автори розглянули інфраструктуру кількох мікромереж стосовно задачі планування зарядки електромобілів. У зв'язку з цим вони запропонували розподілену динамічну цінову політику, спрямовану на зниження попиту на зарядку в піковому режимі в межах окремої мікромережі. Подібним чином у дослідженні [45] досліджується вплив зарядки EV на загальний попит на систему, і тому пропонується модель тарифікації, яка показує, що механізм ціноутворення TOU від піку до падіння може допомогти мінімізувати піковий попит. Якщо заряджання виконуватиметься в години пік, це може погіршити роботу електричної мережі. Таким чином, пікове навантаження має бути мінімізоване, щоб продуктивність мережі не була піддана сумніву під час зарядки електромобілів.

— Регулювання напруги

Регулювання напруги або мінімізація нестабільності напруги в умовах зарядки EV за динамічного ціноутворення обговорюється в дослідженнях [38, 32]. Комунальні служби висловили свою стурбованість змінами напруги та перевантаженням системи через зростаючу активність зарядки без будь-якого контрольованого механізму. Неузгоджена практика заряджання електромобілів може значно порушити профіль напруги системи, і клієнти, що живляться від однієї мережі, стикаються з проблемами якості електроенергії [46]. У зазначених посиланнях була розроблена оптимальна

стратегія заряджання для електромобілів, враховуючи напругу системи як ключовий параметр. Комунальні підприємства спрямовані на надання якісних послуг своїм клієнтам. Оптимальна стратегія зарядки може забезпечити регулювання напруги для комунальних послуг для безперебійної роботи; отже, регулювання напруги розглядається як важлива цільова функція в розкладі зарядки електромобілів.

2.4 Математичні методи оптимізації роботи зарядних станцій електромобілів

Оптимізація роботи є одним із підходів забезпечення надійності функціонування зарядної станції. Планування зарядки EV є складною проблемою оптимізації. Оптимізований графік зарядки необхідний для підвищення ефективності мережі, агрегатора, розподільних трансформаторів та самого EV. Цільових функцій оптимізації зарядки електромобілів може бути декілька. Найпоширенішою ціллю оптимізації є мінімізація загальної вартості зарядки з метою економії витрат. Вартість може включати витрати на експлуатацію та витрати на паливо. З точки зору енергоефективності розглядаються загальні витрати на електроенергію, а також втрати електроенергії, така оптимізація спрямована на планування розподілу електроенергії більш ефективним способом. Екологічний слід також враховують в задачах оптимізації для зменшення викидів парникових газів, а також деяких інших газоподібних забруднювачів, таких як оксиди азоту (NO_x). Отримання доходу від V2G є основним стимулом участі в моделі, тому варто розглядати також можливість знаходження рішення задачі оптимізації з метою максимізації прибутку. Крім цього, в якості цільової функції також можна розглядати максимізацію середнього стану заряду батареї EV.

Іншою складовою задачі оптимізації є обмеження. Обмеження вводяться для зв'язування рішень у межах фізичних та визначених користувачем обмежень. Потужність, напруга та струм зарядного пристрою зазвичай

обмежені технічними характеристиками зарядних пристроїв та ємністю акумулятора EV. Для оптимізації всієї розподільної енергосистеми часто розглядаються обмеження генерації та передачі в межах робочих параметрів мережевих операторів «grid code».

Якщо оптимізаційні моделі опуклі, мають невелику кількість змінних і вхідних параметрів, і можуть бути вирішені за поліноміальний час, методи прямої оптимізації знайдуть глобальний оптимум, який задовольняє всі обмеження. Однак більші задачі з кількома змінними та численними обмеженнями іноді не можуть бути вирішені за поліноміальний час, тому необхідні інші підходи до їх вирішення. Зі збільшенням кількості змінних і обмежень складність моделі та час, необхідний для пошуку рішення, також зростають. Завдяки простій реалізації та високій швидкості обчислень евристичні методи використовуються в оптимізаційних задачах, у яких швидкість виконання важливіша за знаходження точного рішення. З іншого боку, коли досліджується конкуренція між різними гравцями ринку, підхід теорії ігор моделює їхню взаємодію, максимізуючи переваги кожного залученого гравця. Якщо деякі вхідні дані відсутні, алгоритми машинного навчання підходять для їх прогнозування на основі попередньо зібраних даних. Тому для різних типів задач оптимізації функціонування зарядної станції необхідно використовувати різні методи, в тому числі їх поєднання.

У роботі [47] встановлено, що використання акумуляторних батарей і джерел відновлюваної енергії на швидкісних зарядних станціях може знизити експлуатаційні витрати зарядної станції, а також має позитивний вплив на енергосистему. Для визначення оптимальної потужності генеруючої установки та типу акумуляторної батареї з урахуванням кількості циклів зарядки, глибини розряду та терміну служби батареї була сформульована задача MILP. Оптимальний розв'язок показує, що система накопичення енергії і ВДЕ можуть знизити витрати на 35%, а пікове навантаження може бути зменшено майже на 8%. В роботі [48] визначено оптимальний розмір і тип накопичувача енергії (махове колесо, свинцево-кислотна батарея,

літій-іонна батарея, ванадієво-відновна батарея), інтегрованою в зарядну станцію, з метою зменшення витрат на зарядку, а також зменшення негативного впливу на мережу. Для оптимальної конфігурації та управління агрегаторами EV з урахуванням обмежень розподільної мережі стохастична модель змішаного цілого нелінійного програмування (MINLP) була розв'язана за допомогою декомпозиції Бендерса, в якому керування заряджанням EV розраховувалося за допомогою моделі черги M/M/N/N з неоднорідним розподілом Пуассона. Основна задача - визначити економічний план роботи енергосистеми з урахуванням поведінки агрегатора EV. Змінні в основній задачі пов'язані з конфігурацією агрегаторів EV (розташування та кількість інтелектуальних лічильників, зарядних пристроїв та зарядної потужності). Підзадача - пошук оптимального розподілу електромобілів на основі конфігурацій та правил, зазначених у головній задачі. Моделювання показало, що ємність системи акумулювання на зарядній станції зменшується, якщо збільшується запас ходу автомобіля.

Якщо брати до уваги обчислювальний час великих задач оптимізації, евристичні алгоритми перевершують пряму оптимізацію. Рішення, знайдене евристичними алгоритмами може бути не найкращим, однак не повинно суттєво відхилятися від рішення, отриманого шляхом прямої оптимізації. У [49] автори розробили евристичний алгоритм, щоб отримати мінімальну вартість зарядки. Результати, отримані при виконанні алгоритму, планують типову схему зарядки. У дослідженні [50] представлений евристичний підхід, який називається алгоритмом пошуку графів, дозволяє клієнтам обирати зарядну діяльність EV. Одним із найпоширеніших евристичних алгоритмів є алгоритм рою частинок (Particle Swarm Optimization, PSO). Цей алгоритм складається з трьох етапів: самостійний пошук області розв'язку, оцінка зібраних даних і визначення найкращого результату, а також зміщення всіх агентів в пошуковій області на краще рішення. Багатоцільова оптимізація рою частинок в [51] використовується для визначення місця розташування зарядної станції електрокарів з урахуванням мінімізації втрат в мережі,

придбаної енергії від мережі, відхилення напруги, підвищення надійності електроживлення і зниження витрат на зарядку. Для вирішення проблеми перевантаження розподільної мережі через неконтрольовану зарядку електромобілів запропоновано стратегію розумної зарядки з можливістю надання послуг V2G [52]. Нелінійна задача вирішується за допомогою оптимізації рою частинок. Перевагами запропонованої моделі є зниження експлуатаційних витрат, перевантаженість мережі, втрати. В роботі [53] цільовою функцією є максимізація середнього SOC, враховуючи вартість енергії, ємність акумулятора та час зарядки, яка є нелінійною, тому ця задача вирішується з використанням PSO.

Агрегатор EV прагне купувати енергію на ринку «на добу наперед» (РДН) за найнижчою можливою ціною, маючи на меті мінімізувати відхилення від запланованого графіка в режимі реального часу. Агрегатор не має точної інформації про час прибуття і SoC кожного EV, що прибуде на станцію наступного дня. Агрегатор прогнозує споживання на основі отриманих попередніх знань від даних зарядки EV. Оскільки фактичний час прибуття та відправлення не відомий заздалегідь, евристичний алгоритм планує заряджання електромобіля на основі історичних даних та оновлює графік з урахуванням фактичного часу прибуття та відправлення, щоб мінімізувати витрати на зарядку. Оптимальна зарядка EV, яка відповідає всім технічним обмеженням в мережі, отримується метаевристичними методами, які забезпечують якісне рішення, дуже близьке до оптимального (або навіть оптимального) зі значно меншою кількістю обчислювальних ресурсів.

В роботі [54] було доведено, що використання класичних методів оптимізації не вирішують проблему рекомендації зарядної станції для водіїв з низьким рівнем заряду, і як результат запропоновано змодельовати задачу як гру з перевантаженнями, для якої існує принаймні одна рівновага Неша (тобто рішення, яке всі електромобілі вважають задовільним). Знайдене рішення дозволяє знизити затори на дорогах та споживання енергії, а також підвищити задоволення користувачів. В роботі [55] теорія некоопераційних

ігор була застосована для зменшення витрат на зарядку електромобілів без шкоди для розподільної мережі. Цільова функція вимірює, виграш індивідуального учасника процесу зарядки, при зміні власної стратегії, та відсутності змін стратегії інших учасників. Для пошуку оптимальної [56] був використаний децентралізований підхід теорії ігор, оптимізуючи взаємодію електромобілів із зарядною інфраструктурою. Зарядка виконується переважно від сонячних батарей, EV заряджаються від мережі тільки тоді, коли потреба в потужності не може бути задоволена від сонячної генерації. Також теорію ігор було використано для формування оптимальної цінової політики зарядних станції з ВДЕ з дотриманням всіх обмежень в системі в роботі [57] Доведено збіжність задачі на основі супермодульності. Метою кожної зарядної станції є вибір правильної цінової стратегії для EV, завдяки якій зарядна станція може використовувати енергію, отриману з відновлюваних джерел, для зарядки транспортних засобів або для продажу надлишкової енергії в мережу.

Методи машинного навчання також широко використовуються для оптимізації роботи зарядних станцій. Так, в роботі [58] для прогнозування початкового розташування EV було використано метод класифікації, а для розрахунку відстані, яку пройде EV, використано регресію. На основі спрогнозованих даних для розрахунку витрат на зарядку EV було використано пряму оптимізацію. Алгоритм ансамблевого прогнозування, який зменшує похибку прогнозування споживання енергії, використовується в [59] для зменшення пікового навантаження, вартості та дисперсію навантаження. В роботі [60] система управління заряджанням EV, заснована на машинному навчанні, використовується для направлення EV на зарядні станції, щоб мінімізувати дисперсію навантаження, втрати потужності, коливання напруги та вартість зарядки, враховуючи звичайну технологію зарядки, швидку зарядку та V2G. Алгоритм LSTM застосовується для класифікації швидкості заряджання та зарядної станції із середньою точністю 95% та дозволяє без втрати точності вводити невизначеність даних

навантаження. Як результат середня енергоефективність мережі знижується лише на 3,1% порівняно з базовою енергоефективністю без EV.

Висновки за розділом 2

1. Проаналізовано поточну мережеву інфраструктуру. Впровадження швидкісної зарядки, вимагає не лише вдосконалення системи зарядки, але й підвищення пропускної здатності електричної мережі. Споживання великої кількості струму з електричної мережі збільшить вартість генерації, особливо в години пік, і, як наслідок, збільшить вартість функціонування усієї системи.

2. Визначено, що електромобілі вважаються гнучким навантаженням, тому їх заряджання можна контролювати та переносити на інший час, щоб запобігти піковому навантаженню, запровадивши інтелектуальну структуру заряджання.

3. Аналіз світових трендів показав, що зростає потреба у громадських зарядних станціях. Зокрема, у густонаселених міських районах, де доступ до домашньої зарядки є більш обмеженим.

4. Проаналізовано звички автомобілістів та визначено, що середньодобова міську/приміська поїздка складає 20–40 км. Добова норма споживання енергії становить 3-6 кВт-год для звичайної їзди та 2-4 кВт-год для еко-драйву, відповідно.

5. Проаналізовано централізований та децентралізований підходи до управління заряджанням, які переслідують одну, або кілька цілей, серед яких мінімізація витрат; мінімізація втрат потужності; стабільність напруги; зниження пікового навантаження; скорочення довгих черг на зарядних станціях; а також зменшення перевантаження лінії, мережі та трансформатора.

6. Досліджено, що для планування оптимальної роботи зарядних станцій використовують різні методи оптимізації: традиційні та евристичні, методи машинного навчання та теорію ігор.

3. ОПТИМІЗАЦІЯ РОБОТИ ЗАРЯДНОЇ СТАНЦІЇ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

3.1 Характеристики зарядної станції постійного струму

Станція зарядки електромобілів базується на основі мікромережі постійного струму та в умовах обмеженої потужності, вона складається з фотоелектричного модуля, громадської мережі, електрохімічного накопичувача та електромобілів. Джерела мікромережі постійного струму підключаються до загальної шини постійного струму. На рис. 3.1 та 3.2 зображено архітектуру мікромережі постійного струму зарядної станції. Коли електромобіль прибуває, водій вибирає режим заряджання. Електроенергія, вироблена фотоелектричними джерелами, в основному призначена для зарядки електромобілів. Система накопичення є додатковим джерелом енергії для заряджання електромобілів або для поглинання надмірної енергії, виробленої фотоелектричними джерелами. Громадська мережа використовується як резервне джерело, що дозволяє фотоелектричним джерелам продавати надмірну енергію, або купувати в умовах нестачі. Якщо потужність PV нижча за потужність, яку потребують електромобілі, додаткова потужність, необхідна для зарядки електромобілів, забезпечується в першу чергу накопичувачем, а потім загальнодоступною мережею. Навпаки, надлишок енергії в першу чергу живить накопичувач, а потім вводиться в загальнодоступну мережу. Автомобілі є єдиним навантаженням.

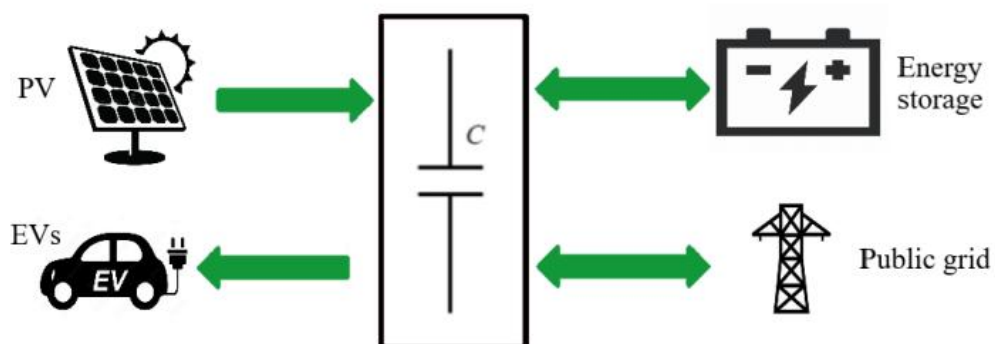


Рисунок 3.1 - Мікромережа постійного струму для станції зарядки електромобілів



Рисунок 3.2 - Візуалізація зарядної станції

Електрична схема архітектури мікромережі постійного струму наведена на рисунку 3.3. PV, електрохімічний накопичувач та EV підключені до однієї шини постійного струму через свої спеціальні статичні перетворювачі, функціями перемикання яких є f_{PV} , f_S , f_{EV} . Підключення до загальної мережі здійснюється за допомогою трифазного двонаправленого перетворювача змінного/постійного струму з наступними функціями перемикання: f_A , f_B , f_C . Усі ці функції перемикання дорівнюють 0 або 1. Напруга ланцюга постійного струму оцінюється приблизно в 400 В.

Індуктори та конденсатори використовуються для взаємодії з різними елементами. Припускаючи, що немає втрат через котушки індуктивності, конденсатори та кабелі, і нехтуючи загальними втратами в ланках перетворювача потужності, балансування потужності мікромережі постійного струму визначається рівнянням (3.1):

$$P_G + P_S = P_{PV} - P_{EV} - v_C \cdot C \frac{dv_C}{dt}, \quad (3.1)$$

де P_G , P_S , P_{EV} - потужність загальної мережі, накопичувача та системи зарядки EV відповідно. v_C - напруга шини постійного струму, C - ємність шини постійного струму. Щоб система працювала належним чином, її потрібно завжди брати до уваги. Балансування потужності показує, що

змінними регулювання є потужність громадської мережі та потужності накопичувачів у межах їхніх фізичних та функціональних обмежень.

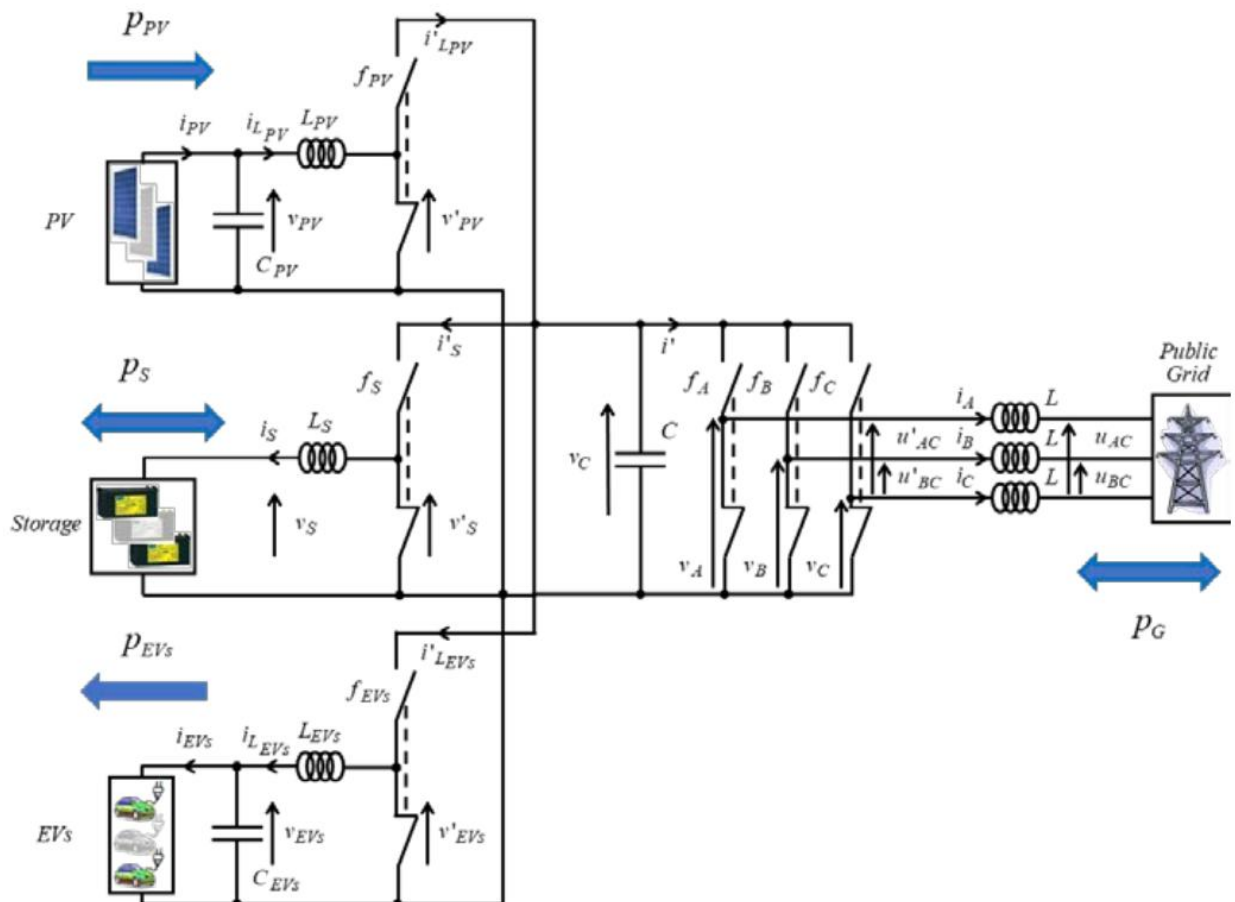


Рисунок 3.3 - Типова електрична схема архітектури мікромережі постійного струму

3.1.1 Фотоелектричний модуль. Запропонована зарядна станція для електромобілів базується на 86 фотоелектричних панелях (Risen RSM110-8-550M Mono PERC Half-Cell), потужність одного модуля становить 550Вт за стандартних умов сонячного випромінювання 1000 Вт/м² і температури навколишнього середовища 25 °С. Напруга визначається алгоритмом відстеження точки максимальної потужності (MPPT), рівняння (3.2).

$$\begin{aligned}\frac{dv_{PV}}{dt} &= \frac{i_{PV} - i_{LPV}}{C_{PV}} \\ \frac{di_{LPV}}{dt} &= \frac{v_{PV} - v'_{PV}}{L_{PV}} \\ v'_{PV} &= f_{PV}v_C \Rightarrow v'_{PV} = m_{PV}v_C \\ i'_{LPV} &= f_{PV}i_{LPV} \Rightarrow i'_{LPV} = m_{PV}i_{LPV} \\ m_{PV} &= \frac{1}{T} \int_0^T f_{PV} dt, m_{PV} \in [0,1]\end{aligned}\quad (3.2)$$

де v_{PV} та i_{PV} – напруга та струм на вході фотоелектричного перетворювача; L_{PV} та C_{PV} – фотоелектричний індуктор та конденсатор, відповідно; i_{PV} – струм, що забезпечується фотоелектричними джерелами; v'_{PV} та i'_{LPV} – напруга та струм на виході фотоелектричного перетворювача, T – період; t – змінна часу.

PV потужність розраховується в режимі MPPT, як задано (3.3) і (3.4):

$$P_{PV\ MPPT}(t_i) = P_{PV\ STC} * \frac{g(t_i)}{1000} * [1 + \gamma(T_{PV}(t_i) - 25)] * N_{PV} \quad (3.3)$$

$$T_{PV}(t_i) = T_{amb}(t_i) + g(t_i) * \frac{NOCT - T_{air_test}}{G_{test}} \quad (3.4)$$

де $P_{PV\ STC}$ - потужність PV за стандартних умов випробування (standard test conditions, STC); g - рівень інсоляції; $\gamma = -0,29\%/^{\circ}\text{C}$ – температурний коефіцієнт потужності; T_{PV} - це температура фотоелектричної комірки; N_{PV} - це кількість фотоелектричних панелей; T_{amb} - це температура навколишнього середовища; $NOCT = 41,5^{\circ}\text{C}$ - є номінальною робочою температурою комірки; $T_{air_test} = 20^{\circ}\text{C}$ – фіксована температура повітря; $G_{test} = 800\ \text{Вт}/\text{м}^2$ - це фіксоване сонячне опромінення для тестування.

3.1.2 Система накопичення енергії - акумуляторна батарея. Завдяки високій щільності енергії, високій потужності розряду, тривалому життєвому

циклу, швидкому заряджанню/розряджанню літій-іонний акумулятор домінує в портативному електронному секторі та став найкращим вибором в автомобільному секторі. Крім того, в Microgrid їх використовують як ESS, яка відіграє важливу роль в інтеграції відновлюваних джерел енергії. Крім того, діючи як буферна система для пом'якшення перевантаження мережі, ефективність енергосистеми покращується [61, 62]. Модель літій-іонної батареї базується на моделі батареї Tremblay [63].

Зарядка літій-іонних акумуляторів (в системі накопичення та електромобілях) відбувається за правилом CC/CV із трьома режимами зарядки (рис 3.4). У режимі CC зарядний струм залишається постійним, поки напруга не підніметься до напруги відключення. Коли батарея починає заряджатися, напруга є відносно низькою. Якщо струм заряджання непостійний, життєвий цикл батареї та зарядного пристрою буде скорочено. Коли батарея майже повністю заряджена, процес переходить у фазу постійної напруги (CV), метою якої є запобігання перезаряду батареї. У режимі CV напруга залишається постійною, а струм падає. Передбачається, що ця процедура CC/CV контролюється системою керування батареєю, яка вже інтегрована в систему батареї PEV [64,65].

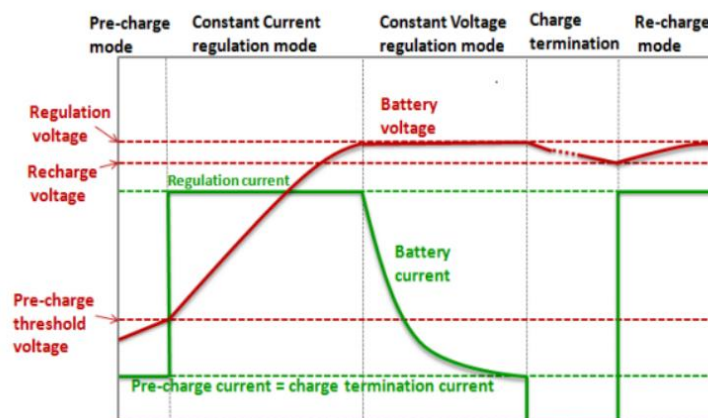


Рисунок 3.4 - Зміна струму та напруги при заряджанні літій-іонної батареї за правилом CC/CV [66]

Хоча зазвичай вивчаються моделі електричних схем для окремих елементів, у цьому дослідженні розглядаються акумуляторні батареї, що

складаються з декількох послідовно з'єднаних елементів, на прикладі акумуляторної батареї Nissan Leaf [64, 67].

Напруга v_{charge} та струм i_{charge} під час фази CC розраховується за формулами 3.5-3.6.

$$v_{charge}(t) = V_{OC}(SoC(t)) - Ri_{CC} \quad (3.5)$$

$$i_{charge}(t) = i_{CC} \quad (3.6)$$

$$t < t_s$$

де R – опір батареї (вважається постійним), а t_s позначає момент, коли напруга на клемі дорівнює заздалегідь визначеній максимальній напрузі V_{CV} . Напруга холостого ходу та струм під час стадії CC, відповідно, V_{OC} та i_{CC} , виражені в рівняннях (3.7) та (3.8):

$$V_{OC}(SoC(t)) = E_0 - \frac{K}{SoC(t)} + Ae^{(-BQ(1-SoC(t)))} \quad (3.7)$$

$$i_{CC} = \frac{V_0 - \sqrt{V_0^2 - 4P_B(0)R}}{2R} \quad (3.8)$$

де E_0 представляє постійну напругу батареї, K — постійну поляризації, а Q — номінальну ємність батареї. Параметри A і B представляють амплітуду та постійну часу, зворотні в експоненціальній зоні кривої $V_{charge} = f(SoC)$. Нарешті, $V_0 = V_{OC}(SoC(0))$ і $P_B(0)$ – профіль потужності акумулятора. Коли напруга досягає попередньо визначеного максимального рівня напруги V_{CV} , рівняння (3.9), фаза заряджання перемикається з CC на CV.

$$V_{CV} = V_{OC}(SoC(t)) - R \cdot 3600 \cdot Q \cdot SoC(t) \quad (3.9)$$

Напруга v_{charge} та струм i_{charge} під час фази CV розраховується за формулами 3.10-3.11

$$v_{charge}(t) = V_{CV} \quad (3.10)$$

$$i_{charge}(t) = 3600 \cdot Q \cdot SoC(t) \quad (3.11)$$

$$t \geq t_s$$

Зарядження та розрядження батареї необхідно контролювати, щоб гарантувати належну роботу, уникаючи надмірного заряду або глибокого розряду. Для цього використовують систему керування акумулятором для регулювання SOC, який становить від 20% до 80%, як показано в 3.12:

$$SoC(\%) = SoC_0(\%) - 100 \cdot \frac{\int idt}{Q} \quad (3.12)$$

Температура навколишнього середовища відіграє одну з ключових ролей при експлуатації літій-іонних батарей. Зарядження холодних літій-іонних акумуляторів призводить до металізації літійового покриття на аноді, збільшення SEI та прискорення деградації. Відповідно до співвідношення Арреніуса, на літійове покриття впливають кінетичні процеси, оскільки іонна провідність електроліту та реакції на графітових поверхнях значно знижуються зі зниженням температури.

C-rates контролюють швидкість заряду та розряду батареї. Ця характеристика відображає струм, який використовується для зарядження та розрядження акумулятора [68]. Ємність батареї, як правило, вимірюється в 1C, тобто повністю заряджена батарея ємністю 100 А·год повинна забезпечувати 100 А протягом однієї години. Та сама батарея повинна забезпечувати 150 А протягом 40 хвилин при зарядці/розрядці при 1,5C, а 66А протягом більше 90 хвилин при зарядці/розрядці при 0,66C. Моделювання потенціалу відкладення літію показало, що літій-іонну батарею можна заряджати при 25°C з 4C без відкладання металізованого літію. Навпаки, швидкість зарядження падає до 1,5C при 10°C і 0,66C при 0°C без

металізації літію. Вимірювання, проведене в Швеції [69], показало, що коли температура навколишнього середовища нижче 10°C , зарядний струм становить 25 А, тоді як коли температура навколишнього середовища вище 20°C , зарядний струм становить 125 А. На рис. 3.5 наведено графіки порівняння залежності потужності зарядки від часу для зими (а) та літа (б) [70].

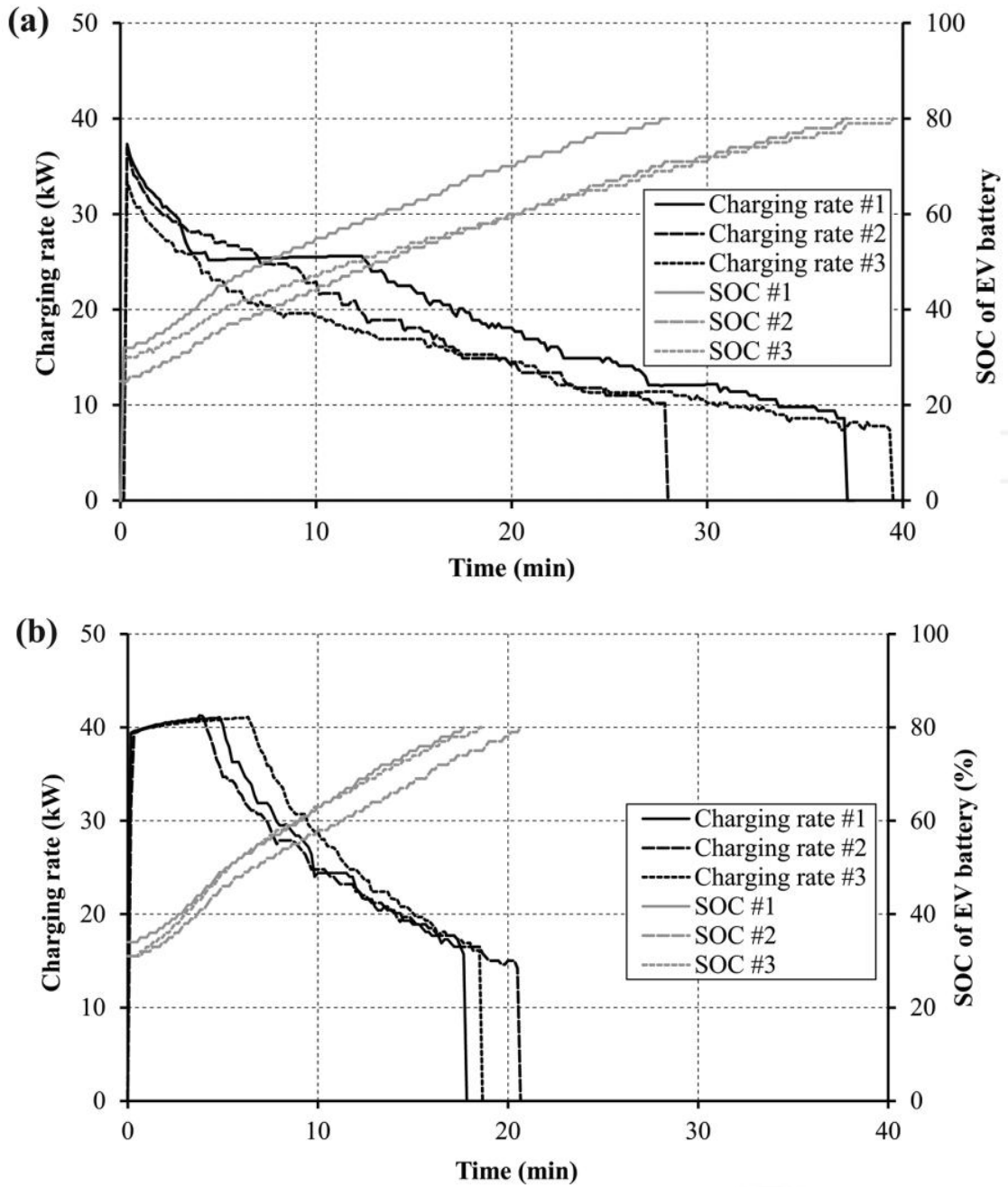


Рисунок 3.5 - Залежності потужності зарядки від часу для різних сезонів

Електрохімічний накопичувач є додатковим джерелом енергії для мікромережі постійного струму. Рівняння моделювання системи накопичення виражаються рівнянням (3.13), де \dot{v}_S та \dot{i}_S - напруга та струм акумулятора після перетворювача, v_S , i_S - напруга і струм накопичувача перед перетворювачем, m_S - керуюча змінна акумулятора, L_S - індуктор накопичувача.

$$\begin{aligned} \frac{di_S}{dt} &= \frac{\dot{v}_S - v_S}{L_S} \\ \dot{v}_S &= f_S v_C \Rightarrow \dot{v}_S = m_S v_C \\ \dot{i}_S &= f_S i_S \Rightarrow \dot{i}_S = m_S i_S \end{aligned} \quad (3.13)$$

$$m_S = \frac{1}{T} \int_0^T f_S dt, m_S \in [0,1]$$

Система управління батареєю, яка використовується в електромобілях, має на меті запобігти пошкодженню елементів акумулятора, обмежуючи силу струму залежно від температури акумулятора. Оскільки C-rate заряджання електромобілів зменшується, швидкість заряджання також значно падає, що спричиняє довший час заряджання. Наприклад, коли Nissan Leaf заряджається на швидкісній зарядній станції потужністю 50 кВт, він досягає рівня 80% SoC за 30 хвилин при кімнатній температурі. Навпаки, для досягнення того самого рівня потрібно більше 90 хвилин залежно від температури. Крім того, літій-іонний акумулятор електромобіля можна заряджати за допомогою швидкої зарядки до 80% SoC через обмеження безпеки. Струм необхідно зменшувати поступово, щоб не перевищувати максимальну напругу елемента при високих рівнях SoC. Як наслідок, для повної зарядки батареї потрібно більше часу.

У [71] автори додатково представляють статистичні моделі для оцінки тривалості заряджання для заданої температури навколишнього середовища,

рис 3.6. Використовуючи регресійний аналіз, розроблено наступну функцію для представлення кінцевого стану рівня заряду S для заданої тривалості заряджання t (у хвиликах), температури навколишнього середовища T (у градусах Цельсія) і початкового стану рівня заряду S_0 :

$$S(t) = \left(S_0 + \frac{\beta_0 + \beta_1 T}{\beta_2} \right) e^{\beta_2 t} - \frac{\beta_0 + \beta_1 T}{\beta_2} \quad (3.14)$$

де β_0 , β_1 та β_2 є параметрами та розраховуються як 0,015, 0,00034 та $-0,022$ відповідно. Відповідна тривалість заряджання для п'яти різних температур показана на малюнку. Можна помітити, що при нижчих температурах потужність заряджання значно знижується порівняно з м'якою погодою (наприклад, 20°C). Наприклад, досягнення 50% SoC займає приблизно 21 хвилину при 20°C , тоді як досягнення того самого SoC займає майже 60 хвилин при -5°C .

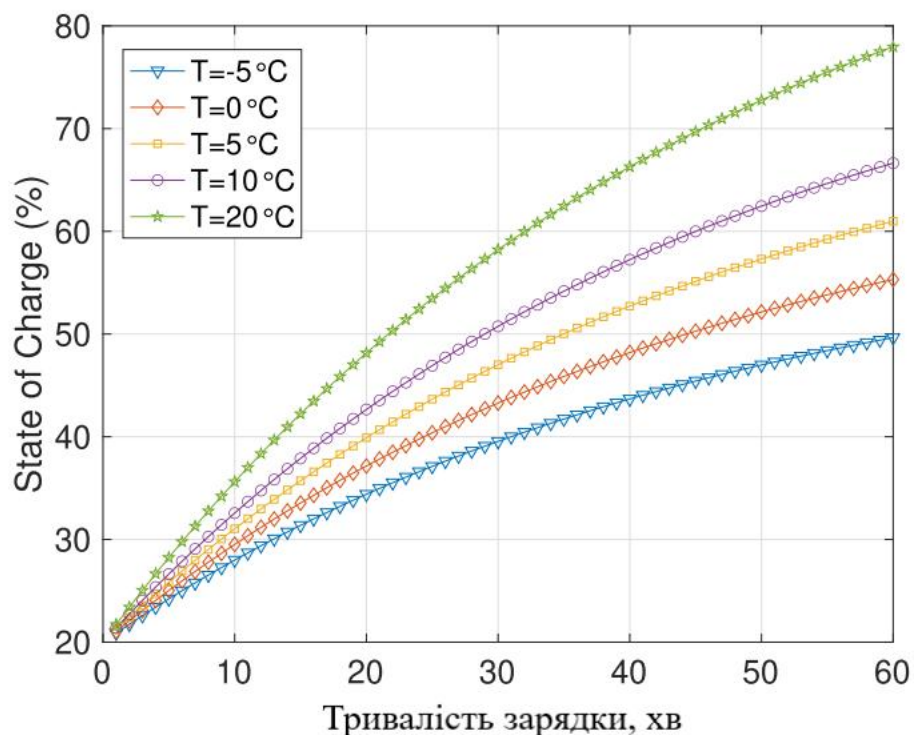


Рисунок 3.6 - Залежність SoC від тривалості зарядки при різних температурах для Nissan Leaf

3.1.3 Громадська мережа. Розглянута громадська мережа є мережею низької напруги, що характеризується міжфазною напругою 400 В і частотою 50 Гц. Моделювання підключення до громадської мережі базується на моделі інвертора. Таким чином, прості напруги трьох фаз, \dot{v}_A , \dot{v}_B , \dot{v}_C і відповідні функції перемикавання інвертора, f_A , f_B , f_C використовуються, як показано в рівнянні (3.15):

$$\begin{aligned} \dot{u}_{AC} &= \dot{v}_A - \dot{v}_C \\ \dot{u}_{BC} &= \dot{v}_B - \dot{v}_C \\ \dot{v}_A &= f_A v_C \\ \dot{v}_B &= f_B v_C \\ \dot{v}_C &= f_C v_C \end{aligned} \tag{3.15}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{v}_A \\ \dot{v}_B \\ \dot{v}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_A - f_C \\ f_B - f_C \end{bmatrix} v_C \Rightarrow \begin{bmatrix} \dot{v}_A \\ \dot{v}_B \\ \dot{v}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_A \\ m_B \end{bmatrix} v_C$$

$$\begin{bmatrix} m_A \\ m_B \end{bmatrix} = \frac{1}{T} \int_0^T \begin{bmatrix} f_A - f_C \\ f_B - f_C \end{bmatrix} dt, \quad \begin{bmatrix} m_A \\ m_B \end{bmatrix} \in [-1; 1]$$

де \dot{u}_{AC} , \dot{u}_{BC} - вихідні напруги інвертора між фазами А і С, і В і С відповідно. m_A та m_B - змінні керування інвертором, Струм інвертора \dot{i} виражається за допомогою струмів трьох фаз i_A , i_B , i_C відповідно до рівняння 3.16

$$\begin{aligned} \dot{i} &= f_A i_A + f_B i_B + f_C i_C, \quad i_A + i_B + i_C = 0 \\ \dot{i} &= (f_A - f_C) i_A + (f_B - f_C) i_B \\ \dot{i} &= m_A i_A + m_B i_B \end{aligned} \tag{3.16}$$

З'єднання між інвертором і громадською мережею здійснюється лініями електропередачі без спільної котушки індуктивності, але лише з власною

індукцією L і внутрішнім опором R . Співвідношення між напругами та струмами в лініях електропередач подано у рівнянні (3.17):

$$\begin{bmatrix} \dot{u}_{AC} \\ \dot{u}_{BC} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} u_{AC} \\ u_{BC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2L & L \\ L & 2L \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 2R & R \\ R & 2R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

де u_{AC} , u_{BC} представляють напруги загальної мережі між фазами А і С, а також В і С відповідно.

3.2 Оптимізаційна модель

Система управління енергією мікромережі відстежує та контролює роботу кожного модуля мікромережі постійного струму. На основі даних моніторингу система енергоменеджменту контролює потужність заряджання електромобіля та потужність, що постачається фотоелектричною системою, системою зберігання енергії або розподільною мережею. Система управління енергією мікромережі допомагає досягти розподіленої фотоелектричної енергії, оптимізації зарядки електромобілів і балансу мікромережі.

Агрегатор зарядної станції також може отримувати вигоду, беручи участь в енергетичному ринку і продаючи надлишкову енергію назад в мережу за допомогою концепції PV to Grid (PV2G). Використовуючи наявні дані щодо попиту на навантаження, фотоелектричної потужності та потужності накопичувача, доступної на зарядній станції, можна розрахувати оптимальний алгоритм роботи зарядної станції, максимізуючи прибуток.

Для планування графіку розподілу навантаження зарядної станції необхідно мати прогноз на добу наперед щодо генерації електроенергії фотоелектричними модулями.

Типовий профіль попиту на зарядку для швидкої зарядної станції на один день показаний на рис. 3.7. Як видно з кривої попиту на зарядку, пік попиту на зарядку спостерігається в той самий час, коли припадає пікове навантаження на мережу. Таким чином, пік попиту на зарядку збігається з

піковим навантаженням мережі та збільшує чистий пік системи. Цю надлишкову потребу в системі у формі зарядного навантаження можна задовольнити за допомогою встановленої сонячної фотоелектричної установки, оскільки вихідної потужності сонячної фотоелектричної енергії достатньо для задоволення потреб у зарядці в години пік сонячного випромінювання. Це усуне втрати на конверсії, які виникають, коли електромобілі заряджаються від мережі. Якщо попит на зарядку не надто високий, енергію, доступну від сонячної фотоелектричної системи, можна передати в мережу.

В роботах [72, 73] було створено моделі для прогнозування прибуття EV на станції зарядки з точки зору попиту на електроенергію. Відмінність цих моделей незначна. У [72] прогнози були зроблені на основі попиту на електроенергію для зарядки мільйона електромобілей. Так само в [73] було здійснено короткострокове прогнозування навантаження для зарядних станцій електромобілів з точки зору ймовірності прибуття електромобіля для заряджання протягом 24 годин. В дослідженні [74] ці дані були актуалізовані для зарядної станції місткістю 36 зарядних терміналів. Загалом графік навантаження можна представити у вигляді рис 3.7.

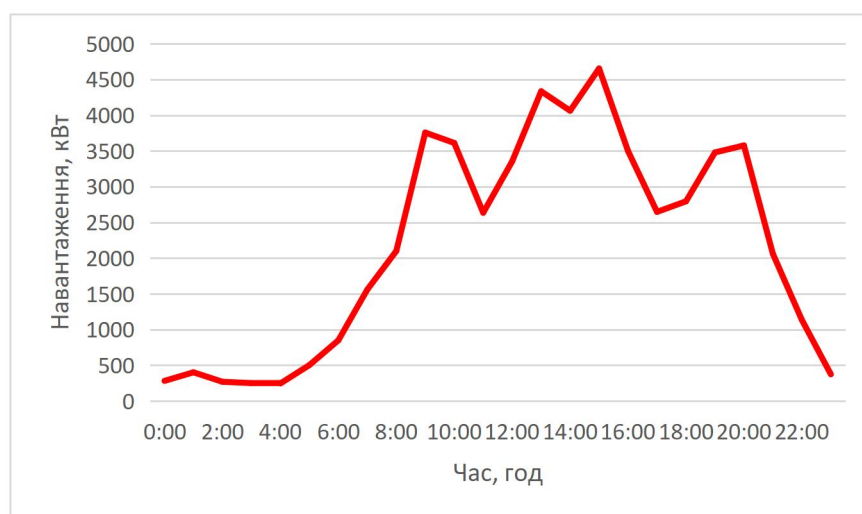


Рисунок 3.7 - Типовий графік навантаження зарядної станції місткістю 36 слотів

Загальна вартість енергії, C_{total} , враховує вартість електроенергії, що постачається з мережі, прибуток від введеної електроенергії в мережу, вартість зношення електрохімічного акумулятора накопичувача під час роботи. Таким чином, цільова функція полягає в мінімізації C_{total} , заданої рівняннями 3.18:

$$\begin{aligned} \min \rightarrow C_{total} &= C_G + C_S \\ C_G &= \sum_{t_i=t_0}^{t_F} [c_G(t_i) \cdot \Delta t \cdot (p_{G_S}(t_i) - p_{G_I}(t_i))] \\ C_S &= \sum_{t_i=t_0}^{t_F} [c_S(t_i) \cdot \Delta t \cdot (p_{S_C}(t_i) + p_{S_D}(t_i))] \end{aligned} \quad (3.18)$$

Де C_G , C_S - вартість енергії з мережі та вартість зношення стаціонарного сховища а c_G , c_S - відповідні тарифи.

На задачу мінімізації вартості накладаються наступні обмеження:

Фізичний закон балансування потужностей, рівняння 3.19:

$$P_{PV}(t_i) = P_S(t_i) + P_G(t_i) + P_{EV}(t_i), t_i = \{t_0, t_0 + \Delta t, t_0 + 2\Delta t, \dots, t_F\} \quad (3.19)$$

$$p_{PV}(t) = p_{PV_MPPT}(t) \quad (3.20)$$

Формула 3,20 вказує на те, що вихідна потужність фотоелектричного модуля розраховується за формулою 3.3

Стаціонарний накопичувач, представлений літій-іонними акумуляторами, повинен бути захищений від перезаряду і перерозряду; таким чином, максимальна потужність накопичувача P_{S_max} і максимальний і мінімальний рівень заряду накопичувача SOC_{S_max} і SOC_{S_min} повинні дотримуватися, щоб продовжити термін служби зберігання.

$$\begin{aligned} -P_{S_max} &\leq p_S(t) \leq P_{S_max} \\ SOC_{S_min} &\leq soc_S(t) \leq SOC_{S_max} \end{aligned} \quad (3.21)$$

Потужність, яка продається та купується з громадської мережі повинна знаходитись у встановлених межах:

$$-P_{G_S_max} \leq p_G(t) \leq P_{G_I_max} \quad (3.22)$$

Режим зарядки електромобіля:

$$0 \leq p_{EV}(t) \leq P_{EV_Mode_max} \quad \forall t \in [t_{arr}, t_{dep}] \quad (3.23)$$

де Mode - обраний режим заряджання: повільний, середній, швидкий.

Рівень зарядки електромобіля при відправленні повинен бути не більше обраного клієнтом SOC_{EV_des} та не більше максимально допустимого SOC_{EV_max} , що виражено рівнянням,

$$\begin{aligned} SOC_{EV_min} &\leq SOC_{EV_arr} \leq SOC_{EV_dep} \leq SOC_{EV_des} \leq SOC_{EV_max} \\ SOC_{EV}(t+1) &= SOC_{EV}(t) + \frac{p_{EV}(t)\Delta t}{E} \quad \forall t \in [t_{arr}, t_{dep}] \end{aligned} \quad (3.24)$$

3.3 Практичне вирішення задачі оптимізації для планування зарядки електромобілів

Сформульовану в 3.2 задачу оптимізації називають *dynamic economic dispatch*, оскільки графіки генерації та навантаження змінюються в часі. Розглядаючи формулювання з рівнянь із заданими обмеженнями/лімітами, видно, що задача має форму MILP. Мета полягає в тому, щоб мінімізувати вартість роботи станції (вартість первинної енергії), наведений у рівнянні (17), з урахуванням заданих обмежень.

В якості програмного засобу для оптимізації було обрано GEKKO [75] - об'єктно-орієнтовну бібліотеку Python, яка пропонує побудову моделей, інструменти аналізу та візуалізацію симуляції та оптимізації. GEKKO спеціалізується на задачах динамічної оптимізації для задач зі змішаними цілими числами, нелінійних і диференціальних алгебраїчних рівнянь (DAE). Поєднуючи підходи типових мов алгебраїчного моделювання (AML) і пакетів оптимального керування, GEKKO значно полегшує розробку та застосування таких інструментів, як предикативне керування нелінійною моделлю (NMPC), оптимізація в реальному часі (RTO), оцінка рухомого горизонту (MHE) і динамічне моделювання. В якості розв'язувача було обрано *interior-point solver* (IPOPT), який дуже часто використовується в подібних задачах. Програмна реалізація оптимізації наведена у додатку А.

У таблиці наведено випадково згенеровані варіанти: п'ять електромобілів прибувають на зарядку. Годинами пік умовно прийнято 12:00–13:00 та 15:00–16:00 (рис 3.9). Тарифи на енергію вибираються довільно таким чином, щоб визначити пріоритетність джерел, які використовуються для зарядки електромобілів. Вартість експлуатації ESS 1 грн/кВт·год, що є меншим за тариф на електроенергію з мережі, тому ESS в пріоритеті над GRID. Для моделей з TOU тариф наведено на рис 3.20. Тарифи на енергію враховуються лише на експлуатацію, а технічне обслуговування чи вирівняна вартість енергії не беруться до уваги, оскільки життєвий цикл джерел не враховується.

Таблиця 3.1 - Вхідні дані

$SOC_{S_{min}}$	20%	$P_{G_{max}}$	50 кВ
$SOC_{S_{max}}$	80%	$P_{S_{max}}$	34.5 кВ
SOC_{S_0}	50%	P_{PV_MPPT}	30 кВ
$P_{EV_{fast_{max}}}$	50 кВ	c_G	6 грн/кВт·год
$P_{EV_{aver_{max}}}$	22 кВ	c_{EV_p}	50 грн/кВт·год
$P_{EV_{slow_{max}}}$	7 кВ	c_S	1 грн/кВт·год

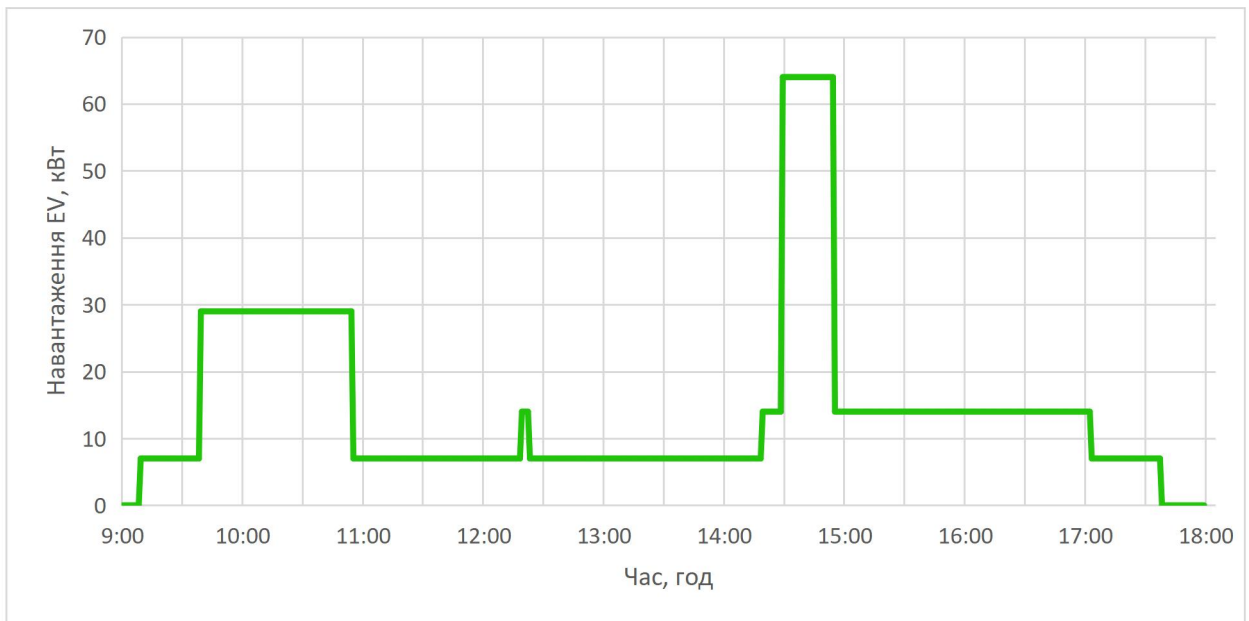


Рисунок 3.9 - Прогнозний графік навантаження автомобілів

Таблиця 3.2 - Профілі зарядки автомобілів

	E_{demand} , кВт·год	Час прибуття	Орієнтовний час зарядки	Потужність зарядки, кВт
EV1	22,5	09:10	3 год 13 хв	7
EV2	27,5	09:40	1 год 15 хв	22
EV3	33	12:20	4 год 43 хв	7
EV4	23	14:20	3 год 18 хв	7
EV5	20,5	14:30	25 хв	50

Усього було протестовано 4 моделі: з високою та низькою генерацією (літо/зима) та в умовах статичного та динамічного тарифу на електроенергію.

А) Влітку в умовах високої генерації зі статичним тарифом

Для моделювання сценарію роботи зарядної станції влітку були взяті дані генерації PV з [76] для 10 липня 2020 (рис 3.10).

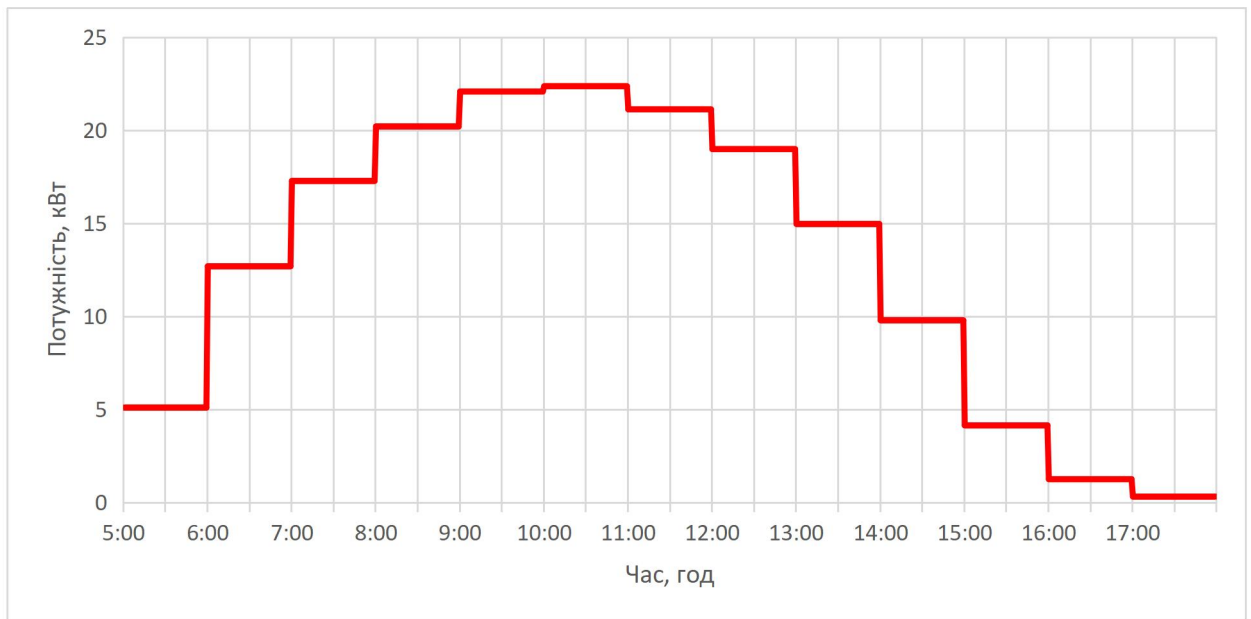


Рисунок 3.10 - Графік генерації електроенергії фотоелектричним модулем влітку

У режимі роботи без оптимізації (рис. 3.11) надлишкова енергія, яка генерується в ранкові години, заряджає стаціонарний накопичувач, доки не буде досягнут максимальний рівень SOC. Після цього, приблизно о 8:29 надлишкова енергія продається у мережу. Перше авто заряджається з повністю з PV. Нестача потужностей PV спостерігається, коли на зарядці стоять одночасно EV1 та EV2, тому дефіцитна потужність постачається з накопичувача. В 10:56, коли EV2 покидає станцію, потреби EV1 знову забезпечуються повністю з PV, надлишок заряджає ESS. Значний дефіцит потужності спостерігається в 14:30, коли на зарядку у швидкому режимі стає EV5. В цей час переважна потужність постачається з електрохімічного накопичувача, в межах гранично допустимої потужності 34,5 кВт. Решту постачає мережа та PV. EV3 та EV4 заряджаються переважно від ESS.

У режимі роботи з оптимізацією (рис 3.12) надлишкова енергія від PV, яка генерується у ранкові години продається у мережу. Для заряджання EV1 та EV2 використовується ESS. З 10:56 до 12:23 надлишкова енергія від PV знову продається у мережу. Наприкінці дня SOC ESS не вистачає для для зарядки EV4, тому його заряджає громадська мережа.

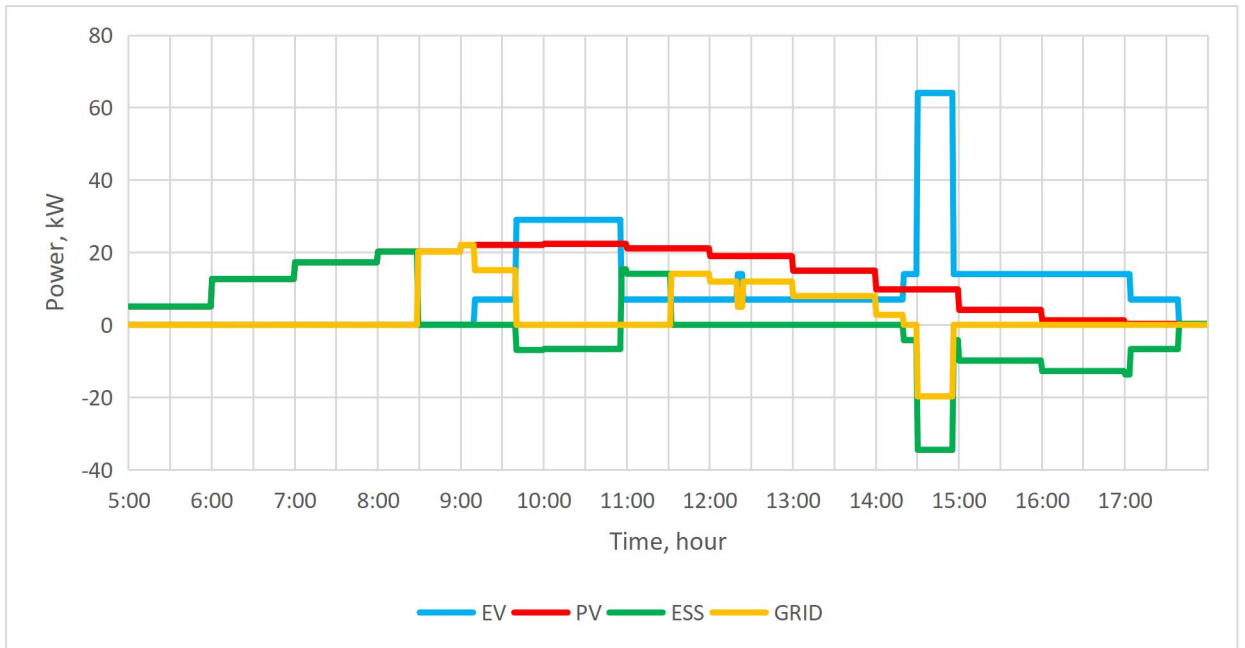


Рисунок 3.11 - Розподіл потужності в режимі роботи без оптимізації (літо)

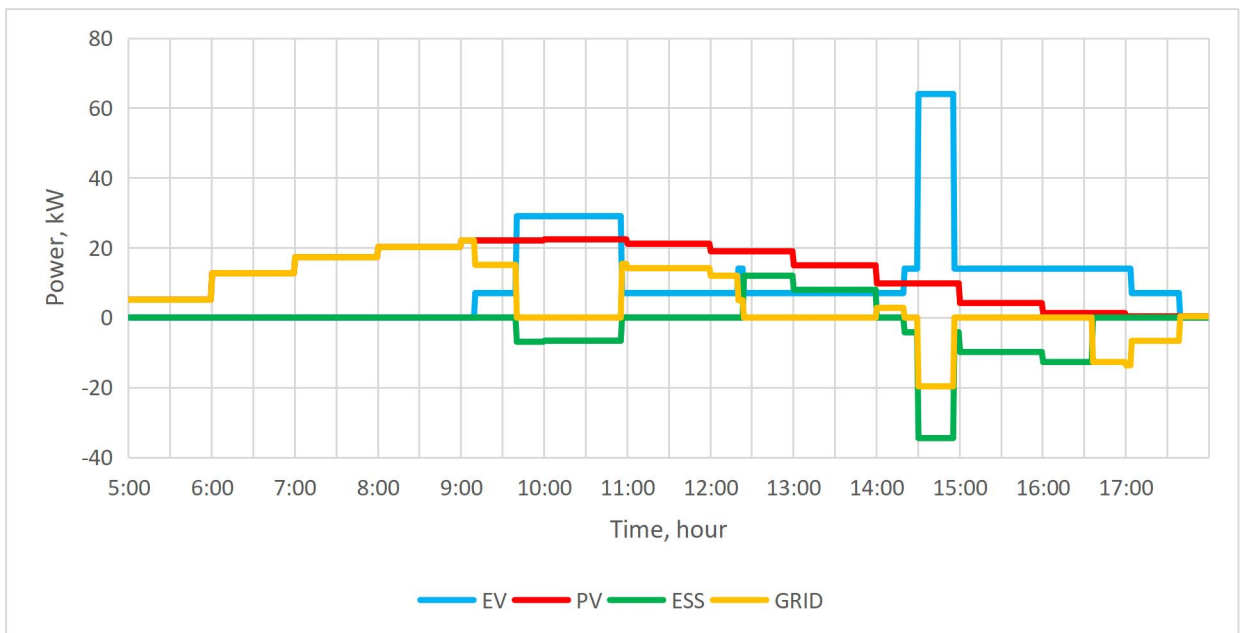


Рисунок 3.12 - Розподіл потужності в режимі роботи з оптимізацією (літо)

На рис. 3.13 показано еволюцію SOC ESS для моделей без (синій колір) та з оптимізацією (зелений колір) влітку.

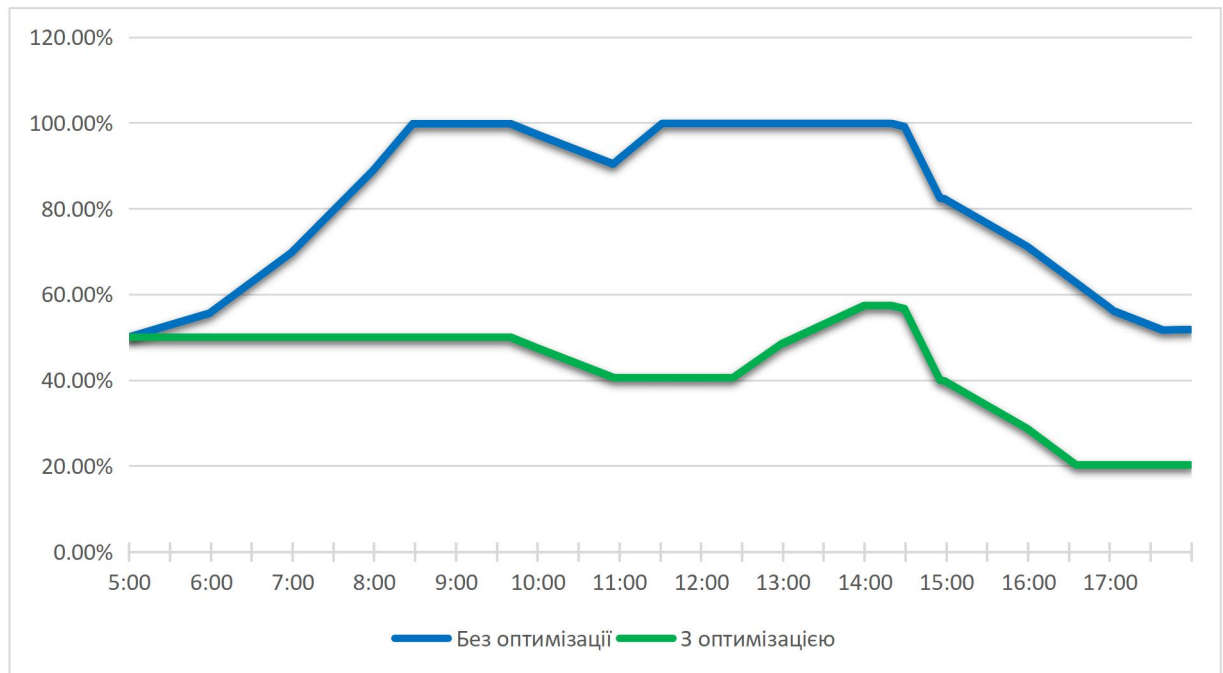


Рисунок 3.13 - Еволюція SOC влітку

У випадку роботи зарядної станції у режимі без оптимізації (рис 3.12), коли метою є максимізація автономності - використання мережі лише у випадку вичерпності можливостей PV та ESS, зарядна станція продасть у мережу 48,63 кВт·год та придбає 8,55 кВт·год. До акумулятора буде завантажено 53,46 кВт·год, з акумулятора взято 51,87 кВт·год. Враховуючи тариф на експлуатацію накопичувача, всього на роботу з акумулятором буде витрачено 105,34 грн. У підсумку чиста вартість первинної енергії для зарядної станції буде дорівнюватиме -135,15 грн. Тобто завдяки продажу електроенергії в громадську мережу станція заробить 135,15 грн.

На рис. 3.14 наведено порівняння розподілу електроенергії влітку. У режимі роботи зарядної станції з оптимізацією (рис 3.13), метою якої є мінімізація вартості первинної енергії, у громадську мережу буде продано 86,95 кВт·год, куплено - 18,46 кВт·год. Взято з ESS - 41,96 кВт·год, завантажено 15,14 кВт·год. Враховуючи тарифи, вартість первинної енергії для зарядної станції буде дорівнюватиме -353,87 грн. Прибуток станції у порівнянні з режимом роботи без оптимізації збільшиться у 2,62 рази.

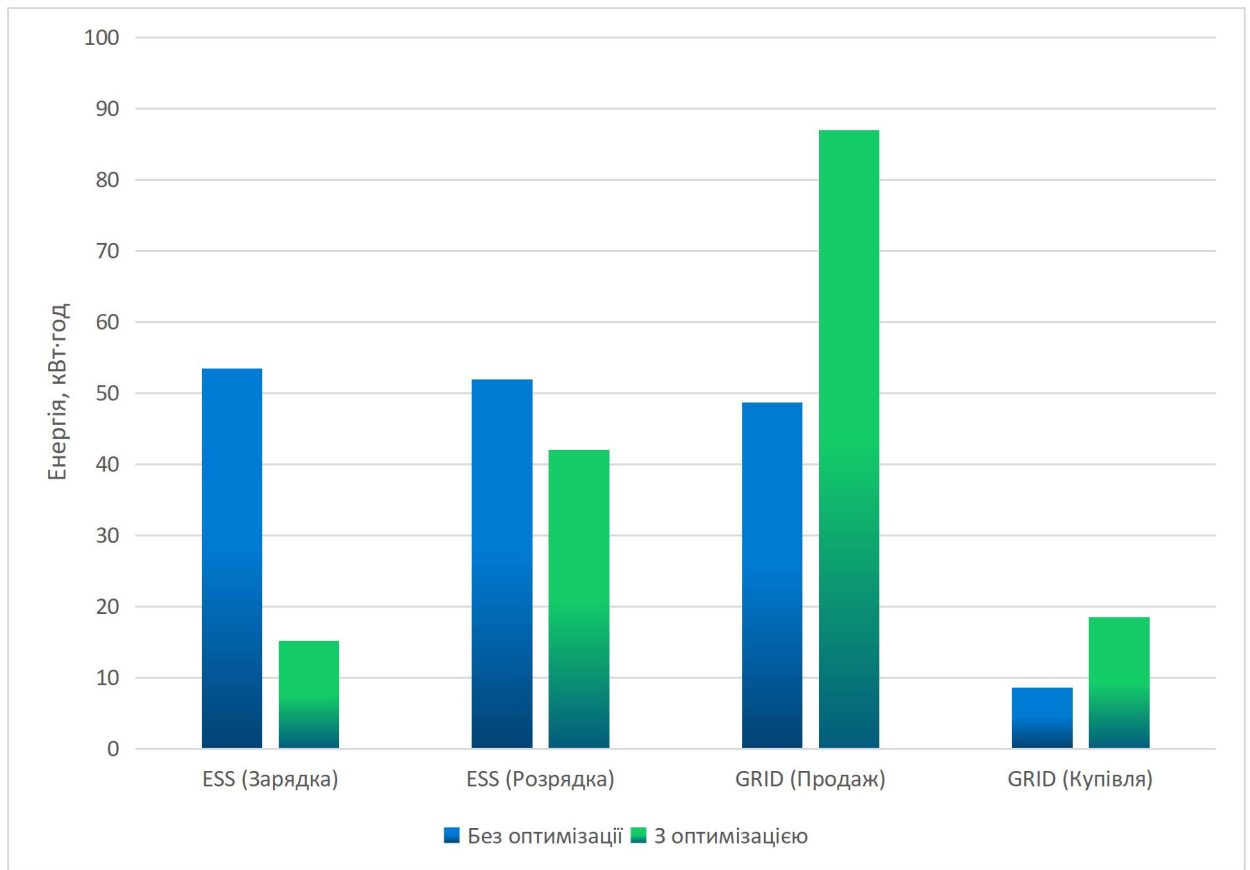


Рисунок 3.14 - Розподіл електроенергії влітку

Таблиця 3.3 - Оптимальні значення змінних задачі оптимізації влітку

	Без оптимізації	З оптимізацією
ESS (Зарядка) (кВт·год)	53,47	15,14
ESS (Розрядка) (кВт·год)	51,87	41,96
GRID (Продаж) (кВт·год)	48,63	86,95
GRID (Купівля) (кВт·год)	8,55	18,46
Вартість (грн)	-135,15	-353,87

Б) Взимку в умовах низької генерації

Для моделювання генерації PV взимку були взяті дані з [76] для 26 грудня 2020, рис 3.15.

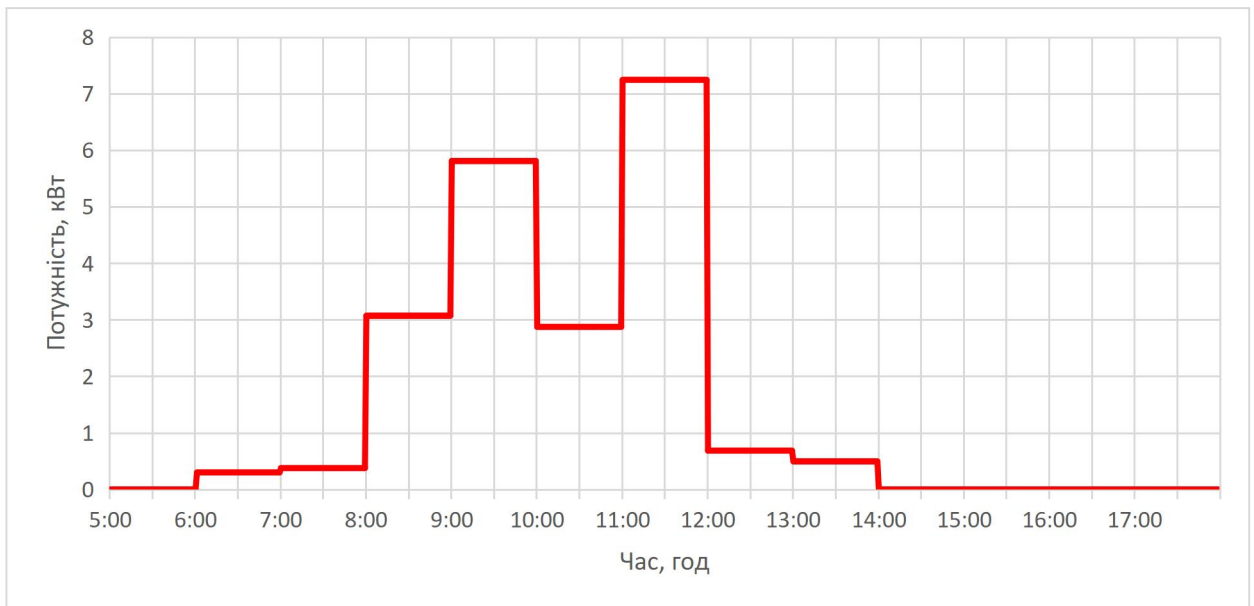


Рисунок 3.15 - Графік генерації фотоелектричним модулем взимку

Оскільки сонячної генерації взимку недостатньо для зарядки електромобілів, станція буде в основному користуватись енергією купленої з громадської мережі. В режимі роботи без оптимізації кількість енергії проданої у мережу дорівнює 0, тоді як з оптимізацією можна продати 4,71 кВт·год в громадську мережу.

У режимі роботи без оптимізації (рис. 3.16) надлишкова енергія, яка генерується в ранкові години, заряджає стаціонарний накопичувач. Для заряджання EV1 та EV2 потужності PV не вистачає, тому дефіцитна потужність постачається з накопичувача. О 10:53 SOC ESS досягає свого мінімуму, після цього дефіцитну потужність закупають з мережі. Об 11:00 генерація PV зростає, і надлишок заряджає ESS. Після 14:00 припиняється генерація PV, і решту EV повністю заряджає громадська мережа.

У режимі роботи з оптимізацією (рис. 3.17) надлишкова енергія в ранкові години продається в мережу. EV1 та EV2 через дефіцит генерації PV переважно заряджається з ESS, доки той не досягне мінімуму SOC. Після цього використовується GRID. Надлишкова енергія накопичується в ESS в період з 11 до 12 години.

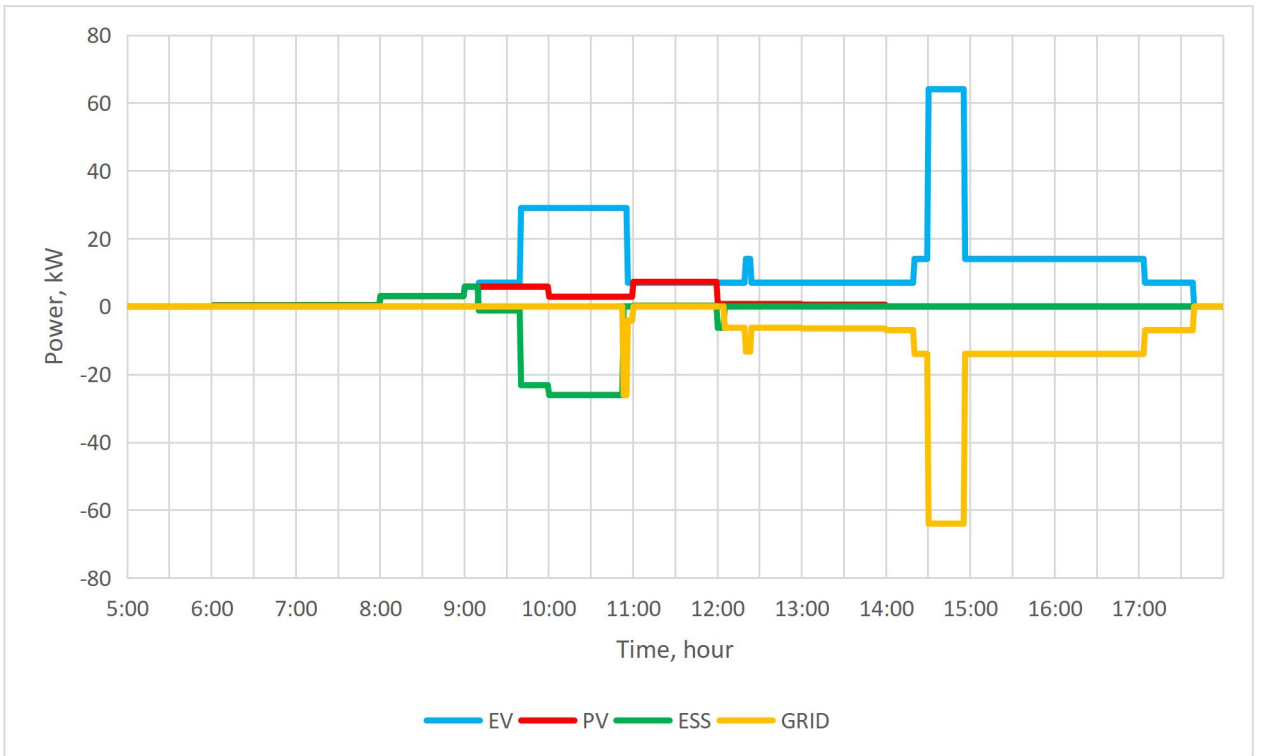


Рисунок 3.16 - Розподіл потужності в режимі роботи без оптимізації (зима)

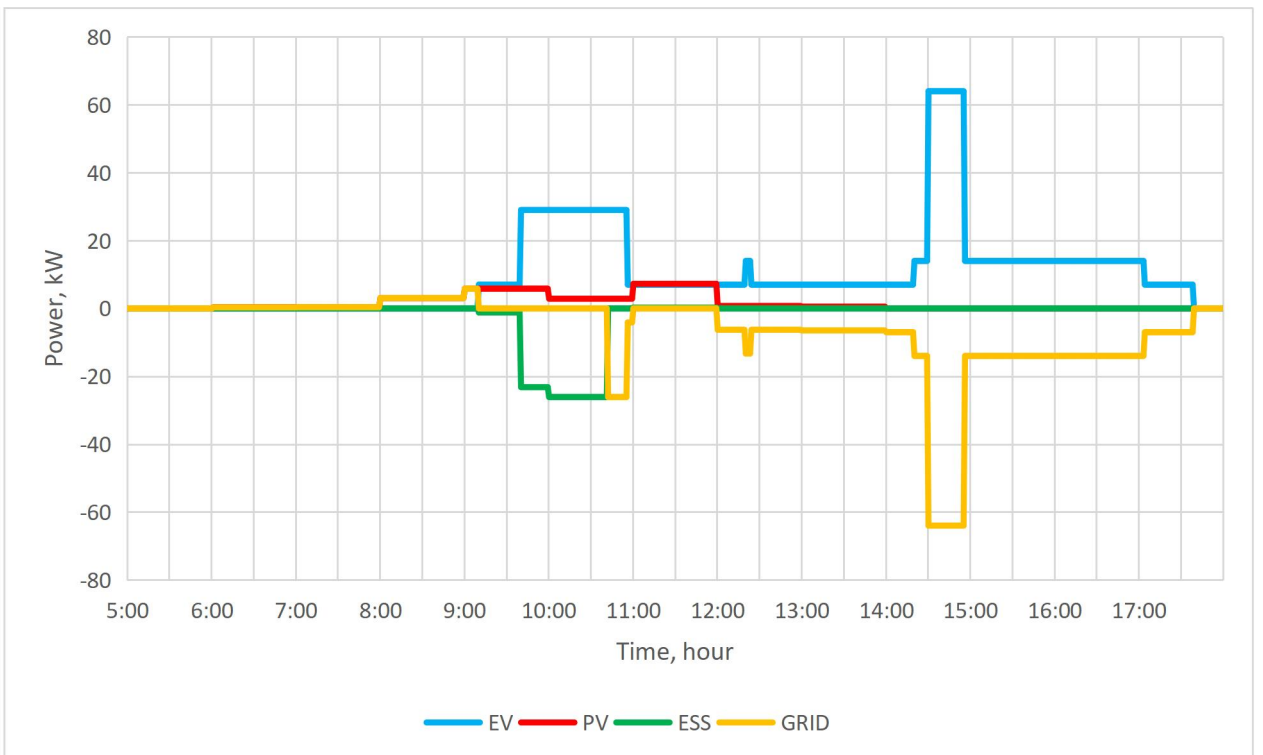


Рисунок 3.17 - Розподіл потужності в режимі роботи з оптимізацією (зима)

На рис 3.18 показано еволюцію SOC ESS для моделей без та з оптимізацією взимку.

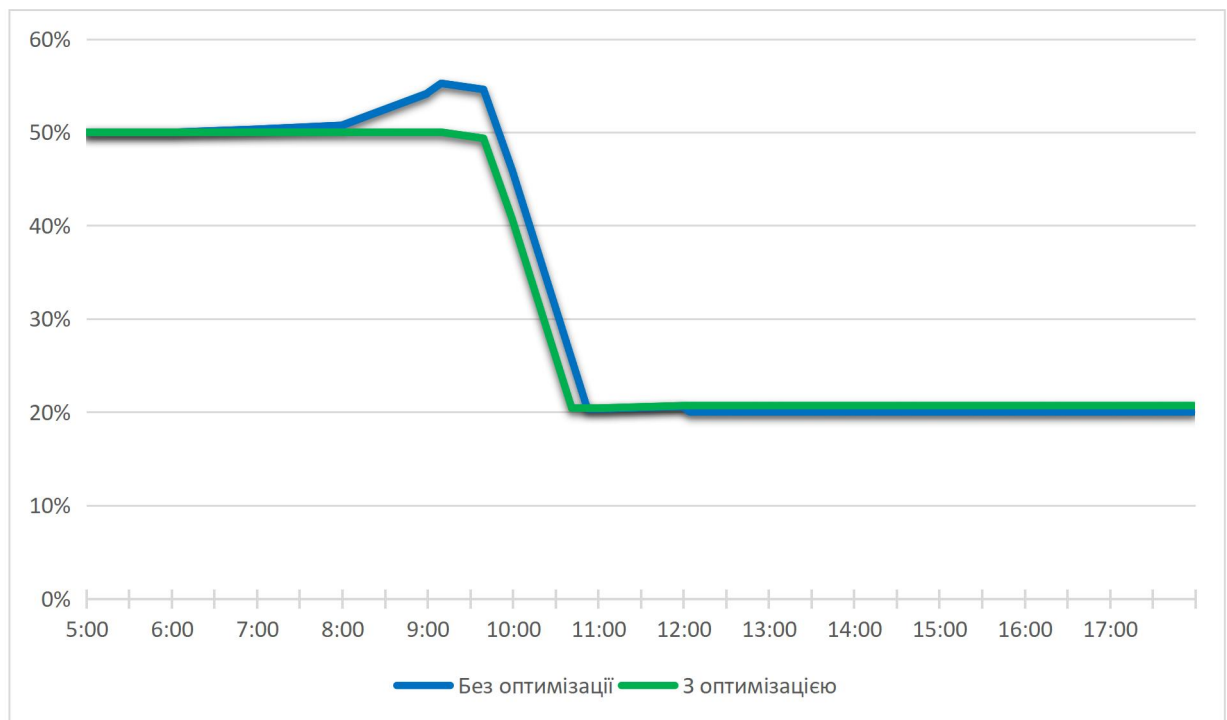


Рисунок 3.18 - Еволюція SOC взимку

На рис. 3.19 наведено порівняння розподілу електроенергії взимку. У режимі роботи зарядної станції з оптимізацією у громадську мережу буде продано 0 кВт·год, куплено - 80,7 кВт·год. Взято з ESS - 31,93 кВт·год, завантажено 4,95 кВт·год. Враховуючи тарифи, вартість первинної енергії для зарядної станції буде дорівнюватиме 521,03 грн. У режимі роботи зарядної станції з оптимізацією, метою якої є мінімізація вартості первинної енергії, у громадську мережу буде продано 4,71 кВт·год, куплено - 86 кВт·год. Взято з ESS - 26,61 кВт·год, завантажено 0,24 кВт·год. Враховуючи тарифи, вартість первинної енергії для зарядної станції буде дорівнюватиме 514,62 грн. Витрати станції у порівнянні з режимом роботи без оптимізації зменшаться на 6,41 грн.

Таблиця 3.4 - Оптимальні значення змінних задачі оптимізації взимку

	Без оптимізації	З оптимізацією
ESS (Зарядка) (кВт·год)	4,95	0,24
ESS (Розрядка) (кВт·год)	31,93	26,61
GRID (Продаж) (кВт·год)	0	4,71
GRID (Купівля) (кВт·год)	80,69	86
Вартість (грн)	521,03	514,62

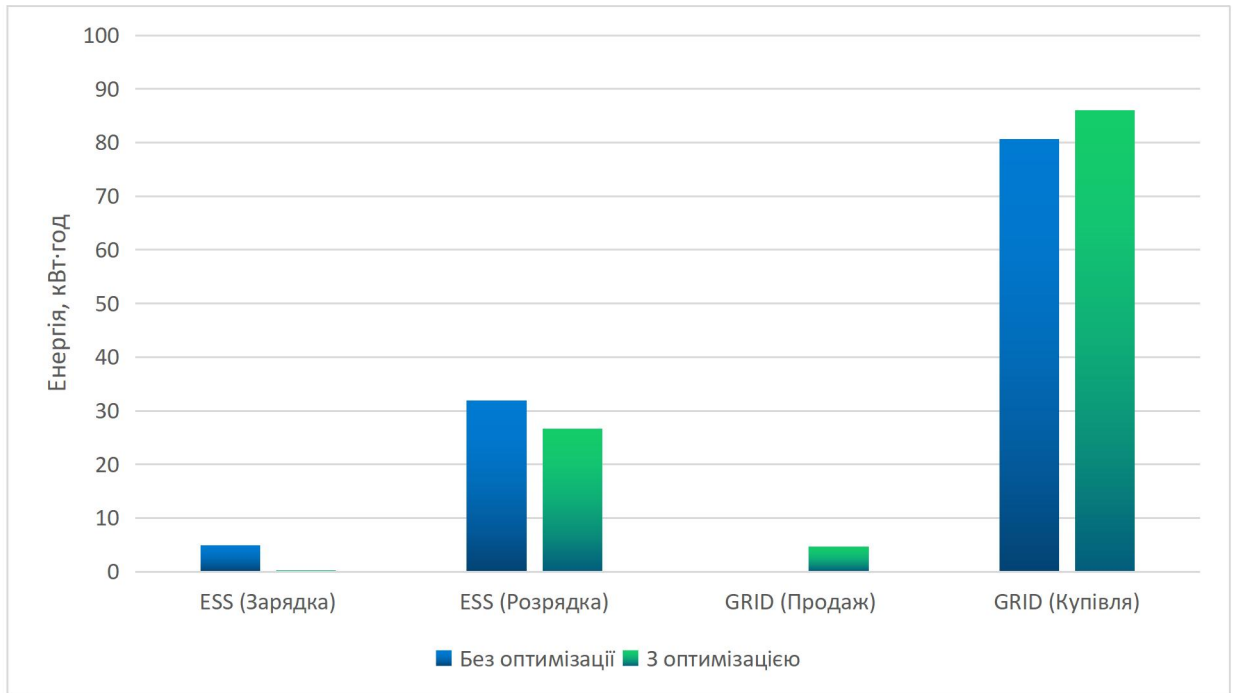


Рисунок 3.19 - Розподіл електроенергії взимку

В) Модель роботи станції в умовах динамічної зміни тарифу на РДН.

Ця модель дозволяє агрегаторам зарядних станцій брати участь в аукціонах та продавати "зелену" енергію за ринковими цінами. Модель роботи станції в умовах динамічної зміни тарифу на ринку "на добу наперед" побудована з використанням даних про вартість електроенергії на ринку "РДН" в Україні [77] для 10.07.2023 р, рис. 3.20.

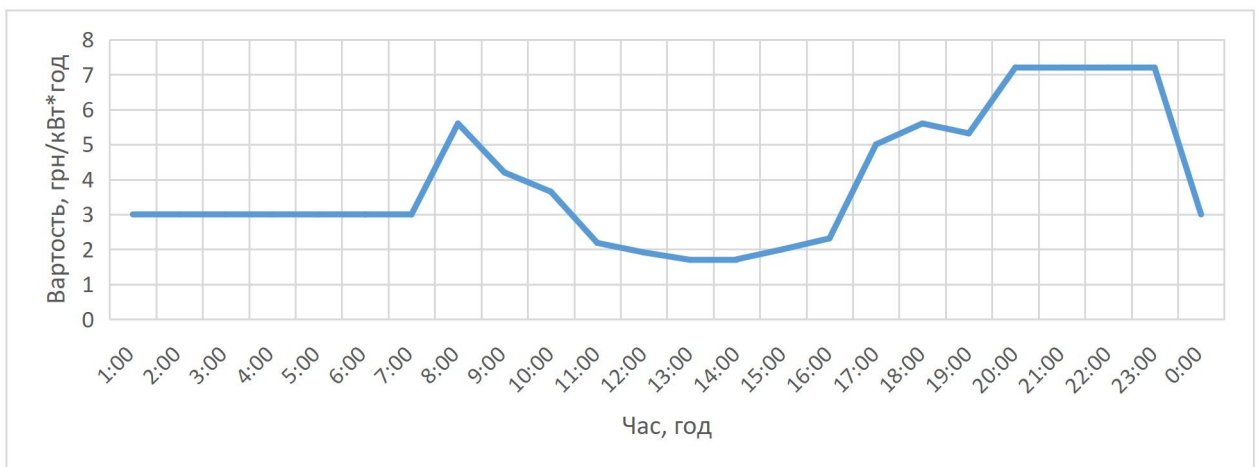


Рисунок 3.20 - Ціни на електроенергію для 10.07.2023

У режимі роботи з оптимізацією в літній період (рис. 3.21) надлишкова енергія, яка генерується в ранкові години, продається в мережу, оскільки саме в цей час спостерігаються пікові ціни на ринку. Для заряджання EV1 та EV2 потужності PV не вистачає, тому дефіцитна потужність постачається з накопичувача. Стационарний накопичувач заряджається в ті години, коли ціна на ринку найменша.

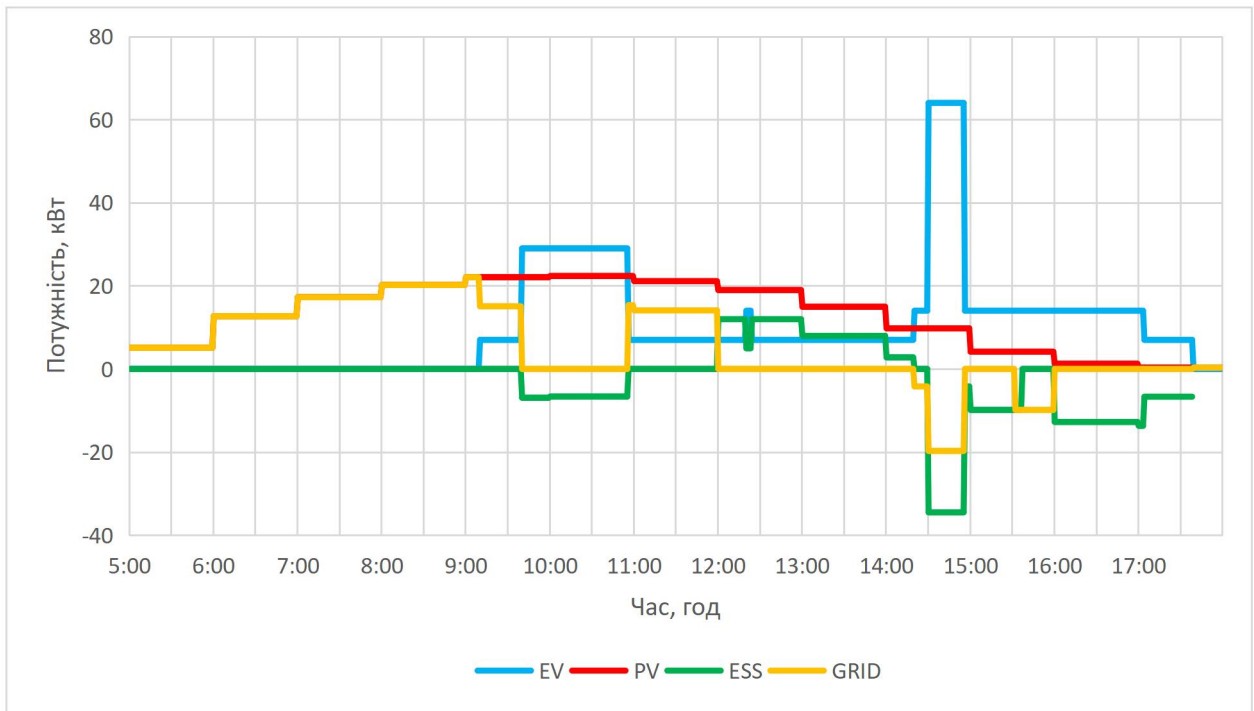


Рисунок 3.21 - Розподіл потужності в режимі роботи з оптимізацією в умовах динамічної зміни тарифу (літо)

У режимі роботи з оптимізацією в зимовий період (рис. 3.22) префіцитна енергія продається у мережу лише у ранковий час, що обумовлено недостатньою генерацією.

У режимі роботи зарядної станції з оптимізацією влітку до мережі буде продано 81,70 кВт·год, куплено 13,85 кВт·год. До ESS буде накопичено 20,39 кВт·год, взято з ESS 47,39 кВт·год. Взимку за умови таких самих TOU до мережі буде продано 4,71 кВт·год, куплено 80,60 кВт·год. До ESS буде накопичено 0,24 кВт·год, взято з ESS 27 кВт·год. Враховуючи TOU влітку

експлуатація станції принесе прибуток 207,60 грн, взимку вартість первинної енергії складе 177,47 грн.

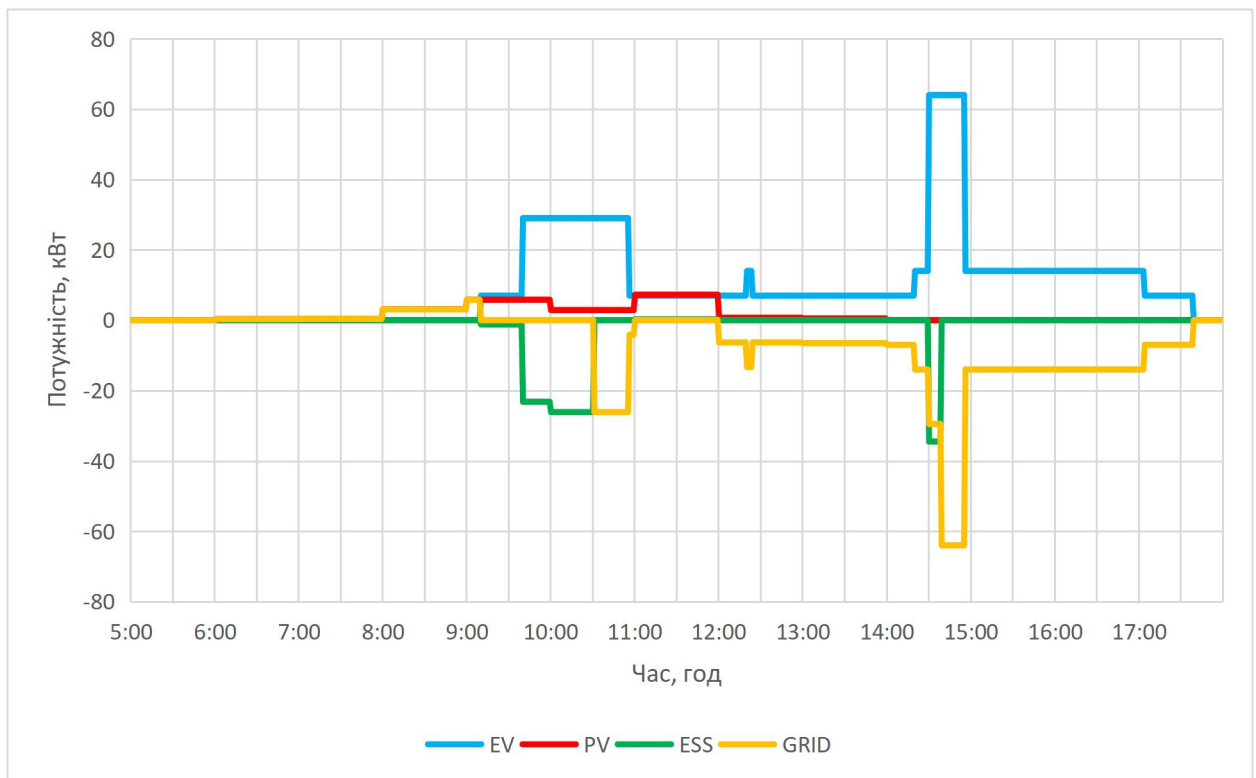


Рисунок 3.22 - Розподіл потужності в режимі роботи з оптимізацією в умовах динамічної зміни тарифу (зима)

Висновки за розділом 3.

1. Визначено архітектуру зарядної станції на основі мікромережі постійного струму, яка складається з фотоелектричного модуля, громадської мережі, електрохімічного накопичувача та електромобілів.

2. Проаналізовано заряджання літій-іонного електрохімічного накопичувача в залежності від температури навколишнього середовища.

3. Змодельовано роботу зарядної станції постійного струму в літній та зимовий періоди та в умовах статичних та динамічних тарифів на ринку.

4. Сформульовану задачу мінімізації вартості первинної енергії для зарядної станції у вигляді задачі MILP було вирішено за допомогою алгоритму IPOPT з використанням бібліотеки GEKKO, Python.

4. СТАРТАП-ПРОЄКТ

4.1 Інформаційна карта стартап-проєкту

Назва стартап-проєкту: Швидкісна зарядна станція електромобілів із архітектурою Microgrid з сонячною генерацією. Типовий вигляд запропонованого рішення зображено на рис. 4.1.



Рисунок 4.1 - Типовий вигляд зарядної станції стартап-проєкту

Проблематика, яку вирішує стартап-проєкт: Створення мережі швидкісних громадських зарядних станцій з сонячною генерацією.

Головні цілі та завдання проєкту: Для стейкхолдерів - покращене прогнозування та точне номінування обсягів сонячної генерації; Для партнерів - майданчик для продажу устаткування.

Назва та коротка характеристика мінімального життєздатного продукту стартапу (MVP): MVP - мережа зарядних станцій із інформаційною системою управління процесом диспетчеризації електрогенеруючих установок та заряджання електромобілів. Мінімальним життєздатним продуктом буде вважатися зарядна станція із сонячним навісом та системою накопичення електроенергії, яка буде під'єднана до громадської електромережі.

Програмне забезпечення станції буде диспетчеризувати продаж/купівлю електроенергії в залежності від поточного навантаження електромобілів.

Сфера застосування та функціональне призначення продукту: За словами міністра енергетики Германа Галущенко: «Створення національної інфраструктури зарядних станцій стане поштовхом не лише для поширення приватного електротранспорту, а й розвитку нових сервісів з використанням електромобілів, наприклад, у сфері доставки та логістики. Водночас розвиток електротранспорту і супутньої інфраструктури — це зменшення залежності України від викопного палива, зниження рівня шкідливих викидів в атмосферу, покращення загальної екологічної ситуації» [78]. Метою даного стартапу є створення мережі швидкісних зарядних станцій із сонячною генерацією, що буде спонукати автомобілістів до купівлі нових електрокарів замість автомобілів із двигуном внутрішнього згоряння. Однак, оскільки відновлювані джерела енергії мають стохастичну природу, залежать від погодних умов, постає проблема ефективного їх використання, шляхом диспетчеризації для покриття поточного навантаження та оптимального накопичення енергії. Функціональним призначенням даного стартапу є ефективна диспетчеризація енергії на зарядній станції.

Опис унікальних властивостей продукту стартапу: Даний продукт повинен забезпечити економічно вигідну та екологічну чисту генерацію відповідно до вимог споживачів.

4.2 Бізнес-модель стартапу

За стратегією «від клієнта» відповідно до шаблону “Canvas” побудовано бізнес-модель, табл. 4.1. Стратегія «від клієнта» передбачає, що вихідними блоками розробки бізнес-моделі є не готовий продукт, а загальне бачення «ніші». Вихідні блоки бізнес-моделі: проблема, рішення, споживчі сегменти (визначення споживачів), канали збуту (визначення потреб);

Таблиця 4.1 - Бізнес-модель стартап-проєкту

Проблема	Рішення	Канали збуту	Цінність пропозиції	Споживчі сегменти
1. Відсутність широкої мережі зарядної інфраструктури для електромобілів.	1. Мережа швидкісних зарядних станцій буде мати широке розповсюдження. Основними локаціями буде обрано територію біля торговельних та бізнес центрів.	Загальнодоступна мережа зарядних станцій, послугами якої може користуватися будь-хто охочий.	Забезпечення автомобілістів широкою мережею швидкісних зарядних станцій; зелена генерація, менша вартість первинної електроенергії, можливість заробляти на сонячній генерації	Власники електромобілів
2. Збільшення навантаження на електромережу.	2. Станція буде базуватися на архітектурі Microgrid із ВДЕ.			
3. Вартість первинної електроенергії.	3. Вартість первинної електроенергії може бути зменшена завдяки використанню ВДЕ та продажу енергії в мережу.			
4. Неєкологічність енергоресурсів.	4. Використання альтернативних відновлювальних джерел енергії.			

4.3 Технологічна здійсненність ідеї стартапу

Для визначення технологічної здійсненності ідеї стартапу необхідно провести аудит технології, за допомогою якої можна реалізувати ідею проекту (технології створення товару).

Визначення технологічної здійсненності ідеї проекту передбачає аналіз таких складових:

- за якою технологією буде виготовлено товар згідно ідеї проекту?
- чи існують такі технології, чи їх потрібно розробити/доробити?
- чи доступні такі технології авторам проекту?

У табл. 4.2 визначено необхідні для впровадження проекту технології та їх доступність на ринку.

Таблиця 4.1 - Доступність технологій		
Задача	Технології	Доступність технологій
Взяття в оренду землі під розбудову станції.	Укладання договору на оренду землі із власником.	Доступно
Побудова станції та встановлення обладнання.	Закупівля необхідного обладнання на ринку.	На ринку доступні для купівлі сонячні панелі, зарядні пристрої, тощо.
Підключення Microgrid системи до громадської енергосистеми.	Укладання договору із оператором системи розподілу.	Доступно
Участь на ринку електроенергії для продажу надлишкової генерації	Укладання договору із оператором ринку.	Доступно

Продовження таблиці 4.1

Задача	Технології	Доступність технологій
Диспетчеризація системи	Створення інформаційної системи енергетичного менеджменту, в основі якої будуть алгоритми оптимізації роботи станції.	Доступні рішення open_source для інтеграції алгоритмів в інформаційну систему.

4.4 Аналіз потенціалу ринку продукту стартапу

Для оцінювання потенціалу продажу необхідно визначити обсяг ринку та швидкість змін умов на потенційному ринку, табл. 4.3.

Зрілість ринку (галузі). Традиційно зрілість ринку визначають на основі:

Швидкість зміни умов ринку. Даний пункт визначається аналітичним шляхом на основі попередньої оцінки зрілості в галузі, а також аналізується швидкість змін попиту, технологій, факторів конкуренції, методи оцінювання яких наведено нижче.

Доступність інвестицій. Для реалізації стартапу доцільно проаналізувати й ринок інвестицій, особливо венчурних, щодо можливості подальшого їх залучення для фінансування.

Таблиця 4.3 - Аналіз потенціалу ринку продукту	
Критерій привабливості ринку	Опис
Швидкість зміни умов ринку	Активно впроваджуються станції зарядки електромобілів. Аналогічну станцію з ФЕС було відкрито в Івано-Франківську [79]
Доступність інвестицій	Інвестиції у галузі електромобільності зростають.

Аналіз попиту на інновації зводиться до пошуку незадоволених потреб споживачів, пропозиція на ринку товару, який задовольняє ці потреби, істотно підвищує шанси інноватора на успіх, особливо якщо техніко-економічні та якісні характеристики товару відповідають вимогам споживачів. На основі вирішуваної проблеми було визначено, що продукт задовольняє наявний попит. Також було оцінено ступінь задоволеності наявними продуктами на ринку, таблиця 4.4.

Таблиця 4.4 – Ступінь задоволеності наявними продуктами на ринку

Ознаки	Характеристика
Рівень задоволення потреби	Наявні пропозиції на ринку лише надають послуги зі встановлення та обслуговування зарядних станцій без ВДЕ [80].
Співвідношення ціна/якість продукції	Наявні пропозиції задовольняють співвідношення ціна/якість продукції
Рівень задоволеності тривалістю життєвого циклу продукту	Партнери (власники майданчиків для розміщення зарядної інфраструктури) не задоволені умовами співпраці.
Ступінь урізноманітнення продуктів	На ринку відсутня пропозиція з диспетчеризації зарядних станцій із ВДЕ.

Позиціонування продукту стартапу. З цією метою визначається концепція позиціонування для продукту стартапу.

1) нова суб-категорія. Передбачає, що продукт буде представлено тільки стартапом. Таке позиціонування може значимо змінити умови конкурентної боротьби і відсунути на задній план всіх конкурентів;

2) лідерство в вирішенні проблеми. Для оцінки цієї можливості перераховуються усі проблеми цільового ринку стартапу на основі ряду питань: Чи вирішують проблему поточні гравці ринку? Чи можливо

лідирувати стартапом у вирішенні проблеми споживача? Чи буде для цільової аудиторії привабливим така пропозиція?

3) створення протилежного способу. На ринку однорідних товарів, а також для продуктів, які не вирізняються за споживчими властивостями, найдоцільніше розглянути можливість дистанціювання від конкурентів за допомогою створення абсолютно нового, протилежного продукту;

4) відмінні характеристики. Передбачає всі можливі властивості, за якими продукт стартапу відрізняється від конкурентів;

5) використання прихованого попиту. Прихований попит – це нереалізовані потреби цільової аудиторії, які не можуть бути вирішені жодним товаром на ринку. Стартап може стати першим у вирішенні таких проблем і тим самим дистанціюватися від конкурентів.

Кожний параметр необхідно оцінити за 3-х бальною шкалою. Концепції, які набрали в результаті оцінки найбільшу кількість балів будуть найефективнішими стратегіями позиціонування. Відповідні дані відображені в таблиці 4.6.

Фінальним етапом ринкового аналізу можливостей впровадження проекту є складання SWOT-аналізу (матриці аналізу сильних (Strength) та слабких (Weak) сторін, загроз (Troubles) та можливостей (Opportunities) на основі виділених ринкових загроз та можливостей, та сильних і слабких сторін, табл. 4.7.

Перелік ринкових загроз та ринкових можливостей складається на основі аналізу факторів загроз та факторів можливостей маркетингового середовища. Ринкові загрози та ринкові можливості є наслідками (прогнозованими результатами) впливу факторів, і, на відміну від них, ще не є реалізованими на ринку та мають певну ймовірність здійснення. Наприклад: зниження доходів потенційних споживачів – фактор загрози, на основі якого можна зробити прогноз щодо посилення значущості цінового фактору при виборі товару та відповідно, – цінової конкуренції (а це вже – ринкова загроза).

Таблиця 4.6 - Оцінювання варіантів стратегії позиціонування продукту стартапу

Концепція позиціонування	Довіра	Однозначність	Унікальність	Запам'ятовуваність	Підкреслює властивості продукту	Відповідає потребам цільової аудиторії	Сума балів
Нова субкатегорія	1	3	3	2	3	3	15
Лідерство в вирішенні проблеми	1	1	3	2	3	3	13
Створення протилежного способу	1	3	3	2	3	3	15
Відмінні характеристики	1	2	3	2	3	3	14
Використання прихованого попиту	1	3	3	3	3	3	16

Таблиця 4.7 - SWOT-аналіз

Сильні сторони	Слабкі сторони
<ul style="list-style-type: none"> — Екологічно чиста зелена енергетика — Інноваційність — Автономність — Використання архітектури Microgrid 	<ul style="list-style-type: none"> — Залежність від бажання до співпраці партнерів — Обмежена кількість клієнтів - власників електромобілів — Висока вартість обладнання
Можливості	Загрози
<ul style="list-style-type: none"> — Можливість для агрегаторів зарядних станцій заробляти на продажі електроенергії — Використання новітніх технологій — Співпраця з автодилерами 	<ul style="list-style-type: none"> — Відсутність інвесторів та фінансування — Поява інших швидкісних станцій зарядки електромобілів із ВДЕ — Відсутність бажання до співпраці партнерів - власників ТРЦ, БЦ.

4.5 Організаційний план реалізації стартапу

Сформовано команду стартап-проєкту, таблиця 4.8, за етапами його реалізації, визначено завдання та учасників команди, складено календарний план. Описано процес реалізації етапів стартап-проєкту з визначенням завдань учасників команди та їх портретів.

Таблиця 4.8 - Команда стартап-проекту

Стадія стартап-проекту	Завдання учасників	Учасник	Освіта	Досвід роботи	Спеціалізовані знання
Pre-seed	Згенерувати ідею продукту стартапу, на основі комп'ютерного моделювання сформувавши модель прототипу	Стартапер	Комп'ютерні науки, енергетика	Інженера-конструктора 5 років	Інженерні
Seed	Визначити цілі; проаналізувати ринок; ідентифікувати і вивчити клієнта; довести попит на продукт	Стартапер-Бізнес-аналітик	Комп'ютерні науки, енергетика	Інженера-конструктора 5 років, Бізнес-аналітика - 2 роки	Аналітичні
MVP	Створення та тестування розумної електромережі та ПЗ для зарядної станції	Інженер-електрик, програміст	Енергетика, комп'ютерні науки	5 років	Інженерна
Product-market fit&product-channel fit	Провести рекламну компанію та залучити клієнтів	Маркетолог	Маркетинг	3 роки	PR, Customer-service
Запуск продукту	Посилено просувати продукт; пам'ятати про юридичні питання, наприклад про реєстрацію бренду; проводити ретельні тести, оптимізацію і усунення помилок; удосконалювати і продукт, і бренд компанії і, особливо, її лідерів; повторно шукати інвесторів	Стартапер, маркетолог, розробники, клієнт-менеджер, тестувальник + юрист, бухгалтер		5 років	Інженерна, економічна, маркетингова

Висновки за розділом 4

1) В даному розділі було запропоновано стартап-проект створення мережі швидкісних зарядних станцій електромобілів постійним струмом із ФЕС.

2) Проаналізувавши ринок послуг із заряджання електромобілів можна зробити висновок, що даний проект актуальний і пропонує принципово новий підхід, а саме встановлення фотоелектричних модулів на дахах громадських будівель ТРЦ та БЦ для зарядних станцій.

3) Цінністю даної пропозиції буде забезпечення автомобілістів широкою мережею швидкісних зарядних станцій; зелена генерація, менша вартість первинної електроенергії, можливість заробляти на сонячній генерації для агрегатора станції. Усі, необхідні для реалізації цього проекту, технології доступні на ринку. Серед ризиків даного стартап-проекту можна виділити обмеженість ринку клієнтів - власників електромобілів та залежність від бажання до співпраці партнерів. Однак, враховуючи світове зростання на ринку електромобілів, очікується, що ринок клієнтів буде зростати, тому власники ТРЦ та БЦ намагатимуться задовольнити своїх відвідувачів і охочіше йтимуть на співпрацю.

ВИСНОВКИ

За результатами виконання магістерської дисертації, в якій вирішена науково-технічна задача формування графіку розподілу потужностей зарядної станції на основі мікромережі з фотоелектричним модулем при мінімізації вартості первинної енергії для агрегатора зарядної станції, можна зробити наступні висновки:

1) Ринки електромобілів спостерігають експоненціальне зростання. Найбільший розвиток спостерігається на ринках Китаю, Європи та США. Кількість електроавтомобілів в Україні теж зростає: за перше півріччя 2023 року було ввезено 12844 електрокарів.

2) Серед основних способів заряджання електромобілів можна виділити три основні: Кондуктивний заряд - змінним і постійним струмом; індуктивний заряд - статичний і динамічний та технологія заміни батарей. Фізично виділяють бортові (заряджання змінним струмом) та зовнішні зарядні пристрої (заряджання постійним струмом) або їх комбінація у випадку індуктивного заряду. Зарядні станції класифікуються на основі рівня напруги, який відповідає номінальній потужності, де рівень 1 і рівень 2 відповідають переважно бортовій зарядці, а рівень 3 відповідає зовнішній зарядці.

3) Найперспективнішими є PVCS на основі MG постійного струму, які можуть працювати в острівному режимі або в режимі підключення до мережі. Фотоелектричні системи можуть бути встановлені на навісах для паркування автомобілів - карпортах або на дахах будівель.

4) Електромобілі вважаються гнучким навантаженням; отже, зарядку електромобілів можна контролювати та переносити на інший час, щоб запобігти піковому навантаженню, запровадивши інтелектуальну структуру заряджання.

5) Середньодобова міська/приміська поїздка складає 20–40 км. Добова норма споживання енергії становить 3-6 кВт-год для звичайної їзди та 2-4 кВт-год для еко-драйву, відповідно.

6) У середовищі інтелектуальної мережі скоординовану операцію заряджання електромобілів здійснюють двома способами: централізовано та децентралізовано, переслідуючи одну, або кілька цілей, серед яких мінімізація витрат; мінімізація втрат потужності; стабільність напруги; зниження пікового навантаження; скорочення довгих черг на зарядних станціях; а також зменшення перевантаження лінії, мережі та трансформатора.

7) Було здійснено моделювання роботи зарядної станції постійного струму в літній та зимовий періоди. Графік навантаження (паркування) електромобілів було обрано випадковим чином, беручи до уваги можливі пікові години. В моделі TOU тариф на електроенергію було взято з історичних даних торгів на РДН.

8) Сформулювавши задачу мінімізації вартості первинної енергії для зарядної станції у вигляді задачі MILP, її було вирішено за допомогою алгоритму *IPOPT* з використанням бібліотеки для задач оптимізації *GEKKO* на мові програмування *Python*. у програмному середовищі *Jupyter Notebook*.

9) Було запропоновано стартап-проект створення мережі швидкісних зарядних станцій електромобілів постійним струмом із ФЕС. Даний проект актуальний і пропонує принципово новий підхід, а саме встановлення фотоелектричних модулів на дахах громадських будівель ТРЦ та БЦ для зарядних станцій. Цінністю даної пропозиції буде забезпечення автомобілістів широкою мережею швидкісних зарядних станцій; зелена генерація, менша вартість первинної електроенергії, можливість заробляти на сонячній генерації для агрегатора станції.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Savio, D.A.; Juliet, V.A.; Chokkalingam, B.; Padmanaban, S.; Holm-Nielsen, J.B.; Blaabjerg, F. Photovoltaic Integrated Hybrid Microgrid Structured Electric Vehicle Charging Station and Its Energy Management Approach. *Energies* 2019, 12, 168. <https://doi.org/10.3390/en12010168>
2. IEA (2023), *Global EV Outlook 2023*, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2023>, License: CC BY 4.0
3. Реєстрації електромобілів за 6 місяців 2023 року, <https://fra.org.ua/uk/st/statistika/infoghrafika/reiestratsiyi-elektromobiliv-za-6-misiatsiv-2023-roku>
4. Рекордну кількість електроавто ввезли в Україну за півроку, <https://opendatabot.ua/analytics/electrocars-record-2023>
5. Introduction to Electric Vehicle Charging Method. <https://www.linkedin.com/pulse/introduction-electric-vehicle-charging-method-saket-dongre>
6. Brenna, M., Foiadelli, F., Leone, C. et al. Electric Vehicles Charging Technology Review and Optimal Size Estimation. *J. Electr. Eng. Technol.* 15, 2539–2552 (2020). <https://doi.org/10.1007/s42835-020-00547-x>
7. Understanding the Levels of Electric Vehicle charging, <https://www.linkedin.com/pulse/understanding-levels-electric-vehicle-charging-shradha-jadhav>
8. Savio Abraham D. et al., “Electric Vehicles Charging Stations’ Architectures, Criteria, Power Converters, and Control Strategies in Microgrids,” *Electronics*, vol. 10, no. 16, Art. no. 16, Jan. 2021, doi: 10.3390/electronics10161895.
9. Jin C. , Tang J., and Ghosh P., “Optimizing Electric Vehicle Charging: A Customer’s Perspective,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 62, no. 7, pp. 2919–2927, Sep. 2013, doi: 10.1109/TVT.2013.2251023.

10. Jha, M.; Blaabjerg, F.; Khan, M.A.; Bharath Kurukuru, V.S.; Haque, A. Intelligent Control of Converter for Electric Vehicles Charging Station. *Energies* 2019, 12, 2334. <https://doi.org/10.3390/en12122334>
11. Wang D., Sechilariu M., and Locment F., “PV-Powered Charging Station for Electric Vehicles: Power Management with Integrated V2G,” *Applied Sciences*, vol. 10, no. 18, Art. no. 18, Jan. 2020, doi: 10.3390/app10186500.
12. Sechilariu M., Locment F., and Darene N., “Social Acceptance of Microgrids Dedicated to Electric Vehicle Charging Stations,” 2018, pp. 1374–1379. doi: 10.1109/ICRERA.2018.8566787.
13. Jin C., Tang J., and Ghosh P., “Optimizing Electric Vehicle Charging: A Customer’s Perspective,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 62, no. 7, pp. 2919–2927, Sep. 2013, doi: 10.1109/TVT.2013.2251023.
14. Ghosh M., Chaves-Ávila J. P., Magdy G., and Sánchez-Miralles Á., “Review of Positive and Negative Impacts of Electric Vehicles Charging on Electric Power Systems,” *Energies*, vol. 13, no. 18, Art. no. 18, Jan. 2020, doi: 10.3390/en13184675.
15. Clairand J.-M., Rodríguez-García J., and Álvarez-Bel C., “Smart Charging for Electric Vehicle Aggregators Considering Users’ Preferences,” *IEEE Access*, vol. 6, pp. 54624– 54635, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2872725.
16. Chen C. and Duan S., “Microgrid economic operation considering plug-in hybrid electric vehicles integration,” *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, vol. 3, no. 2, pp. 221–231, Jun. 2015, doi: 10.1007/s40565-015-0116-0.
17. Zhang L., Brown T., and Samuelsen G. S., “Fuel reduction and electricity consumption impact of different charging scenarios for plug-in hybrid electric vehicles,” *Journal of Power Sources*, vol. 196, no. 15, pp. 6559–6566, 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2011.03.003>.
18. Rawat T. and Niazi K. R., “Comparison of EV smart charging strategies from multiple stakeholders’ perception,” *The Journal of Engineering*, vol. 2017, no. 13, pp. 1356–1361, 2017, doi: 10.1049/joe.2017.0553.

19. Saleh Cheikh Mohamad. Modeling and design of a photovoltaic infrastructure based on a microgrid and dedicated to electromobility. Electric power. Université de Technologie de Compiègne, 2022.

20. International Review on Integration of Electric Vehicles Charging Infrastructure with Distribution Grid, https://www.niti.gov.in/sites/default/files/2021-09/Report2-International-Review-on-Integration-of-Electric-Vehicles-charging-infrastructure-with-distribution-grid_GIZ-IITB-compressed.pdf

21. Zhang J., Yan J., Liu Y., Zhang H., and Lv G., “Daily electric vehicle charging load profiles considering demographics of vehicle users,” *Applied Energy*, vol. 274, p. 115063, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115063>.

22. Deilami, S.; Masoum, A.S.; Moses, P.S.; Masoum, M.A. Real-time coordination of plug-in electric vehicle charging in smart grids to minimize power losses and improve voltage profile. *IEEE Trans. Smart Grid* 2011, 2, 456–467.

23. Bessa, R.J.; Matos, M.A. Economic and technical management of an aggregation agent for electric vehicles: A literature survey. *Eur. Trans. Electr. Power* 2012, 22, 334–350.

24. Sundstrom, O.; Binding, C. Flexible charging optimization for electric vehicles considering distribution grid constraints. *IEEE Trans. Smart Grid* 2011, 3, 26–37

25. García-Villalobos, J.; Zamora, I.; Martín, J.I.S.; Asensio, F.J.; Aperribay, V. Plug-in electric vehicles in electric distribution networks: A review of smart charging approaches. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2014, 38, 717–731.

26. Zakariazadeh, A.; Jadid, S.; Siano, P. Multi-objective scheduling of electric vehicles in smart distribution system. *Energy Convers. Manag.* 2014, 79, 43–53.

27. Mwasilu, F.; Justo, J.J.; Kim, E.-K.; Do, T.D.; Jung, J.-W. Electric vehicles and smart grid interaction: A review on vehicle to grid and renewable energy sources integration. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2014, 34, 501–516.

28. Yong, J.Y.; Ramachandaramurthy, V.K.; Tan, K.M.; Mithulananthan, N. A review on the state-of-the-art technologies of electric vehicle, its impacts and prospects. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2015, 49, 365–385.
29. Amin, A.; Tareen, W.U.K.; Usman, M.; Ali, H.; Bari, I.; Horan, B.; Mekhilef, S.; Asif, M.; Ahmed, S.; Mahmood, A. A Review of Optimal Charging Strategy for Electric Vehicles under Dynamic Pricing Schemes in the Distribution Charging Network. *Sustainability* 2020, 12, 10160. <https://doi.org/10.3390/su122310160>
30. Bitencourt, L.d.A.; Borba, B.S.; Maciel, R.S.; Fortes, M.Z.; Ferreira, V.H. Optimal EV charging and discharging control considering dynamic pricing. In *Proceedings of the 2017 IEEE Manchester PowerTech*, Manchester, UK, 18–22 June 2017; pp. 1–6.
31. Masoum, A.S.; Deilami, S.; Moses, P.S.; Masoum, M.A.; Abu-Siada, A. Smart load management of plug-in electric vehicles in distribution and residential networks with charging stations for peak shaving and loss minimisation considering voltage regulation. *IET Gener. Transm. Distrib.* 2011, 5, 877–888.
32. Binetti, G.; Davoudi, A.; Naso, D.; Turchiano, B.; Lewis, F.L. Scalable real-time electric vehicles charging with discrete charging rates. *IEEE Trans. Smart Grid* 2015, 6, 2211–2220.
33. Hajforoosh, S.; Masoum, M.A.; Islam, S.M. Real-time charging coordination of plug-in electric vehicles based on hybrid fuzzy discrete particle swarm optimization. *Electr. Power Syst. Res.* 2015, 128, 19–29.
34. Hajforoosh, S.; Masoum, M.A.; Islam, S.M. Online optimal variable charge-rate coordination of plug-in electric vehicles to maximize customer satisfaction and improve grid performance. *Electr. Power Syst. Res.* 2016, 141, 407–420.
35. Mohsenian-Rad, A.-H.; Leon-Garcia, A. Optimal residential load control with price prediction in real-time electricity pricing environments. *IEEE Trans. Smart Grid* 2010, 1, 120–133.

36. Chen, Q., Wang, F., Hodge, B.-M., Zhang, J., Li, Z., Shafie-Khah, M., Catalao, J.P.S. Dynamic price vector formation model-based automatic demand response strategy for PV-assisted EV charging stations. *IEEE Trans. Smart Grid* 2017, 8, 2903–2915.
37. Crow, M. Cost-constrained dynamic optimal electric vehicle charging. *IEEE Trans. Sustain. Energy* 2016, 8, 716–724. 62.
38. Chen, J.; Yang, J.; Zhu, J.; Li, X.; Zeng, S.; Li, Y.; Wang, X.; Tang, Y. An optimal regional time-of-use charging price model for electric vehicles. In *Proceedings of the 2017 IEEE Power & Energy Society General Meeting, Chicago, IL, USA, 16–20 July 2017*; pp. 1–5.
39. Martinenas, S.; Pedersen, A.B.; Marinelli, M.; Andersen, P.B.; Træholt, C. Electric vehicle smart charging using dynamic price signal. In *Proceedings of the 2014 IEEE International Electric Vehicle Conference (IEVC), Florence, Italy, 17–19 December 2014*; pp. 1–6.
40. Misra, S.; Bera, S.; Ojha, T. D2P: Distributed dynamic pricing policy in smart grid for PHEVs management. *IEEE Trans. Parallel Distrib. Syst.* 2014, 26, 702–712.
41. Deilami, S.; Masoum, A.S.; Moses, P.S.; Masoum, M.A. Real-time coordination of plug-in electric vehicle charging in smart grids to minimize power losses and improve voltage profile. *IEEE Trans. Smart Grid* 2011, 2, 456–467.
42. Soltani, N.Y.; Kim, S.-J.; Giannakis, G.B. Real-time load elasticity tracking and pricing for electric vehicle charging. *IEEE Trans. Smart Grid* 2014, 6, 1303–1313.
43. Yin, Y.; Zhou, M.; Li, G. Dynamic decision model of critical peak pricing considering electric vehicles' charging load. In *Proceedings of the International Conference on Renewable Power Generation (RPG 2015), Beijing, China, 17–18 October 2015*.
44. Yang, J.; Xu, Y.; Yang, Z. Regulating the collective charging load of electric taxi fleet via real-time pricing. *IEEE Trans. Power Syst.* 2016, 32, 3694–3703

45. Zhang, X.; Liang, Y.; Zhang, Y.; Bu, Y.; Zhang, H. Charge pricing optimization model for private charging piles in Beijing. *Sustainability* 2017, 9, 2075
46. Tareen, W.U.K.; Mekhilef, S. Three-phase Transformerless Shunt Active Power Filter with Reduced Switch Count for Harmonic Compensation in Grid-Connected Applications. *IEEE Trans. Power Electron.* 2018, 33, 4868–4881.
47. Moradzadeh M. and Abdelaziz M. M. A., “A New MILP Formulation for Renewables and Energy Storage Integration in Fast Charging Stations,” *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 6, no. 1, pp. 181–198, 2020.
48. Negarestani S., Fotuhi-Firuzabad M., Rastegar M., and RajabiGhahnavieh A., “Optimal sizing of storage system in a fast charging station for plug-in hybrid electric vehicles,” *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 2, no. 4, pp. 443–453, 2016.
49. Cao, Y.; Tang, S.; Li, C.; Zhang, P.; Tan, Y.; Zhang, Z.; Li, J. An optimized EV charging model considering TOU price and SOC curve. *IEEE Trans. Smart Grid* 2011, 3, 3
50. Mierau, M.; Kohrs, R.; Wittwer, C. A distributed approach to the integration of electric vehicles into future smart grids. In *Proceedings of the 2012 3rd IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT Europe)*, Berlin, Germany, 14–17 October 2012; ; pp. 1–7.
51. Hadian E., Akbari H., Farzinfar M., and Saeed S., “Optimal Allocation of Electric Vehicle Charging Stations With Adopted Smart Charging/Discharging Schedule,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 196 908 - 196-919, 2020.
52. Deb S., Goswami A. K., Harsh P., J. P. Sahoo, R. L. Chetri, R. Roy, and A. S. Shekhawat, “Charging Coordination of Plug-In Electric Vehicle for Congestion Management in Distribution System Integrated with Renewable Energy Sources,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 56, no. 5, pp. 5452–5462, 2020.

53. Su, W. and Chow, M.Y. (2011). Performance evaluation of a phev parking station using particle swarm optimization. In Power and Energy Society General Meeting, 2011 IEEE, 1–6. IEEE.

54. Malandrino F.; Casetti C.; Chiasserini C.F.; Reineri M. (2015). A Game-theory Analysis of Charging Stations Selection by EV Drivers. In: Performance Evaluation, vol. 83-84, pp. 16-31. - ISSN 0166-5316

55. Li J., Li C., Xu Y., Dong Z. Y., Wong K. P., and Huang T., “Noncooperative Game-Based Distributed Charging Control for Plug-In Electric Vehicles in Distribution Networks,” IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 14, no. 1, pp. 301–310, 2018.

56. Alghamdi T. G., Said D., and Mouftah H. T., “Decentralized gametheoretic scheme for D-EVSE based on renewable energy in smart cities: A realistic scenario,” IEEE Access, vol. 8, pp. 48 274–48 284, 2020.

57. Lee W., Xiang L., Schober R., and Wong V. W. S., “Electric Vehicle Charging Stations With Renewable Power Generators: A Game Theoretical Analysis,” IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 6, no. 2, pp. 608–617, mar 2015. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6987327/>.

58. Aguilar-Dominguez D., Ejeh J., Dunbar A. D., and Brown S. F., “Machine learning approach for electric vehicle availability forecast to provide vehicle-to-home services,” Energy Reports, vol. 7, pp. 71–80, 2021, 5th Annual CDT Conference in Energy Storage and Its Applications. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484721001517>

59. Chung Y.-W., Khaki B., Li T., Chu C., and Gadh R., “Ensemble machine learning-based algorithm for electric vehicle user behavior prediction,” Applied Energy, vol. 254, p. 113732, 2019. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261919314199>

60. Shibl, M.; Ismail, L.; Massoud, A. Electric Vehicles Charging Management Using Machine Learning Considering Fast Charging and Vehicle-to-Grid Operation. Energies 2021, 14, 6199. <https://doi.org/10.3390/en14196199>

61. Das C.K., Bass O., Kothapalli G., Mahmoud T.S., Habibi D., Overview of energy storage systems in distribution networks: Placement, sizing, operation, and power quality, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 91 (2018) 1205-1230.
62. Zeraati M., Golshan M.E.H., Guerrero J.M., Distributed Control of Battery Energy Storage Systems for Voltage Regulation in Distribution Networks With High PV Penetration, *IEEE Transactions on Smart Grid*. 9 (2018) 3582-3593.
63. Tremblay O., Dessaint L.A., Experimental Validation of a Battery Dynamic Model for EV Applications, *World Electric Vehicle Journal*. 3 (2009) 1-10.
64. Cleenwerck, R.; Azaioud, H.; Vafaeipour, M.; Coosemans, T.; Desmet, J. Impact Assessment of Electric Vehicle Charging in an AC and DC Microgrid: A Comparative Study. *Energies* 2023, 16, 3205. <https://doi.org/10.3390/en16073205>.
65. Kouka K., Masmoudi A., Abdelkafi A., Krichen L., Dynamic energy management of an electric vehicle charging station using photovoltaic power, *Sustainable Energy, Grids and Networks*, Volume 24, 2020, 100402, ISSN 2352-4677, <https://doi.org/10.1016/j.segan.2020.100402>.
66. Vaideeswaran V., Bhuvanesh S. and Devasena M., "Battery Management Systems for Electric Vehicles using Lithium Ion Batteries," 2019 Innovations in Power and Advanced Computing Technologies (i-PACT), Vellore, India, 2019, pp. 1-9, doi: 10.1109/i-PACT44901.2019.8959965.
67. Pelletier, S.; Jabali, O.; Laporte, G.; Veneroni, M. Battery degradation and behaviour for electric vehicles: Review and numerical analyses of several models. *Transp. Res. B: Methodol.* 2017, 103, 158–187. <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57104781700>. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trb.2017.01.020>
68. Senol M., Bayram I. S., Naderi Y. and Galloway S., "Electric Vehicles Under Low Temperatures: A Review on Battery Performance, Charging Needs,

and Power Grid Impacts," in IEEE Access, vol. 11, pp. 39879-39912, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3268615.

69. Andersson D. and Carlsson D., "Measurement of ABB's prototype fast charging station for electric vehicles," M.S. thesis, Dept. Energy Environ. Division Electr. Power Eng., Chalmers Univ. Technol., Gothenburg, Sweden, 2012.

70. Aziz M, Oda T. Load Leveling Utilizing Electric Vehicles and their Used Batteries [Internet]. Modeling and Simulation for Electric Vehicle Applications. InTech; 2016. Available from: <http://dx.doi.org/10.5772/64432>

71. Motoaki Y., Yi W., and Salisbury S., "Empirical analysis of electric vehicle fast charging under cold temperatures," Energy Policy, vol. 122, pp. 162–168, Nov. 2018.

72. Lojowska, A.; Kurowicka, D.; Papaefthymiou, G.; van der Sluis, L. Stochastic Modeling of Power Demand Due to EVs Using Copula. IEEE Trans. Power Syst. 2012, 27, 1960–1968.

73. Li, Y.; Huang, Y.; Zhang, M. Short-Term Load Forecasting for Electric Vehicle Charging Station Based on Niche Immunity Lion Algorithm and Convolutional Neural Network. Energies 2018, 11, 1253.

74. Dukpa, A.; Butrylo, B. MILP-Based Profit Maximization of Electric Vehicle Charging Station Based on Solar and EV Arrival Forecasts. Energies 2022, 15, 5760. <https://doi.org/10.3390/en15155760>

75. Beal, L.D.R.; Hill, D.C.; Martin, R.A.; Hedengren, J.D. GEKKO Optimization Suite. Processes 2018, 6, 106. <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57189381096>. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr6080106>

76. PHOTOVOLTAIC GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEM. [Веб-сайт]. - Режим доступу: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/#HR. (дата звернення 10.07.2023) - Назва з екрану.

77. Аналіз РДН та ВДР. [Веб-сайт]. - Режим доступу: https://www.oree.com.ua/index.php/IDM_graphs. (дата звернення 12.07.2023) - Назва з екрану.

78. «Енергоатом» має побудувати 120 електрозарядок за два роки. Що може піти не так, враховуючи попередній досвід майнінгу: веб-сайт. URL: <https://dev.ua/news/enerhoatom-maie-pobuduvaty-120-elektrozariadok-za-dva-roku-shcho-mozhe-pity-ne-tak-vrakhovuiuchy-poperednii-dosvid-maininhu>. (дата звернення 29.11.2023) - Назва з екрану.

79. У Івано-Франківську відкрили нову станцію для зарядки електроавтомобілів: веб-сайт. URL: <https://suspilne.media/368188-u-ivano-frankivsku-vidkrili-novu-stanciu-dla-zaradki-elektroavtomobiliv/>. (дата звернення 29.11.2023).

80. Бізнес на послугах зарядки: веб-сайт. URL: <https://yasno.com.ua/business/business-on-charge>. (дата звернення 29.11.2023).

ДОДАТОК А. ЛІСТИНГ ПРОГРАМНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ ОПТИМІЗАЦІЇ

```

1  from gekko import GEKKO
2  import numpy as np
3  import matplotlib.pyplot as plt
4
5  m = GEKKO()
6  m.MAX_ITER = 10000
7  m.options.SOLVER = 1
8  m.options.IMODE = 3
9  time = np.arange(0, 780, 1, dtype=int)
10 in_ev = pd.read_excel("D:\EV-charging\Schedule.xlsx", index_col=0)
11 cost = pd.read_excel("D:\EV-charging\Data.xlsx", index_col=0)
12 cost_storage = cost['Storage_degradation']
13 cost_grid = cost['Grid']
14 solar = pd.read_excel("D:\EV-charging\solar.xlsx", index_col=0)
15 SoC_init = 45
16
17
18 def manage_power(solar, inp_ev, SoC_init):
19     inp_storage = m.Var(value = 0.0, lb = -34.5, ub = 34.5, integer = False)
20     inp_grid = m.Var(value = 0.0, lb = -50.0, ub = -50.0, integer = False)
21     SoC_fin = m.Intermediate(SoC_init + inp_storage/60)
22     m.Equation(SoC_fin <= 90.0)
23     m.Equation(SoC_fin >= 18.0)
24
25     m.Equation(solar[t] == inp_ev[t] + inp_storage[t] + inp_grid[t] for t in time)
26
27     m.Minimize(sum(cost_storage[t]*inp_storage[t] + cost_grid[t]*inp_grid[t] for t in time)
28
29     m.solve(dispatch=False)
30
31     return SoC_fin.value[0], inp_grid.value[0], inp_storage.value[0]

```