

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут  
імені Ігоря Сікорського"

Міністерство освіти і науки України Національний технічний університет України  
"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"

Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису

**Босак Андрій Васильович**

УДК 621.316

## **ДИСЕРТАЦІЯ**

Оптимізація керування зарядними станціями електромобілів в реальному часі на  
основі нечіткої логіки в умовах обмеженого електропостачання

141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

14 Електрична інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,  
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

---

(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент Босак Алла Василівна

Київ - 2024

## АНОТАЦІЯ

*Босак А.В.* Система нечіткого керування зарядними станціями електромобілів в реальному часі. - Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» (14 - Електрична інженерія). - Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, 2024.

Дослідження акцентує увагу на виклику ефективного управління енергетичною продуктивністю парку електромобілів автотранспортного підприємства або зарядної станції, що операціонує в умовах великого міста, з урахуванням вимог сталої електромобільності та обмежень енергетичної системи.

Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, висновків та додатків. Робота викладена на 146 сторінках друкованого тексту, містить 76 рисунків, 15 таблиць та 4 додатки.

Розроблений план заряджання електромобілів (EV) при обмеженій потужності зарядної станції базується на алгоритмі заряджання коефіцієнта EV. Цей алгоритм здійснює контроль над процесом зарядки шляхом надання вагового індексу заряджання (ВІЗ) кожному підключеному до станції транспортному засобу. Оптимізація електричного навантаження станції реалізована з метою зниження витрат на електроенергію та забезпечення задоволення попиту на зарядку EV без порушення обмежень мережі. Проведено комп'ютерне моделювання процесу зарядки електромобілів та навантаження зарядної станції. Отримані результати електричного навантаження мережі та станції, отримані за допомогою запропонованого алгоритму, порівнюються з результатами моделювання, отриманими з використанням алгоритму контрольованої зарядки та алгоритму неконтрольованої зарядки. Завершальні результати моделювання зарядки електромобілів за допомогою запропонованого алгоритму порівнюються з результатами моделювання, отриманими за допомогою алгоритму контрольованої

зарядки. Виявлений підхід сприяє зменшенню електроенергетичних витрат під час пікових навантажень електричної мережі, а також можливості заряджати електромобілі відповідно до запиту рівня заряду акумулятора майже для всіх підключених електромобілів.

В першому розділі досліджено ринок електромобілів в Україні, що в свою чергу спричиняє розширенню мережі електрозарядних станцій та збільшенню навантаження на енергосистему. Виникла актуальна потреба впровадження засобів управління процесом заряджання електромобілів при обмежених потужностях енергетичної інфраструктури та обмеженому електропостачанні електрозарядних станцій. Основні принципи підключення зарядних станцій до мережі та необхідність правильної черговості заряджання електромобілів підкреслюють важливість розробки методу управління електрозарядними станціями в реальному часі. Сприятливим напрямком для розробки такого методу вважається використання принципів та процедур нечіткої логіки.

В другому розділі визначено вхідні дані для систем керування електрозарядними станціями включають криві змін потужності споживання на зарядку, напруги та струму, залежно від рівня зарядженості АКБ і часу повного заряду. Експериментальні характеристики зарядного процесу використовуються для формування вихідних даних, які становлять основу для функцій належності методу управління і створення профілю зарядки електромобіля в Matlab Simulink.

Третій розділ показує, що положення та методи нечіткої логіки є найбільш відповідними математичними інструментами. Для визначення пріоритетності використовується ваговий індекс заряджання, який базується на функціях належності. Оптимізаційна частина методу ґрунтується на гравітаційному методі. Запропонований алгоритм працює в реальному часі та враховує обмеження як мережі, так і інтереси власників транспортних засобів при обмеженій потужності електроспоживання.

Ефективність запропонованого алгоритму контролю зарядки у реальному часі в порівнянні з типовим алгоритмом з обмеженнями підтверджена у четвертому

розділі. Функціональність нечіткого контролера на основі запропонованої методології випробувана на мікроконтролері на платі Arduino Mega 2560. Простота впровадження даного методу підкреслена схемою підключення контролера нечіткої логіки до існуючих систем управління електрозарядних станцій, що керують процесом зарядки відповідно до запропонованого методу. Результати вказують, що графіки моделювання системи на основі нечіткої логіки в середовищі Matlab на ПК і на платі Arduino практично ідентичні.

У цьому ж четвертому розділі описано процедуру впровадження нечіткого контролера в процес заряджання. У порівнянні з іншими роботами, основний внесок цієї роботи полягає в детальному описі елементів програмування та реалізації кожного етапу нечіткого контролера у програмному або апаратному забезпеченні. Це дає можливість оцінити оптимальні параметри, невизначеності та нелінійності системи без математичної моделі. Нарешті, показано моделювання та реалізацію на мікроконтролері на платі Arduino Mega 2560 для перевірки дієвості запропонованої методології, а також теоретичних та експериментальних результатів.

**Ключові слова** парк електромобілів, оптимальне управління енергією, моніторинг енергоефективності, стан заряду, профіль електричного навантаження, нечітка логіка.

## ABSTRACT

Fuzzy control system for electric vehicle charging stations in real time. - Qualifying scientific work as a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 141 "Electric Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics" (14 - Electrical Engineering). - National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, 2024.

The study focuses on the challenge of effective management of the energy productivity of the fleet of electric vehicles of a motor transport enterprise or a charging station operating in a large city, taking into account the requirements of sustainable electromobility and the constraints of the energy system.

The thesis consists of an introduction, four chapters, conclusions, and appendices. The main text is set out on 146 pages of printed text, contains 76 figures, 15 tables and 4 appendices.

The developed plan for charging electric vehicles (EVs) with a limited capacity of the charging station is based on the EM coefficient charging algorithm. This algorithm controls the charging process by assigning a Charging Weight Index (VIZ) to each vehicle connected to the station. Optimization of the station's electrical load is implemented in order to reduce electricity costs and ensure that the demand for EV charging is met without violating network restrictions. Computer simulation of the process of charging electric vehicles and loading the charging station was carried out. The obtained results of the electrical load of the network and the station, obtained with the help of the proposed algorithm, are compared with the simulation results obtained using the controlled charging algorithm and the uncontrolled charging algorithm. The final results of the simulation of charging electric vehicles using the proposed algorithm are compared with the results of the simulation obtained using the controlled charging algorithm. The discovered approach helps to reduce electricity costs during peak loads of the electrical

network, as well as the ability to charge the EM in accordance with the request of the battery charge level for almost all connected electric vehicles.

In the first section of the study, it is investigated that the market of electric vehicles in Ukraine is expanding rapidly, which in turn leads to the expansion of the network of electric charging stations and an increase in the load on the power system. There is an urgent need to introduce means of controlling the charging process of electric vehicles with limited capacities of the energy infrastructure and limited power supply of electric charging stations. The basic principles of connecting charging stations to the grid and the need for the correct charging sequence of electric vehicles emphasize the importance of developing a real-time control method for electric charging stations. A favorable direction for the development of such a method is the use of the principles and procedures of fuzzy logic.

In the second section, the crystallized inputs for electric charging station control systems include curves of changes in charging power, voltage and current, depending on the level of charge of the battery and the time of full charge. The experimental characteristics of the charging process are used to generate the initial data, which form the basis for the functions of belonging to the control method and the creation of an electric vehicle charging profile in Matlab Simulink.

The third section shows that the propositions and methods of fuzzy logic are the most appropriate mathematical tools. A charging weight index is used for prioritization, which is based on membership functions. The optimization part of the method is based on the gravitational method. The proposed algorithm works in real time and takes into account the constraints of both the network and the interests of vehicle owners with limited power consumption.

The effectiveness of the proposed real-time charging control algorithm in comparison with a typical algorithm with limitations was confirmed in the fourth. The functionality of the fuzzy controller based on the proposed methodology was tested on the Arduino Mega 2560 microcontroller. The simplicity of implementation of this method is emphasized by the diagram of connecting the fuzzy logic controller to the existing

control systems of electric charging stations that control the charging process in accordance with the proposed method. The results indicate that the fuzzy logic-based system simulation graphs in the Matlab environment on the PC and on the Arduino board are virtually identical.

The same section describes the procedure for introducing a fuzzy controller into the charging process. Compared to other works, the main contribution of this work lies in the detailed description of the programming elements and the implementation of each fuzzy controller step in software or hardware. This makes it possible to estimate the optimal parameters, uncertainties and nonlinearities of the system without a mathematical model. Finally, simulation and implementation on the Arduino Mega 2560 microcontroller are shown to test the validity of the proposed methodology, as well as theoretical and experimental results.

**Keywords:** electric vehicle fleet, optimal energy control, energy efficiency monitoring, state of charge, electrical load profile, fuzzy logic.

## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Публікації, що відображають основні результати дисертації:

1. **Andrii Bosak**, Alla Bosak. “Implementation of a Real-Time Fuzzy Control System for Electric Vehicle Charging Stations Based on Arduino Mega 2560 Microcontroller”. “Відновлювана енергетика” ІВЕ НАН України, 2023, [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2023.4\(75\)29-38](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2023.4(75)29-38) (фахове видання категорії Б).
2. **Andrii Bosak**, Liudmyla Davydenko, Nina Davydenko, Alla Bosak, Agnieszka Deja, “Smart Sustainable Freight Transport for a City Multi-Floor Manufacturing Cluster: A Framework of the Energy Efficiency Monitoring of Electric Vehicle Fleet Charging”, *Energies* 2022, 15(10), 3780; DOI <https://doi.org/10.3390/en15103780> (Scopus, WoS, Q1).
3. **А.В Босак**, А.В Босак, О.В Чермалих, В.Г Дубовик, “Моделювання процесу керованої зарядки електромобілів в умовах обмеженого електропостачання”, Вісник КрНУ імені М. Остроградського, 2021, DOI: 10.30929/1995-0519.2021.3.91-98 (фахове видання категорії Б).
4. **А.В Босак**, “Застосування зарядних станцій для електромобілів в Україні в умовах обмеженого електропостачання”, Матеріали аспірантських читань пам'яті професора Артура Праховника, 2021 (тези конференції).
5. **Andrii Bosak**, Alla Bosak, L Kulakovskiy, T Oboronov, “Impact of EV chargers on total harmonic distortion in the distribution system network”, IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems (ESS), 329-333, 2019, DOI: 10.1109/ESS.2019.8764244 (тези конференції).
6. Alexander Yandulskii, Oleg Kurson, **Andrii Bosak**, Serhii Kondratiev, Alexander Kuznietsov, “Improvement of Electric Charging Station Efficiency using situation-dependent Fuzzy Algorithms”, IEEE International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC), 2018, DOI: 10.1109/ESARS-ITEC.2018.8607378 (тези конференції).



## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК ПРИЙНЯТИХ СКОРОЧЕНЬ .....	12
ВСТУП.....	13
РОЗДІЛ 1. ЗАСТОСУВАННЯ ЕЛЕКТРОЗАРЯДНИХ СТАНЦІЙ (ЕЗС) В УКРАЇНІ .....	19
1.1 Стан ринку електромобілів в Україні .....	19
1.2 Впровадження електричних зарядних станцій в Україні.....	22
1.3 Побудова та режими роботи електричних зарядних станцій .....	25
1.4 Основні вимоги до електрозарядної станції.....	30
1.5 Вплив електричних зарядних станцій на електроенергетичну систему.....	33
1.5.1 Небаланси в мережах з електричними зарядними станціями .....	34
1.5.2 Гармонійні спотворення .....	36
1.6 Умови підключення електричних зарядних станцій .....	38
1.7 Висновки до Розділу 1 .....	39
РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ ПІДХОДІВ ДО КЕРОВАНОЇ ЗАРЯДКИ ПАРКУ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ .....	41
2.1 Системи керованої зарядки .....	41
2.1.1 Роль та принципи інтелектуального управління заряджанням електромобіля.....	41
2.1.2 Звичайний керований метод заряджання з обмеженнями .....	43
2.1.3 Алгоритми керування з вирішенням оптимізаційної задачі.....	45
2.1.4 Непрямий контроль за статичним часом використання .....	47
2.2 Експериментальні дослідження вихідних даних .....	49
2.2.1 Теоретичні дані вимірювань параметрів батареї електромобіля .....	49
2.2.2 Виміри параметрів під час зарядки .....	51

2.2.3	Вимірювання гармонік .....	53
2.2.4	Результати вимірів .....	56
2.3	Відповідність умовам приєднання до електричної мережі .....	63
	Висновки до Розділу 2 .....	64
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА МЕТОДУ КЕРУВАННЯ ЗАРЯДНИМИ СТАНЦІЯМИ ПРИ		
УМОВІ ОБМЕЖЕННЯ СПОЖИВАННЯ В МІСЦІ ПІДКЛЮЧЕННЯ		
ЕЛЕКТРИЧНИХ ЗАРЯДНИХ СТАНЦІЙ .....		
3.1	Застосування запропонованого підходу на основі нечіткої логіки.....	65
3.2	Побудова фазі-системи.....	66
3.3	Функції належності .....	67
3.4	База правил фазі-контролю .....	75
3.5	Етап дефазифікації .....	78
3.6	Оптимізація цільової функції.....	79
3.7	Алгоритм контролю зарядки в реальному часі .....	81
	Висновки до Розділу 3 .....	82
РОЗДІЛ 4. МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ КЕРОВАНОЇ ЗАРЯДКИ ІЗ		
ЗАСТОСУВАННЯМ ЗАПРОПОНОВАНОГО АЛГОРИТМУ ТА ЙОГО		
РЕАЛІЗАЦІЯ.....		
4.1	Побудова моделі розподільчої мережі з приєднанням електричної зарядної станції .....	83
4.1.1	Джерело живлення .....	84
4.1.2	Навантаження .....	85
4.1.3	Зарядна станція.....	86
4.2	Застосування запропонованого методу керування.....	89
4.3	Результати моделювання.....	90

4.4	Реалізація на основі мікроконтролера на платі ARDUINO MEGA 2560 ....	98
4.4.1	Опис плат мікроконтролерів.....	98
4.4.2	Вибір мікроконтролера на платі Arduino Mega 2560 .....	102
4.4.3	Порядок впровадження плати мікроконтролеру в систему заряджання 104	
	Висновки до Розділу 4 .....	111
	ВИСНОВКИ.....	113
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	115
	ДОДАТКИ.....	125
	ДОДАТОК А.....	126
	ДОДАТОК Б .....	129
	ДОДАТОК В.....	134
	ДОДАТОК Г .....	145

## ПЕРЕЛІК ПРИЙНЯТИХ СКОРОЧЕНЬ

EV – Електромобіль (Electrical Vehicle);

ВІЗ – Ваговий індекс зарядки;

ДВЗ – Двигун внутрішнього згорання;

ЗП – Зарядний пристрій;

ЗС – Зарядна станція;

ЕЗС – Електрична зарядна станція;

НН – Низька напруга;

СН – Середня напруга;

ПК – Персональний комп'ютер;

СКЕ – Система керування ЕЗС;

SOC – Ступінь заряду (State of Charge);

АКБ – Акумуляторна батарея.

## ВСТУП

В умовах сучасних кліматичних змін і вичерпання запасів енергетичних ресурсів актуальними стають питання декарбонізації, підвищення енергоефективності та зниження кінцевого енергоспоживання у всіх галузях. Ці питання є ключовими в контексті поточних викликів зі зміни клімату та обмеженості енергетичних ресурсів. Підвищення енергоефективності включає заходи для зниження енергетичних втрат та оптимізації процесів, що дозволяє досягти більшої продуктивності з меншим споживанням енергії [1]. Зниження кінцевого енергоспоживання означає ефективне використання та раціоналізацію споживання енергії в усіх сферах, включаючи промисловість, транспорт, будівництво та побутову сферу [2]. Ці заходи є стратегічно важливими для створення стійкої та ефективної енергетичної системи, сприяють збереженню ресурсів та зниженню негативного впливу на довкілля.

Встановлення мети Європейським Союзом зменшити викиди парникових газів на 40% до 2030 року в рамках Паризької угоди свідчить про серйозні зобов'язання у боротьбі зі зміною клімату [3]. Ця мета покликана забезпечити значний внесок в обмеження масштабів глобального потепління шляхом зменшення джерел парникових газів, які впливають на підвищення температури нашої планети. Реалізація цієї мети вимагатиме впровадження технологічних інновацій та співпраці з різними секторами суспільства для досягнення стабільного та екологічно безпечного майбутнього.

Процес зниження викидів парникових газів шляхом переходу до низьковуглецевої економіки важливий в транспортному секторі [4]. Зростаючий обсяг транспортних засобів та залежність від палив, які негативно впливають на клімат, вимагають прийняття ефективних заходів для зменшення забруднення. Використання чистих транспортних засобів, таких як електромобілі, водневі автомобілі та гібридні автомобілі, є однією з перспективних стратегій для зменшення викидів парникових газів та поліпшення якості повітря [5]. Розвиток інфраструктури для зарядки електромобілів, впровадження стимулюючих програм

та технологічних інновацій у сфері транспорту сприяють прискоренню процесу декарбонізації й переходу до більш екологічно чистих джерел енергії для транспорту. Цей підхід сприяє не лише зменшенню викидів забруднюючих речовин, але й забезпечує створення більш стійкої та сталої транспортної системи.

Усередині цього контексту, впровадження електромобілів вимагає розвитку інфраструктури для зарядки. Запит на зарядні станції визначає графік навантаження на них та можливості інтеграції з електричною мережею. Зокрема, технологія двонаправленої зарядки (V2G) дозволяє використовувати електромобілі не лише для балансування графіку навантаження, а й як накопичувачі енергії з відновлюваних джерел. Структура парку електромобілів, режими зарядки та функціонування зарядних станцій мають великий вплив на мережу та енергосистему в цілому. Автотранспортні підприємства, що мають парк електромобілів, можуть заряджати їх під час зниженої вартості електроенергії та продавати надлишки в піки. Це надає їм можливість виконувати роль не лише як споживачам, а й як учасникам енергоринку. У такому контексті, розгляд парку електромобілів як кінцевого споживача енергії відповідно до джерела [4] є доцільним.

Набуває актуальності реалізація інструменту управління процесом заряджання електромобілів при обмеженні електропостачання ЕЗС. Головні принципи підключення зарядної станції до мережі, а також регламентована необхідність правильної постановки електромобілів чергу на зарядку підтверджують необхідність розробки методу керування електрозарядними станціями. Саме тому стає **актуальною** розробка системи контролю заряджання в реальному часу, що має забезпечити кожному електромобілю гарантоване заряджання в умовах обмеженого електроспоживання. Найбільш перспективним для розробки керування в реальному часі являється застосування положень та процедур нечіткої логіки, що підтверджено наведеними в роботі порівняннями існуючих методів заряджання великої кількості електромобілів.

Дослідженнями у сфері оптимізації та контролю заряджання великої кількості електромобілів було проведено такими науковцями: Будько В. І., Кудря С. О., Francesco Marra, Menezes A.C., Olle Sundstrom, Carl Binding, Jing Huang, V. Gupta, і Yih-Fang Huang, U. Reiner, C. Elsinger, і T. Leibfried, V. Bertsch, W. Fichtner, V. Heuveline, E. Akhavan-Rezai, M. F. Shaaban, E. F. El-Saadany, і F. Karray та інші [47, 48, 49, 50, 51, 52, 61, 66, 69]. Більшість рішень проблеми заряджання великої кількості електромобілів базується на різних типах планування та створенні для них зарядного профілю - сценаріїв заряджання з технічними обмеженнями.

Також дослідженням впливу заряджання парку електромобілів на мережу було проведено R. Godina, E. M. G. Rodrigues, N. G. Paterakis, O. Erdinc, і J. P. S. Catalão, M. S. El Nozahy і M. M. A. Salama, G. Razeghi, L. Zhang, T. Brown, і S. Samuelson, C. D. M. Affonso і M. Kezunovic, A. Srivastava, M. Manas, і R. K. Dubey, Srivastava. Результати їх напрацювань наведені у роботах [28, 29, 30, 31, 34, 38].

**Метою дисертаційної роботи** є оптимізація процесу керування зарядними станціями електромобілів у реальному часі в умовах обмеженого електропостачання, що дозволить забезпечити ефективне та стійке заряджання електромобілів та уникнути перевантаження електромережі.

Для досягнення поставленої мети необхідно:

1. Дослідити стан впровадження електрозарядних станцій в Україні та вимоги, які висуваються для роботи та умов підключення до мережі ЕЗС. Визначити вплив ЕЗС на електроенергетичну систему.
2. Проаналізувати існуючі методи контролю процесу заряджання електромобілів в умовах обмеженого енергопостачання.
3. Розробити метод керування режиму роботи зарядної станції з орієнтацією на мінімізацію витрат на електроенергію та задоволення потреби у зарядці акумуляторів електромобілів, не виходячи за межі встановлених обмежень.
4. Перевірити ефективність запропонованого методу керування процесу заряджання через результати моделювання, що базується на експериментальних даних.

**Об’єкт дослідження** процес перетворення електроенергії під час заряджання електромобілів від електрозарядної станції приєднаної до електричної мережі з тимчасовим (аварійним) або постійним обмеженням потужності.

**Предмет дослідження** режимні параметри електрозарядної станції та мережі.

**Наукове завдання** дисертаційної роботи полягає в розробці нового методу керування заряджанням у реальному часі в умовах обмежень з боку електропостачальної мережі, підтвердження ефективності розроблених засобів шляхом моделювання в середовищі Matlab та практичній реалізації.

**Наукова новизна** отриманих результатів полягає у наступному:

1. Вперше розроблено нову оптимізаційну модель керування зарядними станціями в реальному часі, що відрізняється від існуючих моделей тим, що дозволяє забезпечити більше енергії поставки до батарей електромобілів за однакових обмежень споживання в місці підключення електрозарядних станцій.
2. Розроблено методику експертної системи видачі пріоритетності заряджання на основі нечіткої логіки та вперше реалізовано запропоновану систему керування на мікроконтролері на платі Arduino Mega 2560.
3. Розроблено імітаційну модель і виконано моделювання процесу керованої зарядки із розробленим методом для роботи в реальному часі в умовах обмеженого електропостачання в середовищі Matlab, що дало можливість встановити, що розроблений метод зарядки забезпечує оптимальне розподілення зарядної потужності між електромобілями з урахуванням обмежень мережі та індивідуальних потреб.

**Практичне значення** отриманих результатів:

1. Запропоновано систему керування електрозарядними станціями в режимі реального часу на основі нечіткої логіки та оптимізації цільової функції в умовах обмеженого електропостачання.



2. Доведено ефективність запропонованої системи роботи в реальному часі у порівнянні з іншими алгоритмами на основі планування та централізованого управління та встановлено, що запропонований метод забезпечує відповідність накладеним обмеженням та належне заряджання електромобілів у контексті розробленої системи.
3. Реалізація системи виконана на мікроконтролері на платі Arduino Mega 2560, і запропоновано схему його підключення до існуючої електрозарядної станції.
4. Результати роботи впроваджено в освітній процес кафедри Автоматизації електротехнічних та мехатронних комплексів та використовуються в освітніх компонентах освітньо-професійної програми підготовки бакалаврів та магістрів «Інжиніринг інтелектуальних електротехнічних та мехатронних комплексів» за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» а саме: дисципліна «Інжиніринг електротехнічних та мехатронних комплексів», «Автоматизований електропривод машин і установок».

**Особистий внесок здобувача** – основні положення та результати дисертаційної роботи отримані автором особисто. У друкованих працях, опублікованих у співавторстві, автору належать в роботі: [6] – проаналізовано методи побудови схем і комп'ютерне моделювання моделі керованої системи зарядки для дослідження підвищення ефективності зарядних станцій з кількісним підключенням електромобілів до зарядного пристрою в умовах обмеження потужності. Запропонована модель складається з розподіленої мережі, що живиться від джерела, трансформатора, житлового навантаження (офіси / невеликі підприємства) та самих зарядних станцій. Основою для формування методу управління зарядної станції являються характеристики процесів зарядки акумуляторів електромобіля. Тому були виконані експериментальні дослідження зарядних характеристик акумуляторних батарей. За отриманими теоретичними залежностями побудовано графіки навантаження з контрольованим та

неконтрольованими методами зарядки; [7] – аналіз проблем управління енергоефективністю парку електромобілів транспортного підприємства у великому місті з урахуванням вимог сталої електромобільності та обмежень енергосистеми. Запропоновано алгоритм заряджання електромобілів, який пропонує оптимізацію електричного навантаження зарядної станції для мінімізації витрат на електроенергію та задоволення попиту на зарядку електромобілів без виходу за межі. Проведено комп'ютерне моделювання, що підтверджує ефективність запропонованого підходу, зокрема, зниження споживання електроенергії в години пікового навантаження та забезпечення зарядки всіх електромобілів за вимогами; [8] – запропонований підхід реалізовано на платі Arduino Mega 2560.

Щодо **апробації матеріалів дисертації** – наукові й практичні результати, а також методологія дисертаційної роботи доповідалися та були обговорені на наступних конференціях:

1. IEEE International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC), 2018.
2. IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems (ESS), 2019.
3. Матеріали аспірантських читань пам'яті професора Артура Праховника, 2021.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел (82 найменувань) і 3 додатків. Основний зміст викладений на 124 сторінках друкованого тексту, містить 76 рисунків і 15 таблиць. Загальний обсяг дисертації – 146 сторінки.

## РОЗДІЛ 1. ЗАСТОСУВАННЯ ЕЛЕКТРОЗАРЯДНИХ СТАНЦІЙ (ЕЗС) В УКРАЇНІ

### 1.1 Стан ринку електромобілів в Україні

Перехід на електромобілі набуває популярності в останні роки, оскільки різні країни світу встановлюють амбітні цілі щодо відмови від автотранспорту, який працює на двигунах внутрішнього згорання. Наприклад, країни Європи визначили мету заборонити продаж бензинових та дизельних автомобілів до 2030 або 2035 року [9]. Китай також має план досягти 50% частки електромобілів в нових продажах легкових автомобілів до 2035 року [10]. У Сполучених Штатах заявлено план до 2030 року зробити 50% нових автомобілів електричними [11].

Причинами розвитку електромобілів у світі є зростання свідомості щодо екологічних проблем та засмічення довкілля, які спонукають до пошуку екологічно чистих транспортних рішень. Електромобілі зменшують шкідливий вплив на довкілля та залежність від нафтових ресурсів. Крім того, постійні покращення у сфері акумуляторних технологій дозволяють електромобілям їздити на більшу відстань та заряджатись швидше, що робить їх більш зручними та привабливими для користувачів. Розвиток інфраструктури зарядних станцій і впровадження державних підтримок та стимулів також сприяють розширенню ринку електромобілів та їх популяризації.

В Україні у 2022 році кількість імпортованих електромобілів зросла на 28% порівняно з попереднім роком і склала 11 700 одиниць. Навіть за умов енергетичної кризи популярність електрокарів продовжує зростати. Передумовою цього є також можливість використовувати електромобілі як додаткові джерела живлення. Наприклад, автомобілі Nissan Leaf, які відповідають стандарту UL 9741, ідеально підходять для цілей резервного електричного живлення.

За даними [12], у середньому щомісяця в Україну імпортується 830 електромобілів. Найпопулярнішим електромобілем в Україні є Nissan Leaf з 2154 одиницями в 2022 році, що складає 18% від усіх імпортованих електричних

транспортних засобів. Volkswagen ID.4 посідає друге місце з 1142 автомобілями, а Tesla Model 3 замикає трійку з 784 імпортованими одиницями [12].

Фактично, електромобілі звільнені від оподаткування та імпортих мит до 2025 року, що сприяє зростанню їхньої популярності серед населення. Наразі в Україні зареєстровано понад 100 000 електричних автомобілів, включаючи гібриди. За останні шість років продано близько 34 000 чистих електромобілів [13].

Аналіз розподілу електромобілів по регіонах України станом на 2023 рік показав, що найбільша кількість електромобілів сконцентрована у місті Києві та на території м. Києва (15,8%). На другому місці за реєстрацією EV розташувалася Львівська область із часткою 10%, а на третьому - Дніпропетровська область, за часткою 8,5%. Додатково значну частку у загальній кількості зареєстрованих електромобілів представляли Одеська область (8,02%) та Київська область (7,14%). Решта, а саме 50,54%, розподілені по іншим регіонах України. (рис. Рисунок 1.1) [14].



Рисунок 1.1 – Розподіл зареєстрованих електромобілів по регіонах України [14]

Тож можна зауважити, що найпопулярнішим легковим електромобілем в Україні був і залишається Nissan Leaf. Наприклад, найчисленніша п'ятірка ринку легкових електромобілів, по кількості, що українці придбали в 2022 році, виглядає

так: Nissan Leaf – 2349 шт; Volkswagen ID.4 – 1407 шт; Tesla Model 3 – 952 шт; Volkswagen e-Golf – 862 шт; Renault Zoe – 674 шт [16]. На основі цих даних і поширеності Nissan LEAF і буде будуватися наступне моделювання роботи запропонованої системи заряджання.

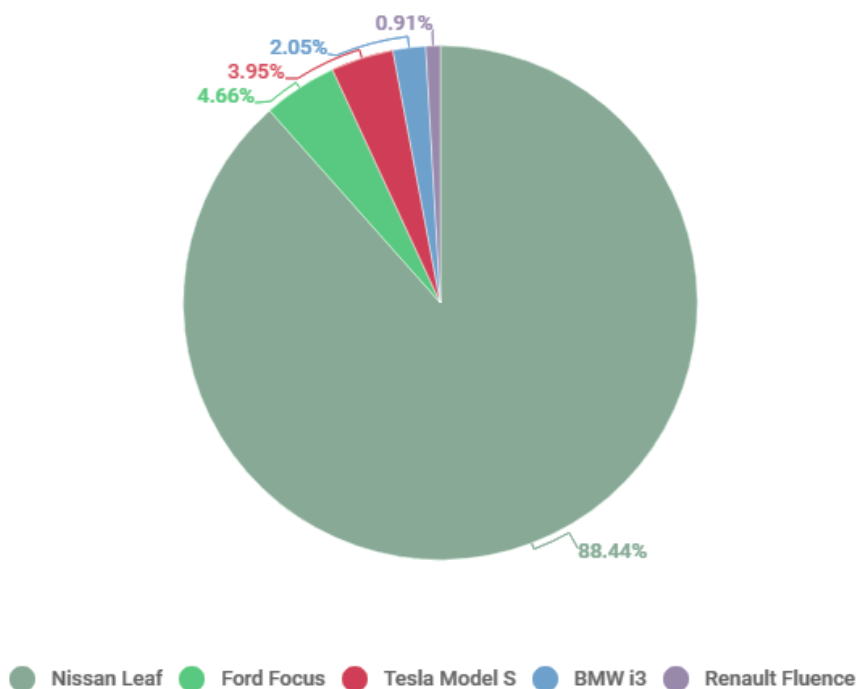


Рисунок 1.2 – Відсоток кількості моделей EV в Україні [15]

Згідно рис. 1.3 [13], ринок електромобілів України має тенденцію щороку збільшуватися.

Верховною Радою України затверджена концепція розвитку електромобільної галузі: створення повного циклу виробництва електротранспорту в Україні, формування доступних цін на електромобілі для українців, сприяння розвитку бізнесу, який використовує електричний транспорт [17].

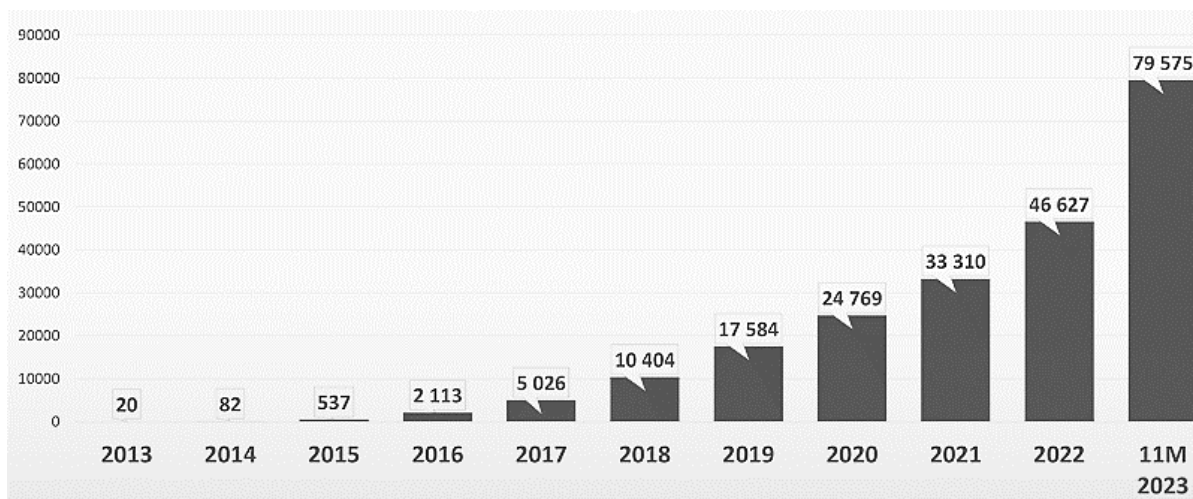


Рисунок 1.3 – Динаміка росту кількості електромобілів в Україні [13]

Ще одним показником поточного росту ринку електромобілів є темпи розвитку цього сектору у порівнянні з провідними країнами світу (рис. 1.4), де згідно відносних балів розвитку кількості електромобілів та зарядних станцій за даними [18], Україна займає 5 місце.

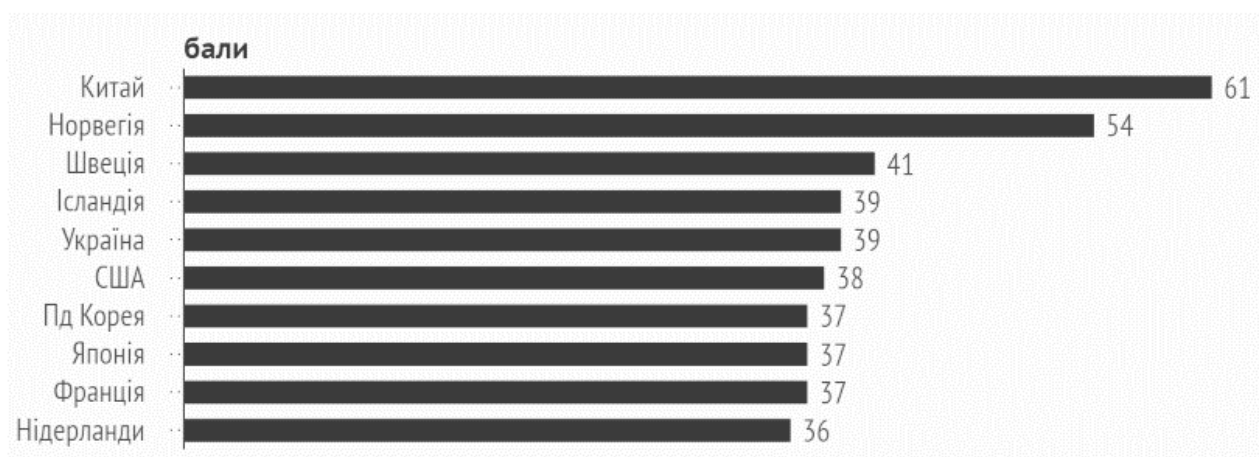


Рисунок 1.4 – Країни, де найшвидше розвивається електротранспорт [18]

## 1.2 Впровадження електричних зарядних станцій в Україні

В Україні представлені виробники зарядних станцій, які виготовляють станції різної потужності – від побутових, що живляться від 220 В чи 380 В, до промислових, які можна встановлювати на паркінгах, біля торгових центрів тощо. Електричні зарядні станції (ЕЗС) відкритого доступу пропонують зазвичай платну зарядку і можуть обслуговувати декілька електромобілів [19].

Виробники та постачальники ЕЗС сприяють створенню розгалужених мереж ЕЗС. На сучасному етапі серед провідних мереж електричних зарядних станцій в Україні, що взаємодіють з підприємцями, виділяються такі компанії [20]:

- AutoEnterprise – на сьогодні найбільша мережа ЕЗС в Україні.
- GreenFuel, національний виробник зарядних станцій, володар широкої мережі по всій країні, пропонує вигідні умови співпраці та сервісне обслуговування, дозволяючи заряджати електромобілі в зручних для клієнтів місцях, таких як торгові та бізнес-центри, готелі, паркувальні майданчики тощо.
- YASNO E-mobility від DTEK, мережа зарядних станцій, яка забезпечує швидке заряджання автомобілів у різних регіонах, включаючи Київ, автодороги до Одеси, Львова та Полтави. Компанія також спеціалізується на встановленні зарядних станцій у бізнес-центрах, ресторанах і готелях, надаючи зручний мобільний додаток для користувачів.
- ТОКА, розгалужена мережа заправок для електрокарів зручно розташована в торгових центрах, автостоянках, спортклубах, розважальних закладах, магазинах, офісних центрах, житлових комплексах та інших місцях. Компанія виробляє зарядні станції, що складаються на 50% з українських комплектуючих.
- UGV Chargers, розробник і виробник широкого асортименту зарядних станцій для електромобілів, надає повний спектр послуг, включаючи монтаж "під ключ", індивідуальне проектування, різні способи оплати, сучасний мобільний додаток та індивідуальний дизайн.
- IONITY, масштабний інвестиційний проект щодо розташування зручних мережевих електричних комплексів. Компанія підтримує власників різноманітних локацій та зарядних станцій по всій Україні, дотримуючись високих міжнародних стандартів надання послуг з

заряджання електромобілів і створюючи джерела постійного прибутку для інвесторів.

- GO TO-U, прогресивна міжнародна платформа, визнана у міжнародному рейтингу соціальних компаній "One Young World", яка сприяє досягненню цілей ООН у сфері сталого розвитку. Компанія, хоча має обмежену мережу станцій в Україні, відповідає міжнародним стандартам та надає високоякісні послуги.
- Мережа ОККО, визначена в Україні мережа АЗС, також активно розвиває мережу зарядних станцій для електрокарів, намагаючись утримати лідерські позиції на ринку та забезпечити якісне обслуговування власників електричних автомобілів через свої 51 заправні станції.

Кількість та оператори пунктів електрзарядних станцій станом на вересень 2023 року представлені на рис. 1.5 [21]. Наведений графік також включає розділення статистики по постійнострумових (DC) та зміннострумових (AC) портах.

В результаті на одну зарядну станцію в Україні припадає приблизно 9 електромобілів.

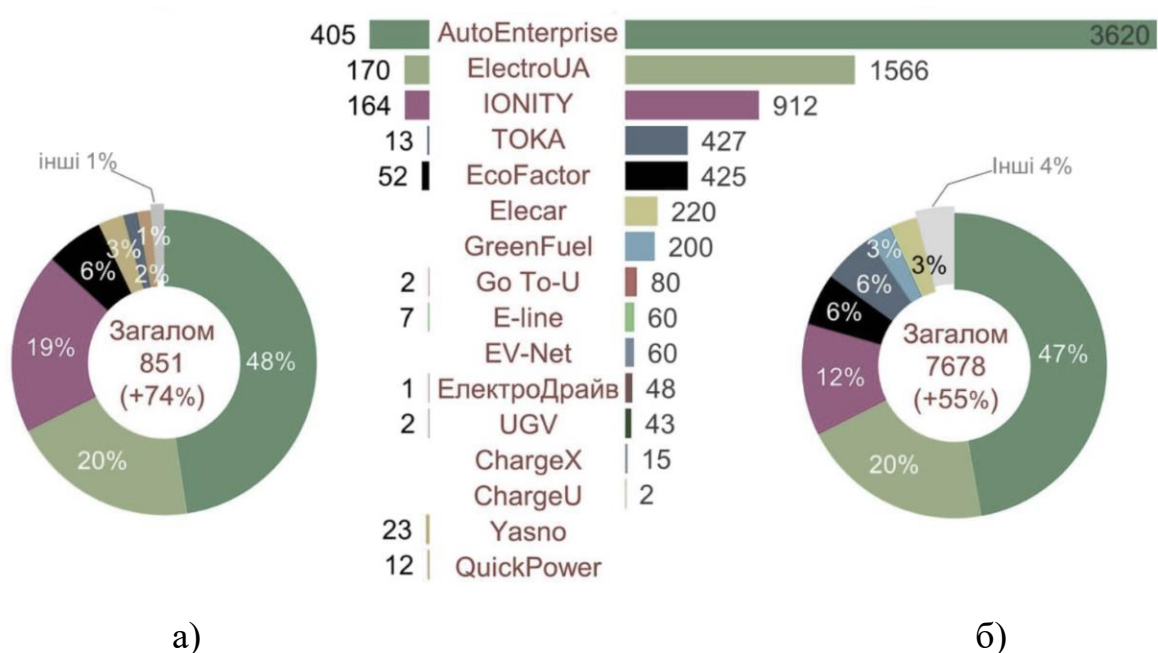




Рисунок 1.5 – Кількість пунктів електрозарядних станцій та частки операторів; а – DC пункти; б – AC пункти [21]

Ріст кількості ЕЗС вимагає необхідності збільшення пропускної здатності електричного обладнання та мереж, так як підвищений попит на електроенергію для зарядки електромобілів може бути саме в години пік. У багатьох розвинених країнах енергогенеруючих потужностей недостатньо для задоволення попиту на електроенергію для переважної більшості електромобілів під час максимального навантаження енергосистеми.

### **1.3 Побудова та режими роботи електричних зарядних станцій**

Для розуміння режимів роботи зарядних станцій, важливо знати різновиди роз'ємів конекторів, які використовуються для підключення та зарядки електромобілів. Історично склалося, що в Україну ввезено електромобілі які першочергово вироблялися для ринків інших континентів, що призвело до варіативності та відсутності єдиного прийнятого стандарту. Такий різноманітний вибір роз'ємів визначається регіональними особливостями та виробничими стандартами, що визначаються різними країнами та ринками електромобілів.

Перший та найбільш поширений це Type 1 J1772 (рис. 1.6), 5-контактний стандартний роз'єм електромобільного конектора, поширений у більшості електромобілів американського та азіатського виробництва. Використовується для підзарядки електромобіля від зарядних комплексів, що працюють за стандартами Режим 2 і Режим 3. Підзарядка відбувається через однофазну мережу змінного струму з максимальною напругою 230 В, силою струму 32 А і граничною потужністю 7,4 кВт [22].



Рисунок 1.6 – Конектор Type 1 J1772 [23]

Type 2 (Mennekes), який наведено на рис. 1.7, це 6-контактний роз'єм, який використовується в основному для європейських електромобілів, а також китайських автомобілів, адаптованих до цього стандарту. Забезпечує можливість використання однофазної і трифазної мережі з максимальною напругою 400 В, силою струму 63 А і потужністю 43 кВт.



Рисунок 1.7 – Конектор Type 2 Mennekes [24]

CHAdeMO – 2-контактний конектор постійного струму, розроблений японськими автовиробниками для зарядки японських, американських і деяких європейських електромобілів. Призначений для потужних зарядних станцій в режимі Mode 4, дозволяючи заряджати батарею електромобіля до 80% за 30 хвилин при потужності 50 кВт. Зображення конектора наведено на рис. 1.8.



Рисунок 1.8 – Конектор CHAdeMO [25]

CCS Combo (Type 1/Type 2) – комбінований тип конектора, який дозволяє використовувати як повільні, так і швидкі точки заряджання. Розрізняється залежно від регіону: Combo 1 для США та Японії, Combo 2 для Європи (рис. 1.9). Розрахований на напругу 200-500 В, силу струму 200 А і потужність 100 кВт.



Рисунок 1.9 – Конектори CCS Combo Type 1 та Type 2 [25]

GB/T (рис. 1.10) – цей стандарт призначений для китайських електромобілів і подібний до європейського Mennekes. Має два типи роз'ємів для повільного та швидкого заряджання.



Рисунок 1.10 – Конектор GB/T [24]

Tesla Supercharger – це ексклюзивна система заряджання, розроблена для швидкого та ефективного заряджання електромобілів Tesla (рис. 1.11). Відзначається високою потужністю від 72 кВт до 250 кВт і більше, що робить його однією з найшвидших мереж заряджання на ринку. Ця ексклюзивна мережа призначена тільки для електромобілів Tesla і використовує технологію заряджання постійного струму.



Рисунок 1.11 – Конектор Tesla Supercharger [25]

Електрозарядна станція, яка є об'єктом дослідження, являє собою об'єднання зарядних станцій (слотів) в одну мережу. Даний зарядний слот та його структурна схема підключення наведена на рис. 1.12.

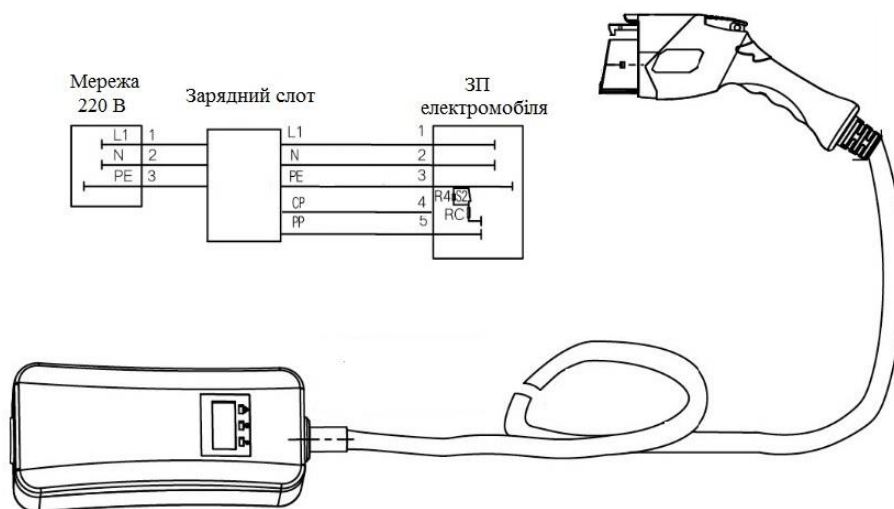


Рисунок 1.12 – Зарядний слот та структурна схема підключення

Основні конструкційні елементи ЕЗС, функції конектора і роз'єму J1772, процес підключення EV до зарядної станції описано нижче. Пристрої комутації, захисту та керування зарядного блоку показано на рис. 1.13.

Контролер керує процесом електропостачання електромобіля під час заряджання [26]. Схему підключення контролеру наведено на рис. 1.14. Контактори використовуються для керування навантаженням (живлення EV), зовнішньої вентиляції та блокування роз'єму J1772. Світлодіодна індикація вказує поточний стан системи. Налаштування величини струму заряджання встановлюється через інтерфейс RS485.

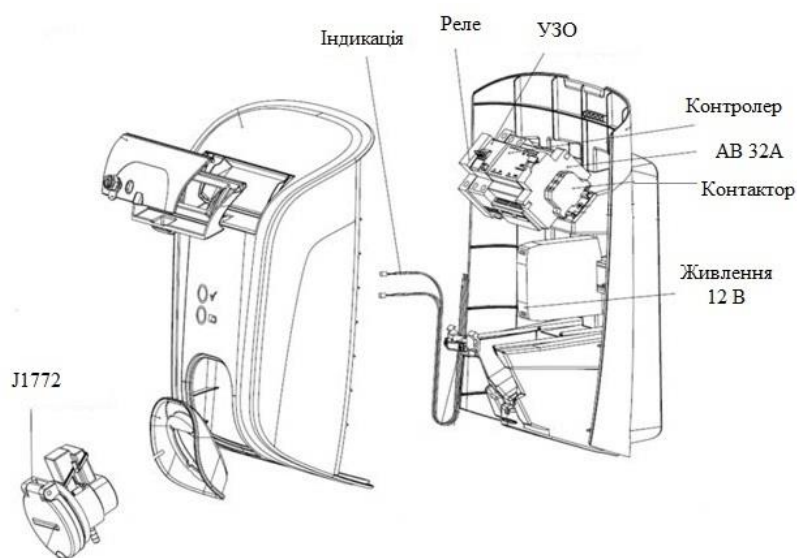


Рисунок 1.13 – Основні пристрої та компоненти зарядної станції [27]

Управління величиною струму заряджання можливе і під час процесу зарядки.

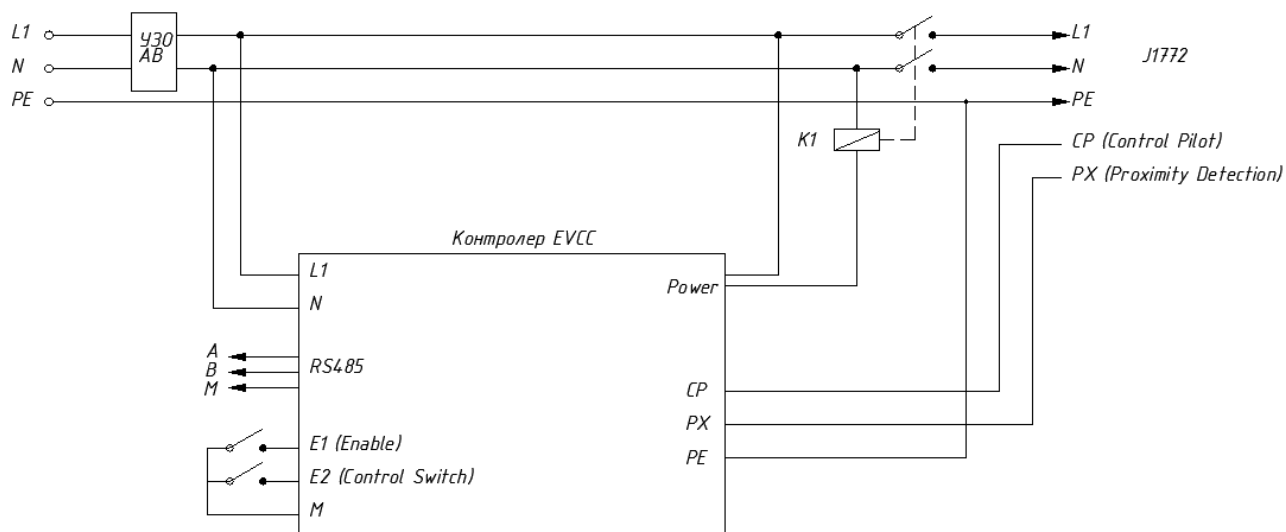


Рисунок 1.14 – Підключення контролеру зарядки

Комунікація між EV та ЕЗС відбувається через контакти CP і PX (рис. 1.14.) та повинна відповідати стандартам IEC 61851-1 [28].

Зарядна станція обладнана захистом від перевантаження (автоматичний вимикач), стрибків напруги (реле мінімальної напруги) та захистом від короткого замикання на землю або корпус, струмів витоку (пристрій захисного відключення).

#### 1.4 Основні вимоги до електричної зарядної станції

Основні вимоги до електрозарядної станції включають в себе безпекові стандарти, сумісність з різними протоколами зарядки, високу якість та надійність, ефективне використання ресурсів енергії, доступність для користувачів, зручний інтерфейс для керування зарядкою, а також можливість моніторингу та управління процесом зарядки. Ці вимоги базуються на нормативних документах, стандартах та правилах, забезпечуючи оптимальну функціональність та безпеку електрозарядних станцій.

До елементів ЕЗС висуваються такі вимоги [30]:

1. **Роз'єми та розетки живлення.** Зарядні станції для електромобілів (EV) використовують роз'єм і вхід SAE J1772 (тип 1) або роз'єм і вхід IEC 62196 (тип 2). Важливо, щоб розетка відповідала типу роз'єму і була здатна

обробляти зарядний струм. Часто використовувані розетки включають тип EF (тип 1) і тип FF (тип 2). Вкрай важливо, щоб роз'єм, кабель і розетка мали відповідні рейтинги та сертифікати. Зарядний кабель для електромобілів повинен демонструвати гнучкість, міцність і достатню довжину, щоб зручно дістатися до входу автомобіля.

2. **Режими заряджання та потужність.** Зарядні пристрої для електромобілів підтримують різні режими заряджання, включаючи заряджання змінним струмом потужністю до 43 кВт і швидке заряджання постійним струмом до 350 кВт. На швидкість заряджання впливає рівень потужності, де вища потужність сприяє швидшому зарядженню, хоча й вимагає більш надійної електричної інфраструктури. Громадські зарядні пристрої для електромобілів зазвичай працюють на  $\leq 50$  кВт, тоді як домашня зарядка зазвичай залишається в діапазоні  $\leq 7$  кВт. Дуже важливо, щоб зарядний пристрій видавав свою номінальну вихідну потужність, не відчуючи перегріву.
3. **Температурні та екологічні характеристики.** Зарядні пристрої для електромобілів, які зазвичай розроблені для роботи в діапазоні температур від  $-30$  °C до  $+50$  °C, повинні витримувати різні екологічні проблеми, такі як вологість, дощ, сніг і потрапляння пилу, які часто позначаються такими показниками, як IP54 або вище. Зарядні пристрої, що піддаються екстремальним умовам, можуть потребувати додаткових корпусів або механізмів обігріву/охолодження. Ефективне управління температурою має вирішальне значення для запобігання перегріву.
4. **Функції безпеки та запобіжні заходи.** Безпека є першочерговою проблемою для зарядних пристроїв для електромобілів, з ключовими захисними функціями, включаючи вимикачі замикання на землю (GFCI), вимикачі ланцюга дугового замикання (AFCI), придушення перенапруг тощо. Моніторинг ізоляції виявляє замикання на землю, а захист від перевантаження по струму та короткого замикання забезпечує

відключення системи під час несправностей. Заряджання має бути припинено, якщо кабель від'єднано або пошкоджено.

5. **Протоколи зв'язку.** Для цілей контролю та вимірювання зарядні пристрої для електромобілів використовують протоколи зв'язку, такі як SAE J1772 або CHAdeMO, для взаємодії з автомобілем. Протокол Open Charge Point Protocol (OCPP) полегшує внутрішній зв'язок для віддаленого керування, а Wi-Fi/стільниковий зв'язок забезпечує доступ до додатків і оплату. Дотримання відкритих стандартів сприяє оперативній сумісності.
6. **Вимірювання та виставлення рахунків.** Щоб полегшити виставлення рахунків, зарядні пристрої для електромобілів вимірюють споживання енергії (у кВт-год) та рівні потужності (у кВт). Розумні лічильники підтримують динамічне ціноутворення та балансування навантаження. Ідентифікація користувачів та обробка платежів вмикаються через зчитувачі RFID-карток або додатки. Відкриті стандарти, такі як OCPP, забезпечують сумісність з будь-якою центральною системою управління. Точний облік залишається невід'ємною частиною заряджання в громадських місцях.
7. **Корпус та інсталяція.** Зарядні пристрої для електромобілів можуть бути встановлені на тумбах, прикріплені до стін або інтегровані в різні конструкції. Корпус повинен бути стійким до несанкціонованого доступу та атмосферних впливів, а правильне кріплення забезпечує стабільність і безпеку. Ергономічні міркування, такі як організація кабелів, світлодіодні ліхтарі та екрани дисплея, покращують взаємодію з користувачем. Продумана конструкція полегшує простий монтаж і обслуговування.
8. **Стандарти електромагнітної сумісності та електромагнітних перешкод.** Щоб пом'якшити проблеми з шумом, зарядні пристрої для електромобілів повинні відповідати стандартам електромагнітної сумісності (ЕМС) та перешкод (ЕМІ). Граничні значення для кондуктивних і випромінюваних випромінювань визначаються такими



стандартами, як FCC Part 15 та IEC 61000. Продемонстрована стійкість до перехідних процесів і перенапруг має важливе значення, а ретельне проектування електрики та системи допомагає запобігти електромагнітним проблемам.

9. **Сертифікація** та дотримання зарядних пристроїв для електромобілів повинні відповідати стандартам безпеки продукції для електричного обладнання, включаючи UL 2202, UL 2594, IEC 61851 та IEC 62477-1. Схвалення регулюючих органів для конкретного ринку, як-от CE, FCC, ETL, CSA та EnergyStar, можуть бути обов'язковими. Відповідність цим стандартам забезпечує безпеку, продуктивність, сумісність і загальне визнання на ринку.

### **1.5 Вплив електричних зарядних станцій на електроенергетичну систему**

При оцінці впливу зарядки електромобілів на енергосистему, розподільча мережа виділяється як компонент, який найбільш схильний до несприятливих наслідків. Розуміння наслідків зарядних пристроїв для електромобілів для систем розподілу з точки зору споживання електроенергії, втрат енергії та коливань напруги має вирішальне значення [31].

Заряджання EV створює додаткове навантаження на мережу, і це навантаження має випадковий характер, змінюючись як за часом, так і за місцем розташування по всій розподільчій мережі. Неочікуваний сплеск впровадження електромобілів може призвести до перевантаження ліній електропередач та кабелів, прискореного старіння трансформаторів, підвищених коливань напруги, збільшення втрат навантаження в електромережі та зниження якості електроенергії [32].

Зважаючи на це, необхідно ретельно вивчити наслідки інтеграції зарядних станцій електромобілів у розподільчу мережу задля розробки системи керування заряджанням в обмежених умовах. Ці дані мають важливе значення для планування

майбутнього розширення мережі та впровадження запобіжних заходів для усунення непередбачуваних подій в електромережі. Вивчення впливу розширення зарядних станцій електромобілів на електромережу було постійною та важливою областю досліджень з моменту появи електромобілів, особливо у встановленні їх стійкості порівняно з традиційними транспортними засобами з двигуном внутрішнього згоряння (ДВЗ). Аналіз впливу заряджання електромобілів на електромережу, дозволить сформулювати рекомендації, спрямовані на управління та регулювання зарядки електромобілів у складі об'єднаної енергосистеми України.

#### 1.5.1 Небаланси в мережах з електричними зарядними станціями

Загроза надмірного пікового навантаження, що насувається, постає як серйозна проблема з широким поширенням, оскільки користувачі електромобілів, як правило, підключають свої транспортні засоби до мережі в години пікового навантаження. Отже, розподільні мережі та трансформатори, що їх живлять, можуть зазнавати серйозних і тривалих перевантажень у міру того, як розвинута мережа зарядних станцій EV [33]. Обмежена потужність розподільних трансформаторів стає вузьким місцем у постачанні електроенергії для підзарядки автомобільних акумуляторів. Крім того, враховуючи, що нові трансформаторні установки складають основну частину витрат на модернізацію мережі, надання пріоритету належній експлуатації та технічному обслуговуванню цих дорогих активів стає важливим для продовження терміну їх служби та уникнення передчасних витрат на заміну [34].

Небаланси можуть виникати на різних рівнях електромережі, включаючи розподільчу мережу та вищу напругу. Одна з причин небалансу полягає у нерівномірному розподілі пікового навантаження між різними станціями, що може призводити до перевантаження деяких секцій мережі та погіршення її стабільності. Також, неправильна установка або нерозуміння вимог до електричних підключень електрозаправних станцій можуть спричиняти небаланси у мережі.

Вплив заряджання та розряджання електромобілів на дисбаланс напруги в розподільчій мережі для побутових споживачів показано за допомогою підходу моделювання Монте-Карло, враховуючи невизначеність у швидкості заряджання електромобілів та місцях підключення, як наведено у роботі [35]. Дослідження показало, що електромобілі мінімально впливають на баланс напруги на початку приєднання, але можуть збільшити коефіцієнт дисбалансу напруги на його кінці. У мережі зберігається небаланс напруги, оскільки більшість побутових навантажень підключені до однієї фази.

Однофазні фотоелектричні системи, побутові акумулятори та зарядні станції для електромобілів можуть сприяти дисбалансу напруги в системі. У системах розподілу електроенергії з довгими лініями електропередач наявні складові напруги негативної послідовності, що призводить до значного порядку дисбалансу лінійного струму системи [36]. Низький негативний опір послідовності підсилює дисбаланс напруги в силовому ланцюзі в 6-10 разів. Наслідки включають потенційне пошкодження ізоляції кабелю, спрацьовування ланцюгів захисту від перевантаження, скорочення терміну служби кабелю, збільшення втрат, додаткові ефекти нагрівання та вразливість системи до збоїв, оскільки незбалансованій системі може бути важко ефективно жити навантаження [37].

Швидке виявлення та усунення дисбалансу напруги в ланцюзі має вирішальне значення для забезпечення безперебійної роботи енергосистеми та пов'язаних навантажень. Прогрес у будові та ефективності зарядних пристроїв для електромобілів спонукає користуватися швидкою зарядкою, а зарядні пристрої рівня 3 дозволяють заряджати акумулятор менш ніж за 30 хвилин. Стабільність мережі покращується, коли комунальне підприємство забезпечує симетричне навантаження на високих рівнях потужності, а стандартизована інтеграція мережі відновлюваних джерел енергії забезпечує безпеку, послідовність технічного обслуговування, експлуатаційні характеристики.

### 1.5.2 Гармонійні спотворення

Гармонійні спотворення – це відхилення форми сигналу струму або напруги від ідеальної синусоїдальної форми. Нелінійні навантаження, такі як контролери заряду електромобіля, зазвичай демонструють спотворення струму, оскільки вони використовують перемикачі силової електроніки для перетворення змінного струму в постійний. Введення цих спотворених струмів у систему розподілу може призвести до порушення напруги електропостачання та перевантаження цінного електричного розподільного обладнання. Для захисту від негативного впливу гармонік на електропостачання було створено стандарт IEEE 519-1992. Його метою є визначення «рекомендованих практик і вимог до керування гармоніками в електроенергетичних системах» (IEEE 519-1993). Цей стандарт окреслює проблеми, які неконтрольовані спотворення гармонійного струму можуть спричинити в електричних системах, і визначає прийнятний рівень гармонік, який може витримати система. Стандарт наголошує на відповідальності користувачів за погіршення напруги шляхом споживання значних нелінійних або спотворених струмів [38].

У випадку зарядних пристроїв I та II рівнів бортові випрямлячі з керуванням AC-DC включені в заряджання автомобіля, підключаючись до електромережі через однофазний роз'єм. Зарядні пристрої рівня III, відомі як швидкі зарядні пристрої постійного струму, використовують електроніку контролера заряду для контролю заряджання [39]. Незалежно від рівня заряду, гармонійні спотворення, що вносяться в систему розподілу цими контролерами заряду, можуть бути кількісно визначені в термінах повного гармонійного спотворення (THD). Важливо визнати, що коефіцієнт нелінійних спотворень зарядного пристрою зазнає коливань протягом усього циклу заряджання, що відповідає змінам кутів спрацьовування перемикачів силової електроніки у відповідь на різні фази процесу заряджання (що буде досліджено в параграфі 2.1.4 цієї дисертації). Крім того, коли кілька електромобілів підключені до однієї слоту, THD на приєднанні збільшується.

Силові трансформатори стикаються з особливими труднощами, коли мова йде про гармоніки струму. Помітним наслідком підвищеного вмісту гармонік в системі є втрати, що виникають від струмів вищого порядку, що циркулюють в обмотках трансформатора. В результаті трансформатор в кінцевому підсумку споживає більше реальної потужності, ніж очікувалося спочатку, знижуючи його ефективність у постачанні електроенергії споживачам. Додатковою проблемою, що виникає при підвищенні гармонік, є виникнення втрат на вихрові струми. Ці струми викликають аномальне підвищення температури в обмотках пристрою. Підвищена температура прискорює втрату ізоляції всередині трансформатора, що потенційно може призвести до скорочення терміну служби обладнання [40]. Вихрові втрати виявляють частотну залежність, що робить гармоніки вищого порядку особливо проблематичними для трансформаторів. Ці втрати можуть підвищити температуру масла, що призведе до підвищення температури гарячих точок всередині трансформатора. Такий сценарій сприяє передчасному зносу ізоляції трансформатора та масла, що в кінцевому підсумку створює ризик виходу обладнання з ладу [40].

Існування гармонійних струмів може мати негативний вплив на захисне релейне обладнання, розподільні пристрої та апаратуру обліку. Релейне обладнання може працювати повільніше, оскільки вищі значення підхоплення, ніж призначені налаштування, можуть спричинити неочікувані операції. Запобіжники, що піддаються нагріванню від гармонік, можуть піддаватися передчасному спрацьовуванню. Подібно до силових трансформаторів, гармонійні струми можуть підвищувати нагрівання в трансформаторах струму і трансформаторах напруги через втрати, вихрові струми та насичення сердечника, що призводить до скорочення терміну служби цих пристроїв. У розподільних пристроях наявність гармонік сприяє нагріванню, зменшує постійну силу струму та скорочує термін служби ізоляційних компонентів [41].

## 1.6 Умови підключення електричних зарядних станцій

Встановлення зарядної станції підлягає таким же правилам підключення, як і будь-які інші електричні установки, тому станція повинна бути сертифікована в Україні.

Згідно Правил підключення електроустановок до електричної мережі [42], стандартне приєднання поділяється на такі ступені потужності: перший - до 16 кВт; другий - від 16 кВт до 50 кВт; третій - від 50 кВт до 160 кВт.

Технічні умови на приєднання до мереж ЕЗС, що видаються електропостачальною компанією у межах резерву потужності трансформаторів та пропускної спроможності електричних мереж у відповідний період доби, містять обов'язкові вимоги щодо автоматичного обмеження потужності у цей період та автоматичного відключення протягом іншого часу. У разі потужності споживання не на межі балансової належності електричних мереж, то підключення відбувається за рахунок зменшення дозволеної потужності ЕЗС [43].

Якщо проект включає в себе плани щодо подальшого розширення, то на першому етапі рекомендується заздалегідь завершити всю інженерну роботу для другого етапу (фундаменти та підземні кабельні лотки). Проте, при розміщенні електрообладнання не потрібно враховувати майбутні потреби.

Деякі виробники пропонують зарядні станції з декількома кабелями, що дає змогу заряджати більше одного EV, використовуючи доступну потужність. При проектуванні ЕЗС для декількох EV, особливо необхідно враховувати обмеженість потужності вводу, так як подальше оновлення тягне за собою великі фінансові витрати на підвищення зарядної потужності станції.

Одночасно з тим, порядок розташування автомобілів під час заряджання теж регламентуються. Наведено основні положення управління чергою на паркувальних місця, що обладнані ЕЗС [44]:

- Основним призначенням паркувальних місць, обладнаних непобутовими ЕЗС, є зарядка, а не парковка транспортного засобу.

- У разі, якщо електричний транспортний засіб має потребу у зарядці, він має пріоритетне право на зайняття паркувального місця (місця автостоянки), обладнаного непобутовою ЕЗС.
- Власники приватних паркувальних майданчиків (автостоянок), повинні забезпечувати управління чергою на доступ до непобутових ЕЗС. Не допускається необґрунтована відмова, пріоритетне просування в черзі та будь-яка інша нецінова дискримінація осіб, що мають намір зарядити транспортний засіб, на підставі членства у клубі, об'єднанні та/або з інших підстав.
- Власники побутових ЕЗС мають пріоритетне право на користування ними. Одночасно, власники побутових ЕЗС можуть надавати право користування ЕЗС іншим особам на платній або безоплатній основі. Надання права користування побутовою ЕЗС власником ЕЗС іншим особам на платній основі вважається підприємницькою діяльністю у вигляді надання послуг з користування ЕЗС.

### **1.7 Висновки до Розділу 1**

Враховуючи високі темпи зростання ринку електромобілів, основні принципи підключення зарядних станцій до мережі та необхідність правильної черговості заряджання електромобілів, виникає потреба в розробці методу управління електрозарядними станціями в реальному часі, що має забезпечити кожному електромобілю гарантоване заряджання в умовах обмеженого електроспоживання. Для цього необхідно вирішити наступні задачі даного дисертаційного дослідження:

1. Проаналізувати ринок електромобілів в Україні та необхідність розробки методу управління електрозарядними станціями в реальному часі з використанням принципів нечіткої логіки.

2. Визначити вхідні данні для систем керування електрозарядними станціями та сформулювати вихідні данні для розробки методу управління зарядкою електромобілів в середовищі Matlab Simulink.

3. Застосувати алгоритм нечіткої логіки як математичного інструменту для керування зарядними станціями з ваговим індексом заряджання та оптимізаційною частиною, базованою на гравітаційному методі.

4. Перевірити ефективність запропонованого алгоритму контролю зарядки в порівнянні з типовим алгоритмом та описати процедури впровадження нечіткого контролера у процес заряджання, включаючи деталі програмування та реалізації на мікроконтролері Arduino Mega 2560.



## **РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ ПІДХОДІВ ДО КЕРОВАНОЇ ЗАРЯДКИ ПАРКУ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ**

### **2.1 Системи керованої зарядки**

#### **2.1.1 Роль та принципи інтелектуального управління заряджанням електромобіля**

Моніторинг розглядається як система заходів для спостереження і контролю, які виконуються специфічним чином для оцінки стану досліджуваного об'єкта, аналізу протікання процесів та вчасного виявлення тенденцій його зміни. Енергетичний моніторинг розглядається як комплекс заходів (спостережень, оцінок, прогнозів), що надає можливість постійно контролювати режим споживання паливно-енергетичних ресурсів у технологічній системі, реєструвати його ключові показники, оперативно виявляти результати впливу зовнішніх і внутрішніх факторів на ефективність енергоспоживання.

Згідно зі стандартом ISO 50001 [46], моніторинг енергоефективності становить обов'язкову складову енергоменеджменту. Він ґрунтується на зборі інформації щодо досліджуваного об'єкта і спрямований на перевірку дотримання режимів енергоспоживання, виконання запланованих заходів і режимів роботи, а також відповідність встановленим значенням енергетичних показників. Інтелектуальний аналіз даних, отриманих із системи моніторингу, сприяє виявленню циклічних змін умов роботи досліджуваного об'єкта через вплив зовнішніх (соціальних або кліматичних) факторів [47] та формалізованому опису типових умов функціонування. Систематизація отриманої інформації дозволяє своєчасно реагувати на зміни умов досліджуваного об'єкта та коригувати технологічний процес для забезпечення ефективного використання природних та енергетичних ресурсів. Іншими словами, наявність необхідної інформації, яка відповідає вимогам повноти, достовірності та своєчасності, надає можливість ефективно планувати та контролювати технологічні процеси та режим енергоспоживання. Отже, моніторинг енергоефективності слід розглядати як складову управлінської діяльності, яка передбачає спостереження за станом,

параметрами та характеристиками досліджуваного об'єкта для формування інформаційної бази для аналізу та оцінки тенденцій у енергоспоживанні, а також для підготовки та прийняття обґрунтованих управлінських рішень [7].

Велика кількість електромобілів, які потребують одночасного заряджання, створює додаткове електричне навантаження та може перевантажити електромережу під час денної зарядки [48]. Для уникнення пікового попиту на електроенергію, що використовується для зарядки електромобілів, необхідне планування процесу заряджання та узгодження режиму роботи зарядної станції з електромережею.

Організація режиму роботи зарядної станції та профілю заряджання парку електромобілів автотранспортного підприємства повинна здійснюватися з позиції «активного споживача». При такому підході цільовими функціями управління режимом роботи зарядної станції є оптимізація енергоспоживання підприємства, а також оптимізація режиму навантаження електричної мережі; Зниження пікових навантажень та вирівнювання графіка навантаження енергосистеми.

Більшість рішень проблеми заряджання великої кількості електромобілів базується на різних типах планування та створенні для них зарядного профілю - сценаріїв заряджання з технічними обмеженнями. Ці ліміти залежать від ситуації на зарядній станції (кількість електромобілів, рівень їх заряджання, можливість одночасного технічного обслуговування, заявлений час заряджання). Зручний період заряджання парку електромобілів та графік завантаження мережі можуть конфліктувати. Крім того, згідно з Правилами користування електроенергією [43], в договорі на споживання електричної енергії вказується допустима потужність для підприємства. Порухення цього ліміту може призвести до знеструмлення об'єкта. Тобто можлива ситуація, коли акумулятори електромобілів заряджаються за допомогою бортових зарядних пристроїв, підключених до зарядних станцій в умовах обмеженої потужності підключення. Таким чином, система управління заряджанням у режимі реального часу для парку електромобілів повинна

забезпечувати кожному електромобілю гарантовану зарядку в умовах обмеженого енергоспоживання.

Сучасні технології розвитку «розумних мереж» та розумного управління енергією базуються на ряді технологічних можливостей, серед яких мережева аналітика, автоматизоване зчитування показань лічильників, віддалений моніторинг, управління мобільними робочими пристроями, а також використання SCADA-систем, що працюють через протокол Інтернет [49]. Це полегшує використання інформаційно-комунікаційних можливостей для двосторонньої взаємодії з технологічною та комерційною інфраструктурою енергосистеми за рахунок інтелектуального обліку в режимі дистанційного управління навантаженням; самостійне реагування споживача з урахуванням тарифу на електроенергію. Здатність суб'єкта контролю вимірювати і спостерігати за поведінкою об'єкта контролю є основоположною.

Для того, щоб забезпечити взаємодію зарядної станції як «активного споживача» та енергетичної компанії, необхідно впровадити систему моніторингу режиму роботи зарядної станції. Такий моніторинг передбачає спільне вирішення низки завдань: моніторинг процесу заряджання електромобілів, підключених до зарядної станції; моніторинг навантаження, що генерується зарядною станцією на електромережу; мінімізація споживання електроенергії; мінімізація витрат на електроенергію.

### 2.1.2 Звичайний керований метод заряджання з обмеженнями

Звична стратегія заряджання для постачальника електроенергії передбачає відстеження завантаження трансформатора в режимі реального часу та обмеження процесу зарядки, якщо мережа перевантажена [50]. Для реалізації цієї стратегії, [51] пропонує так званий принцип "перший прийшов - перший заряджається" як еталонне рішення для уникнення перевантаження мережі. Алгоритм процесів даного методу показано на рис. 2.1.

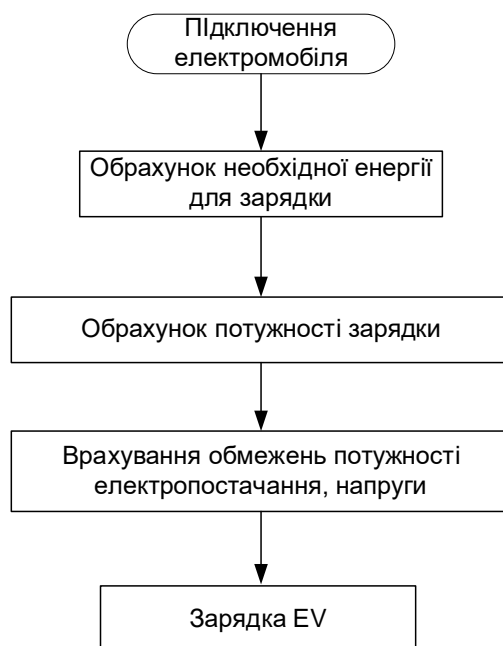


Рисунок 2.1 – Етапність звичайного керованого методу

Незважаючи на те, що цей алгоритм задовольняє обмеженням мережі для безпечної експлуатації, це часто незручно для тих електромобілів, які можуть підключитися пізніше, але потребують термінової зарядки, оскільки вони будуть припарковані на короткий час, ніж попередньо підключені електромобілі, що планують відключитися набагато пізніше. Рис. 2.2 показує як даний метод в умовах обмеженої потужності електропостачання ЕЗС буде нерівномірно розподіляти енергію до електромобіля, який прибуде пізніше, матиме меншу тривалість стоянки, але потребуватиме таку ж енергію для заряду, як і для іншого електромобіля з більш тривалим часом стоянки.

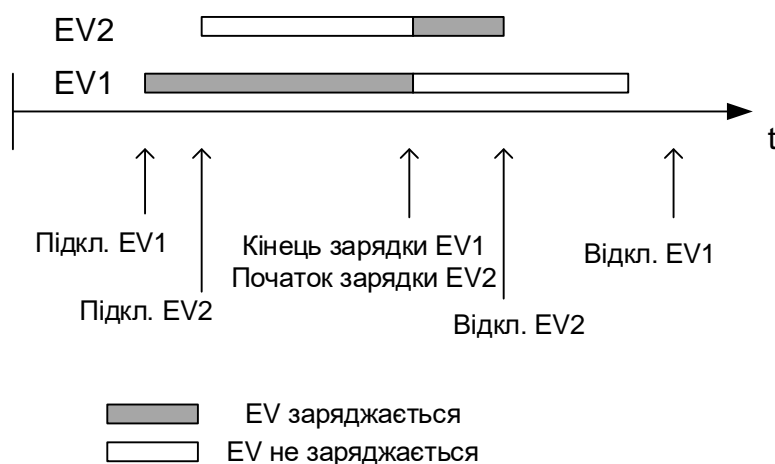


Рисунок 2.2 – Послідовність заряджання звичайного керованого методу

### 2.1.3 Алгоритми керування з вирішенням оптимізаційної задачі

Більшість вирішень проблеми заряджання великої кількості електромобілів лежить на різних видах планування зарядки електромобілів у не пікові години. Іншими словами, оператори мережі вирішують лінійні та квадратичні задачі оптимізації для створення сценаріїв заряджання з технічними обмеженнями. Ці обмеження залежать від параметрів мережі та встановлюють кількість EV, які можуть обслуговуватись за кожен період часу [51].

Система керування ЕЗС (СКЕ), що показана на рис. 2.3, взаємодіє з мережею та електропостачальною організацією. Цей метод - гнучка оптимізація зарядки EV, що враховує обмеження мережі. Зібравши статистику від підключених EV та бажаного графіку навантаження, система намагається оптимізувати заряджання EV таким чином, щоб задовольняти очікувані вимоги на зарядку, слідуючи установленому графіку навантаження та не порушуючи лімітів мережі [52].

Функції системи керування ЕЗС та види взаємодії:

- Збір та зберігання даних: СКЕ збирає дані про історію поїздок усіх EV.
- Прогнозування підключень: прогнозування підключень є невід'ємною частиною роботи СКЕ, яке передбачає визначення часу найближчих підключень EV на основі зібраних даних. Прогнозування підключення також використовується для визначення кривої навантаження, установленої мережею.
- Оптимізація зарядки: ця оптимізація є основою СКЕ для обчислення індивідуальних графіків зарядки для кожного EV. Щоб максимізувати заряджання для EV та мінімізувати грошові витрати, оптимізація повинна також включати інші умови – уникати перевантаження мережі.
- Зв'язок з енергопостачальною організацією для збору даних.

Оптимізація зарядки EV залежить від конкретних потреб кожного транспортного засобу. Кінцевий користувач сподівається, що його батарея буде достатньо заряджена, щоб запустити наступну поїздку. Найбільш консервативною стратегією для досягнення цієї мети є використання прямої зарядки [52]. Стратегія

полягає в тому, щоб використовувати гнучкість у часі заряджання для зменшення вартості заряджання та уникнення перевантажень в мережі. У цьому випадку необхідна оцінка майбутнього підключення та відключення EV для загальної точності планування. Таким чином, для кожного EV збирається така інформація:

- час відправлення: відмітка часу, яка вказує, коли подорож розпочато;
- час прибуття: часовий штамп, який вказує, коли подорож закінчився;
- рівень заряду АКБ під час відправлення;
- стан енергії в момент прибуття;
- місце в момент прибуття: відстань, подолана між підключенням до ЕЗС.

На підставі цих даних прогнозується набір можливих поїздок для кожного окремого EV. Прогнозовані дані включають час відправлення, час прибуття, потребу в енергії та планований необхідний запас ходу для кожного електромобіля. На основі цих даних вирішується оптимізаційна задача з обмеження параметрів мережі та планується розклад заряджання та утримання EV під час підключення до ЕЗС [52].

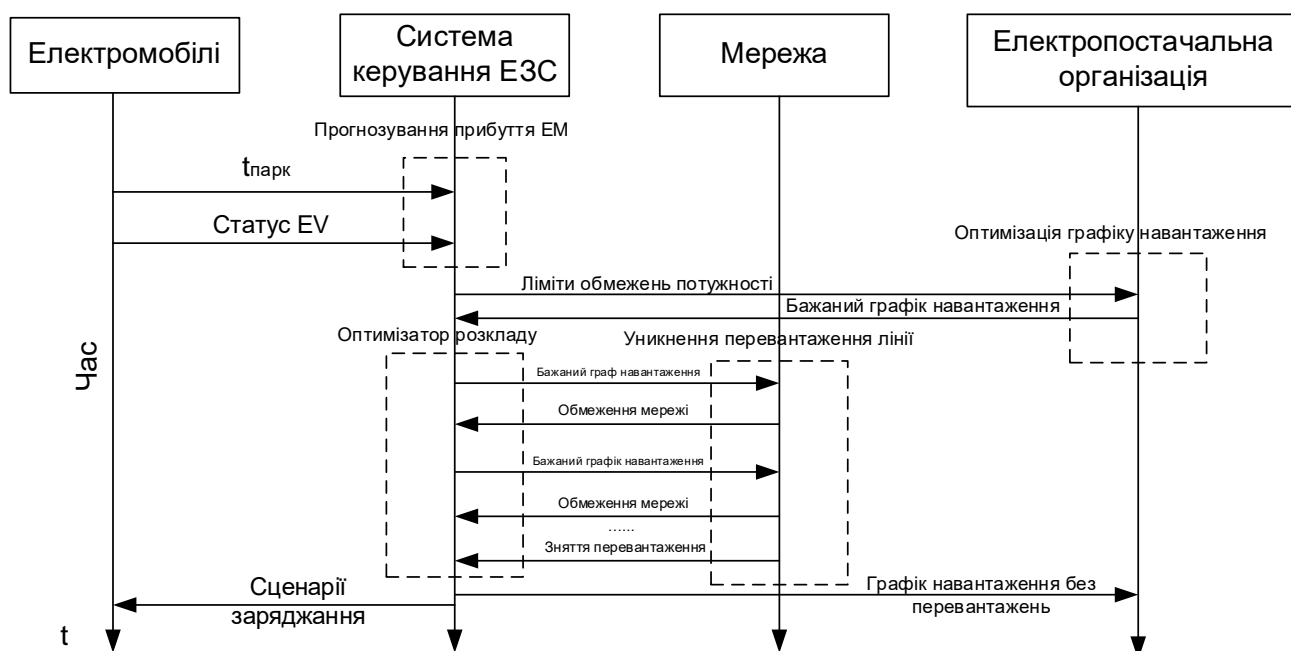


Рисунок 2.3 – Гнучка оптимізація зарядки EV, що враховує обмеження мережі

Можна передбачити прибуття та відправлення транспортних засобів, але досить складно визначити час, необхідний для зарядки кожного автомобіля. Також, зручний для власника авто час дня для зарядки та графік навантаження мережі можуть конфліктувати [45]. У цьому випадку алгоритми зарядок повинні також забезпечувати гарантоване заряджання для кожного електромобіля, а не тільки нормальні умови роботи мережі.

#### 2.1.4 Непрямий контроль за статичним часом використання

Для методу непрямого контролю EV власники авто розраховують свій час на зарядку, щоб звести до мінімуму свої витрати на споживання електроенергії ґрунтуючись на тарифах на електроенергію. Вони не беруть до уваги зарядку інших електромобілів та обмеження мережі.

У цьому методі використовується один статичний тариф часу використання до всіх EV, щоб ініціювати зарядку під час низьких цін на електроенергію і низького навантаження в мережі, відповідно (див. рис. 2.4) [53].

$$t_{\text{підключ}} = t_{\text{відїзду}} - t_{\text{прибуття}} \quad (1)$$

$$t_{\text{вільне}} = t_{\text{підключ}} - t_{\text{зар}} \quad (2)$$

На момент, коли електромобіль під'єднується до зарядної станції, розраховується кількість енергії на яку він повинен зарядитись. Залежно від зарядної потужності та заряду енергії EV, розраховується кількість етапів часу, необхідних для заряджання акумулятора. Розраховується час живлення від мережі (1), щоб отримати згадані етапи часу з найнижчою вартістю електроенергії. Якщо можливі декілька варіантів часу з низькими цінами, то електромобілю надається найближча.

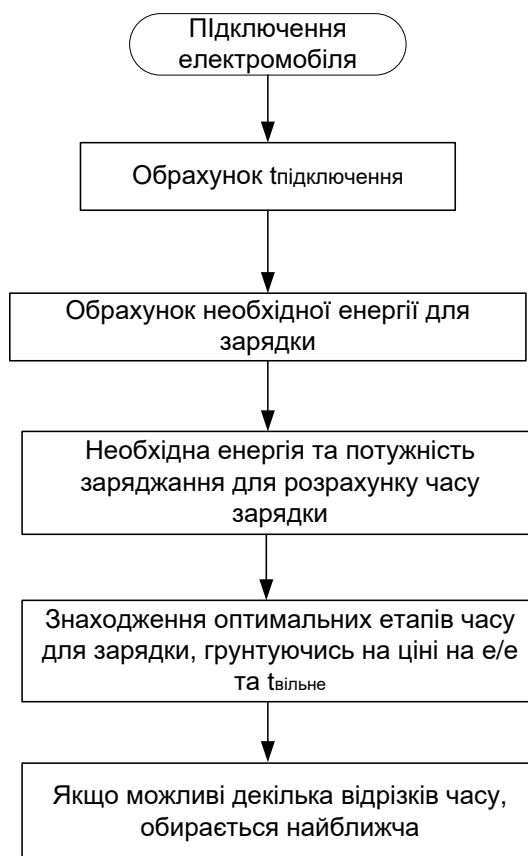


Рисунок 2.4 – Непрямий контроль за статичним часом використання

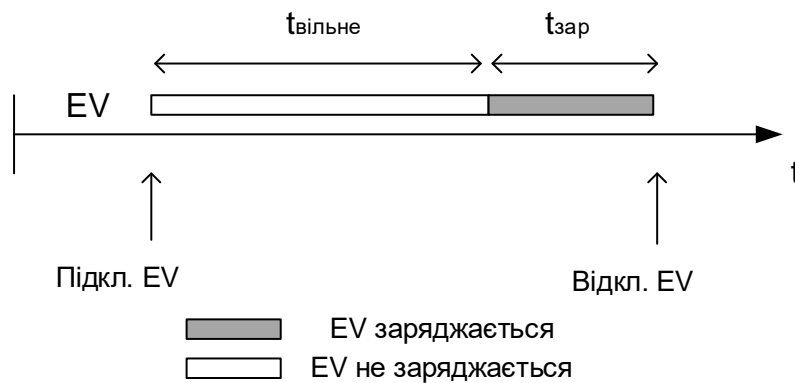


Рисунок 2.5 – Послідовність заряджання

Непрямий метод контролю - статичний час використання може бути реалізований за допомогою функції таймера більшістю сучасних EV. Витрати на технічну реалізацію є низькими, але цей метод може призвести до протилежних наслідків. Замість зменшення навантаження мережі можуть виникати сильні падіння напруги та новий пік навантаження, створений великою кількістю EV [54].



## 2.2 Експериментальні дослідження вихідних даних

Основою для формування методу управління ЕЗС являються характеристики процесів зарядки акумуляторів EV. Тому була поставлена задача експериментальних досліджень зарядних характеристик АКБ.

### 2.2.1 Теоретичні дані вимірювань параметрів батареї електромобіля

Спрощена еквівалентна схема зарядки акумулятора EV приведена на рис. 2.6 [55]. Згідно схеми для управління необхідні такі значення: потужність зарядки, профіль процесу заряду, зміна рівня заряду, напруга та струм акумулятора, коефіцієнт ефективності зарядного пристрою.

Модель батареї EV складається з керованого еквівалентного джерела напруги  $V_{XXекв}$  та еквівалентного опору  $R_{екв}$ .  $V_c, i_c$ - напруга та струм мережі [13]. Що стосується  $V_{бат}, i$ , то це визначає напругу та струм на стороні акумулятора, що наявні під час заряджання.

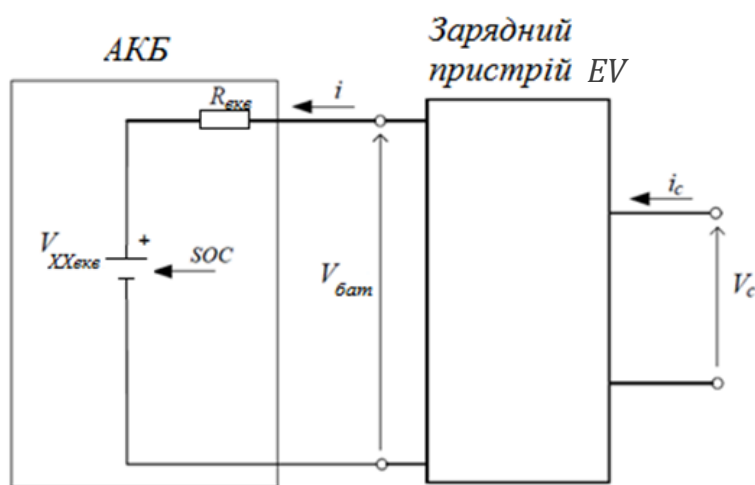


Рисунок 2.6 – Спрощена схема електричної частини EV

Напруга акумулятора визначається як:

$$V_{бат} = V_{XXекв} + R_{екв} \cdot i \quad (2.1)$$

Зміна рівня заряду батареї під час заряджання:

$$SOC(k) = \sum_{k=1}^N \frac{dQ(k)}{Q_n} + SOC_{початк}$$

$$dQ(k) = i(k) \cdot T_i, \quad (2.2)$$

де  $k$  - номер періоду часу та  $N$  - кількість періодів часу протягом зарядки,  $T_i$ - період,  $dQ$  - зміна ємності акумулятора для кожного періоду.

Потужність на стороні акумулятора та мережі розраховується за допомогою наступних рівнянь [56]:

$$\begin{aligned} P_{dc} &= V_{\bar{a}m} \cdot i \\ P_{ac} &= V_c \cdot i_c \end{aligned} \quad (2.3)$$

Потужність також є функцією від рівня заряду акумулятора та (2.3) може бути переписано як:

$$\begin{aligned} P_{dc}(SOC) &= V_{\bar{a}m}(SOC) \cdot i \\ P_{ac}(SOC) &= V_c \cdot i_c(SOC) \end{aligned} \quad (2.4)$$

$P_{ac}$  не зберігається постійним під час заряду; з урахуванням ефективності зарядного пристрою:

$$P_{ac} = \frac{P_{dc}}{\eta}, \quad (2.5)$$

з (2.4) та (2.5),  $i$  може бути виражено як:

$$i(SOC) = \eta \cdot \frac{V_c \cdot i_c}{V_{\bar{a}m}(SOC)} \quad (2.6)$$

Типовий Li-ion акумулятор, та той, що розглядатиметься надалі, заряджається найпростішим методом постійного струму та постійної напруги (Constant Current/Constant Voltage, далі - CC/CV). Він є найбільш широко прийнятим методом на практиці через легку реалізацію та відсутності небезпечної для батареї перенапруги. На першому етапі до батареї подається постійний струм доки напруга акумулятора не досягне заданої величини. На другому етапі напруга буде зберігатися постійною, а струм зменшуватиметься експоненціально, доки процес заряду не завершиться [57]. Типові криві зміни напруги та струму протягом зарядки методом постійного струму та постійної напруги представлено на рис. 2.7.

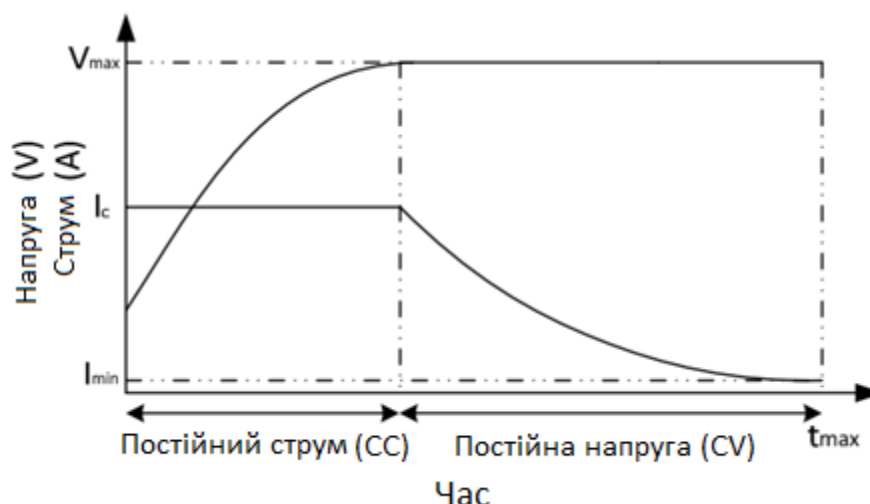


Рисунок 2.7 – Стадії заряду Li-ion батареї методом постійного струму та постійної напруги (CC/CV) [57]

Як показано на рис. 2.7, режим постійного струму (CC) закінчується, коли напруга досягає  $V_{max}$ . Процес зарядки, як раніше було згадано, завершується, коли струм зменшується до заданого рівня. Після зміни режиму на постійну напругу (CV) заряд займає більше часу. Однак, це зроблено для того, щоб підзарядом меншим струмом продовжити термін служби батареї та уникнути перегрівання.

### 2.2.2 Виміри параметрів під час зарядки

Згідно з [58], рівень заряду батареї (SOC - State of Charge) обмежений з 20% по 90%.

Зарядка виконується методом постійного струму (CC), доки рівень заряду не досягне 80% та, надалі постійною напругою (CV) до 100% рівня.

Експериментальний безколекторний двигун постійного струму живиться від 16-ти літій-іонних батарей InnoPOWER-LFMP40AH з номінальною ємністю 40А\*год. Літій-іонний тип акумулятора найбільш популярний вид, що використовується в електромашинобудуванні. Структурна схема лабораторної установки приведена на рис. 2.8. Як видно, аналізатор мережі вимірює параметри як на стороні батареї, так і мережі.

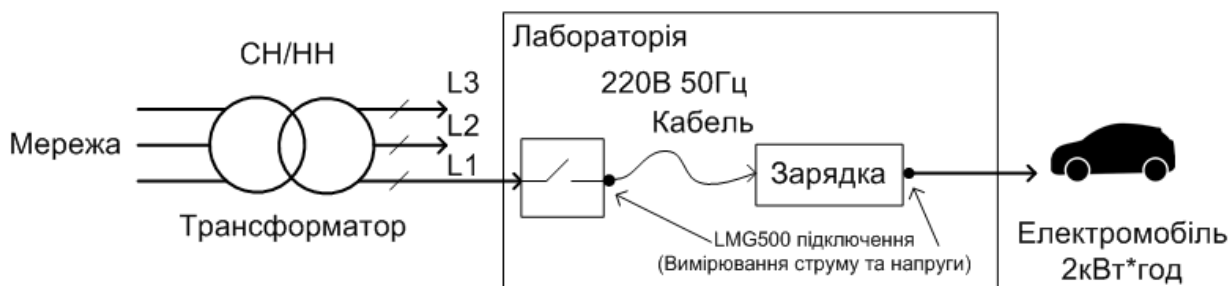


Рисунок 2.8 – Схема лабораторних вимірів

Аналізатор мережі високої точності ZES ZIMMER LMG500 використовується для вимірювання та запису даних. Навантаження зарядки, що безпосередньо впливає на мережу, вимірюється за допомогою MAS-додатка для LMG500. Технічні параметри батарейного блоку наведені в табл. 2.1. [59].

Таблиця 2.1 – Параметри батарейного блоку електромобіля

Електричні параметри	Величина
Ємність, $E_{nom}$	2 кВт·год
Номінальна ємність, $Q_n$	40 А·год
Номінальна напруга, $U_n$	51,2 В
Зарядна напруга, $U_c$	58,4 В
Макс. напруга розряду, $U_d$	44,8 В
Середній зарядний струм (0,5C), $I_c$	20 А
Стандартний зарядний струм (0,3-1,0C), $I_j$	12-40 А

Батарейний блок розряджався зі струмом навантаженням 20 А (0,5 С) при використанні ITECH DC Electronic Load.

Зарядний пристрій для акумулятора - це однофазна неконтрольована однонаправлена зарядка ЛІА RUI JR-B900 (табл. 2.2).

Таблиця 2.2 – Параметри зарядного пристрою

Електричні параметри	Величина
АС Вхід	
Напруга, В	180-240
Струм, А	7
DC Вихід	
Напруга, В	58,4
Струм, А	15

Коефіцієнт корисної дії зарядного пристрою може бути розрахований як:

$$\eta_c = \frac{S_{ac}}{S_{dc}}, \quad (2.7)$$

де  $S_{ac}$  та  $S_{dc}$  потужність навантаження на стороні мережі та батареї, відповідно.

### 2.2.3 Вимірювання гармонік

Основна мета даних досліджень полягає в тому, щоб показати вплив гармонік напруги та струму на мережу низької напруги під час заряджання електромобіля [60]. Як відомо, акумулятор електромобіля потребує постійний струм для заряджання. Інвертори та DC-DC перетворювачі (нелінійне навантаження) перетворюють і регулюють постійний струм зі змінного. Саме топологія схеми зарядного пристрою викликає нелінійність споживаного струму. Експериментальний зарядний пристрій є найпростішим неконтрольованим однофазним випрямлячем, і тому наявні великі гармоніки струму та низький коефіцієнт потужності.

Висока нелінійна частка призводить до нелінійних падінь напруги та спотворення напруги. Це призводить до таких негативних речей, як зниження ефективності пристроїв, перенапруги або перевантаження [41].

Сигнал струму та напруги може бути представлений як сума синусоїдальних форм на різних гармонійних частотах. Загальний рівень спотворень - загальний коефіцієнт гармонійних спотворень (Total Harmonic Distortion, THD).

Розрахунки коефіцієнтів гармонійних спотворень для напруги та струму до 40 гармоніки:

$$THD_U = \sqrt{\frac{\sum_{h=2}^{40} U_h^2}{U_1^2}} \quad (2.8)$$

$$THD_I = \sqrt{\frac{\sum_{h=2}^{40} I_h^2}{I_1^2}}, \quad (2.9)$$

де  $h$  – номер порядку гармоніки,  $U_h$ ,  $I_h$  – дійсні величини напруги та струму на  $h$ -тій гармоніці,  $U_1$ ,  $I_1$  – напруга та струм для головної частоти (50 Гц).

Таблиця 2.3 – Межі гармонік струму для електричних пристроїв класу А

№ гармоніки	Максимальний $I_h$ , [А]
2	1,08
3	2,30
4	0,43
5	1,14
6	0,30
7	0,77
8÷40	0,23·8/n
9	0,4
11	0,33
13	0,21
15÷39	0,15·15/n

Щоб зробити правильний висновок після обробки вимірюваних даних, важливо визначити стандарти, які обмежують гармонічні спотворення в мережі. У

цій роботі основним об'єктом дослідження є зарядний пристрій для батарей електромобіля, згаданий раніше.

Зарядний пристрій споживає струм нижче 16 А. У цьому випадку стандартом, що застосовується для цього пристрою, є ІЕС 61000-3-2 для апаратів класу А [61]. Табл. 2.3 містить межі для кожної гармоніки струму від 2-ї до 40-ї.

Зважаючи на табл. 2.3, найвищий коефіцієнт THDi становить 17,3%, як для приватних зарядних пристроїв, підключених до публічної мережі.

Що стосується гармонік напруг, то стандарт EN50160 визначає межі цих параметрів у низьковольтних мережах. Межі вказані в табл. 2.4.

Таблиця 2.4 – Межі гармонік напруги для електричних пристроїв класу А

№ гармоніки	Максимальна $U_h$ , [%]
2	2 %
3	5 %
4	1 %
5	6 %
6÷24	0,5 %
7	5 %
9	1,5 %
11	3,5 %
13	3 %
17	2 %
25	1,5 %

Аналізатор потужності LMG500 також працює як високоточний гармонічний аналізатор. Мета досліджень полягала в реалізації повного циклу заряджання під час вимірювання гармонік струмів та напруг. Був використаний 2 тип заряджання - ЕМ підключений до мережі низького напруги (НН) з однофазним зарядним

пристроєм JR-B900. Номінальна потужність зарядного пристрою 1,6 кВт. Аналізатор потужності LMG500 підключений у точці між зарядним пристроєм та НН мережею для вимірювань змінного струму, а також між зарядним пристроєм та батареєю для вимірювань постійного струму, як показано на рис. 2.8.

Гармонійний аналізатор налаштований згідно згаданих стандартів. Даний пристрій вимірює та записує значення гармонік струму та напруги в діапазоні від 0 до 2000 Гц. Значення гармонік  $I_{(n)}$  та  $U_{(n)}$  розраховуються за допомогою алгоритму дискретного перетворення Фур'є. Сумарне гармонійне спотворення розраховується відповідно до (2.8) та (2.9).

#### 2.2.4 Результати вимірів

Зарядка Li-ion акумулятора InnoPOWER-LFMP40AH займає 3 години і складається з трьох фаз:

1. початок зарядки (струм, споживаний батареєю ЕМ, швидко зростає);
2. основний період зарядки (постійний струм);
3. кінець зарядки (струм заряджання повільно зменшується).

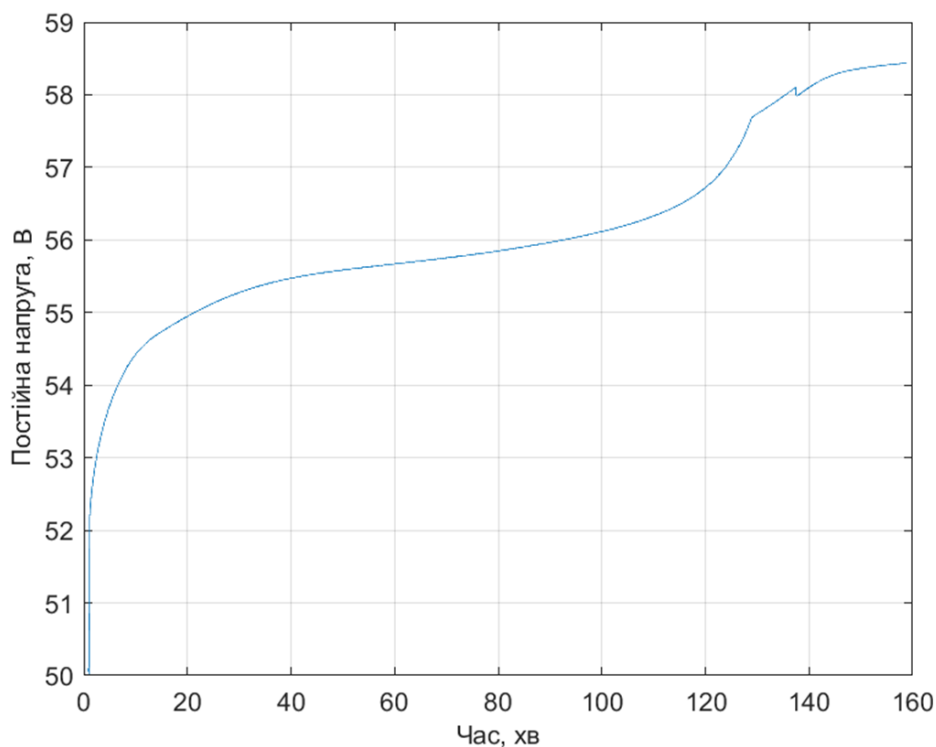


Рисунок 2.9 – Збільшення постійної напруги на шині батарей під час заряджання



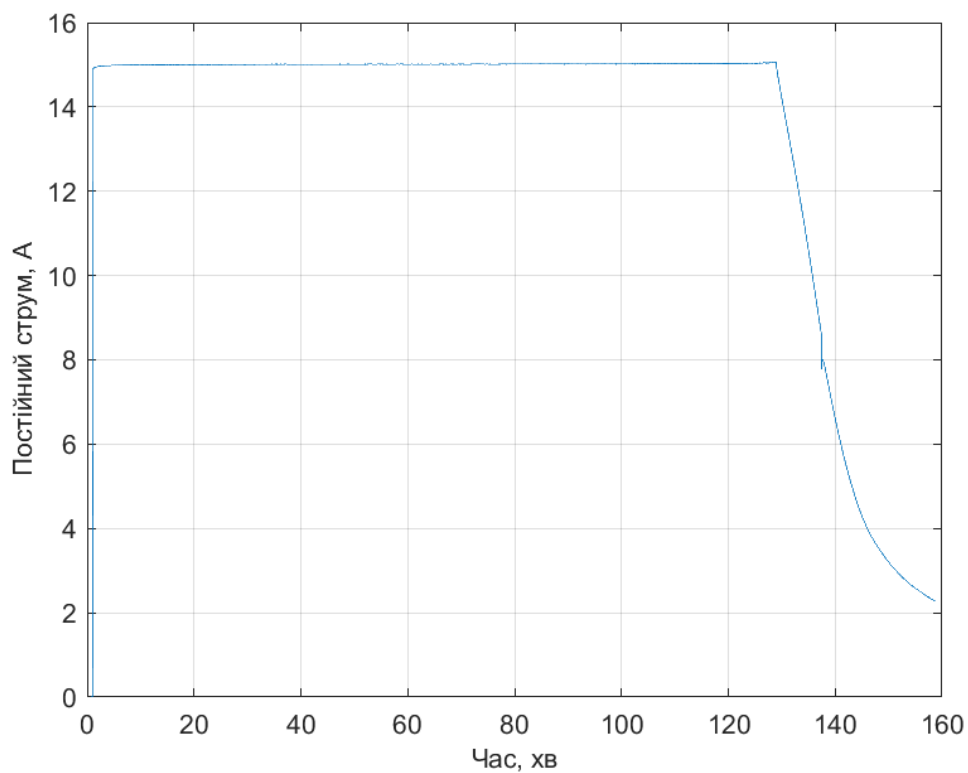


Рисунок 2.10 – Постійний струм на шині батарей протягом зарядки

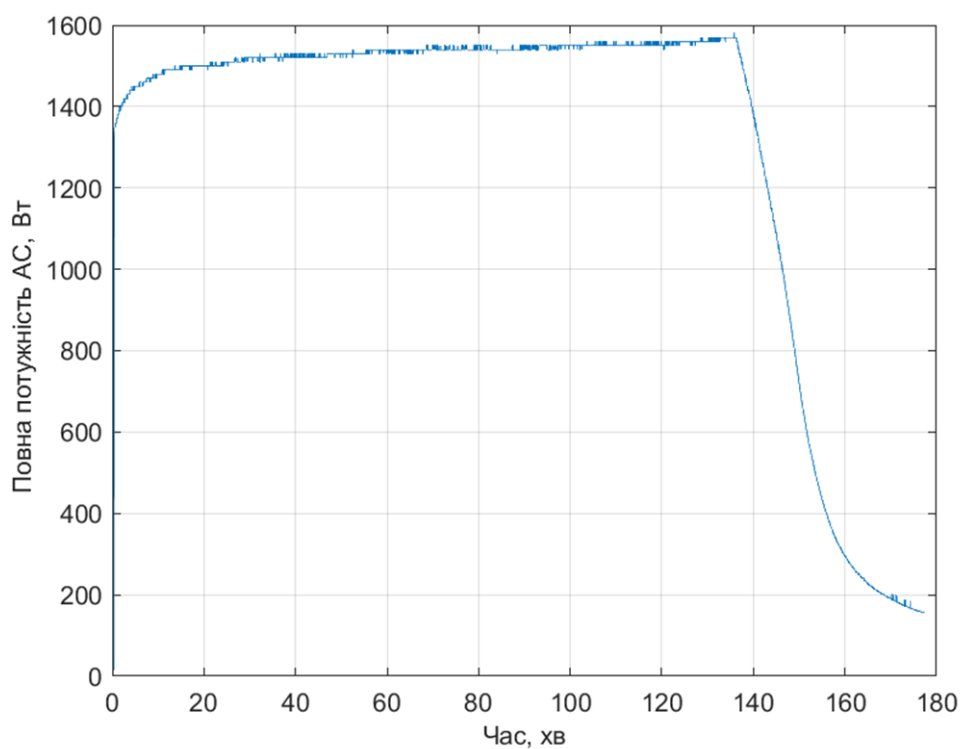


Рисунок 2.11 – Графік навантаження протягом зарядки на стороні змінного струму

Батарея заряджається методом постійного струму до рівня заряду 80%, потім процес продовжується з методом постійної напруги, рис. 2.9. Цикл зарядки

починається з великого струму, який зменшується, як показано на рис. 2.10. Зміна повної потужності заряджання на стороні змінного струму показана на рис. 2.11.

Зміна активної потужності заряджання під час повного циклу зарядки методом постійний струм/постійна напруга представлена на рис. 2.12.

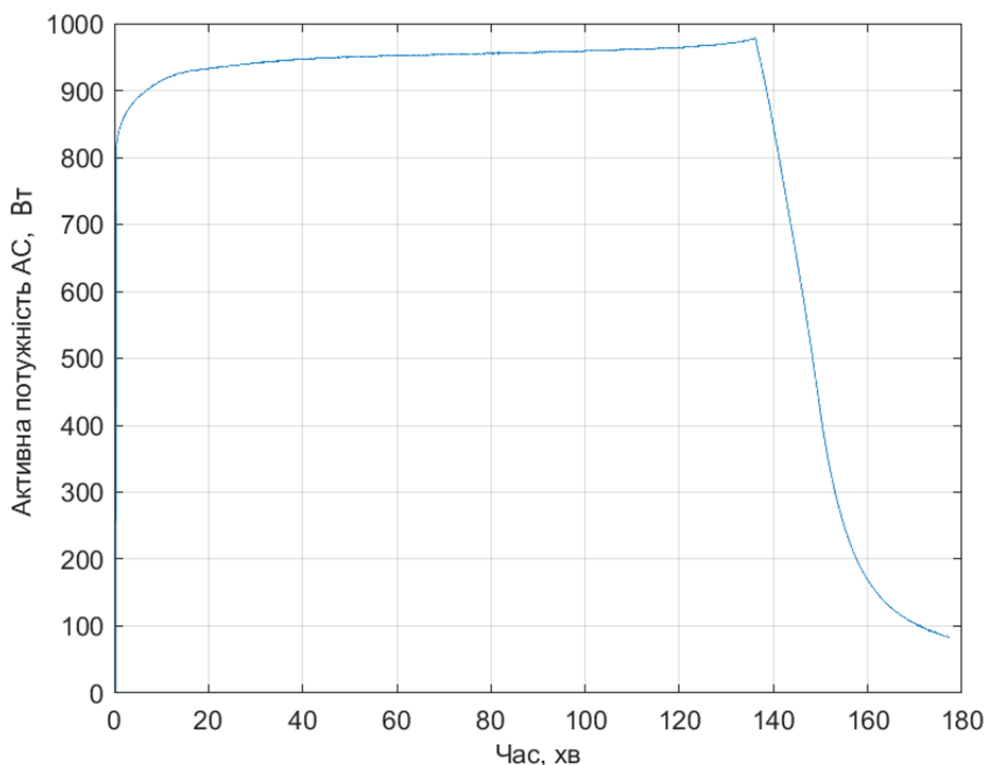


Рисунок 2.12 – Зміна активної потужності протягом зарядки на стороні змінного струму.

Наведені на рис. 2.13 та рис. 2.14 графіки описують повне спотворення гармонік напруги та струму, відповідно.

Що стосується коефіцієнта напруги THDu, то завдяки згаданим вище стандартам [61] виміряне значення, що менше 5%, є нормальним. Небезпека для обладнання відсутня. THDu від 5% до 8% вказує на значні гармонічні перешкоди - можливі деякі порушення в роботі пристроїв. Якщо THDu перевищує 8%, то наявне дуже велике гармонічне збурення, а у роботі обладнання можливі розлади.

Вимірюваний THDu досліджуваного зарядного пристрою електромобіля зберігає значення в діапазоні 2,5% і знижується в кінці циклу зарядки до 1,9%. Це означає, що THDu знаходиться в межах норми.

Загальне гармонійне спотворення в струмі характеризує спотворення кривої струму [61]. Що означають виміряні значення THDi: значення THDi менше 10% є нормальним. Не існує небезпеки. Значення THDi від 10 до 50% вказує на значне гармонійне збурення. Існує небезпека нагрівання, що вимагає перерахунку параметрів кабелів. Значення THDi вище 50% вказує на дуже великі гармонійні порушення.

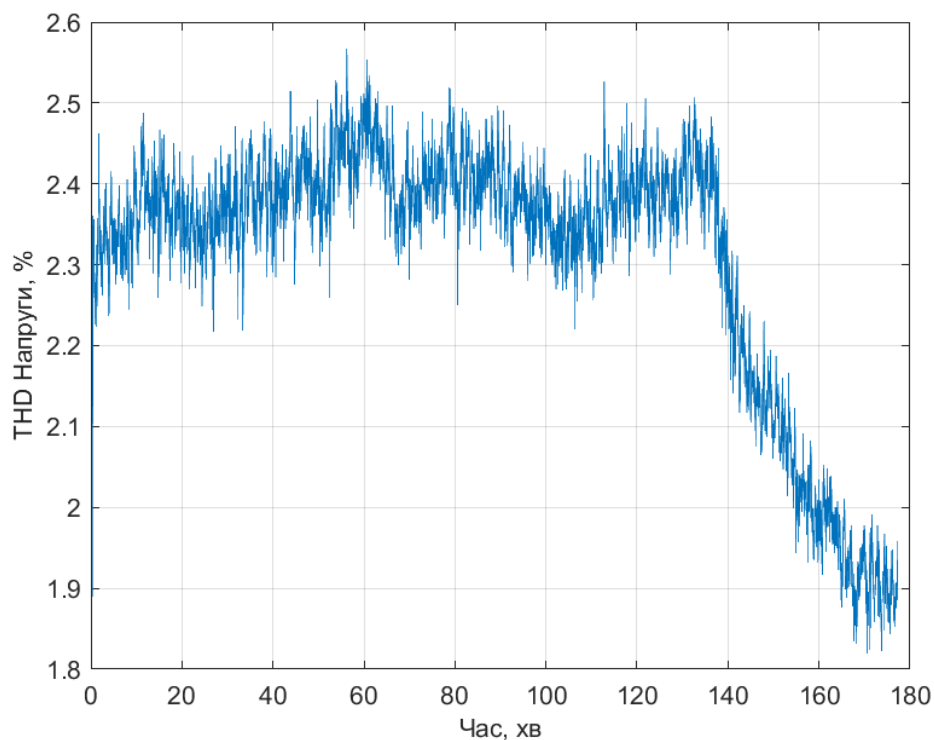


Рисунок 2.13 – Коефіцієнт гармонійних спотворень напруги THDu протягом зарядки

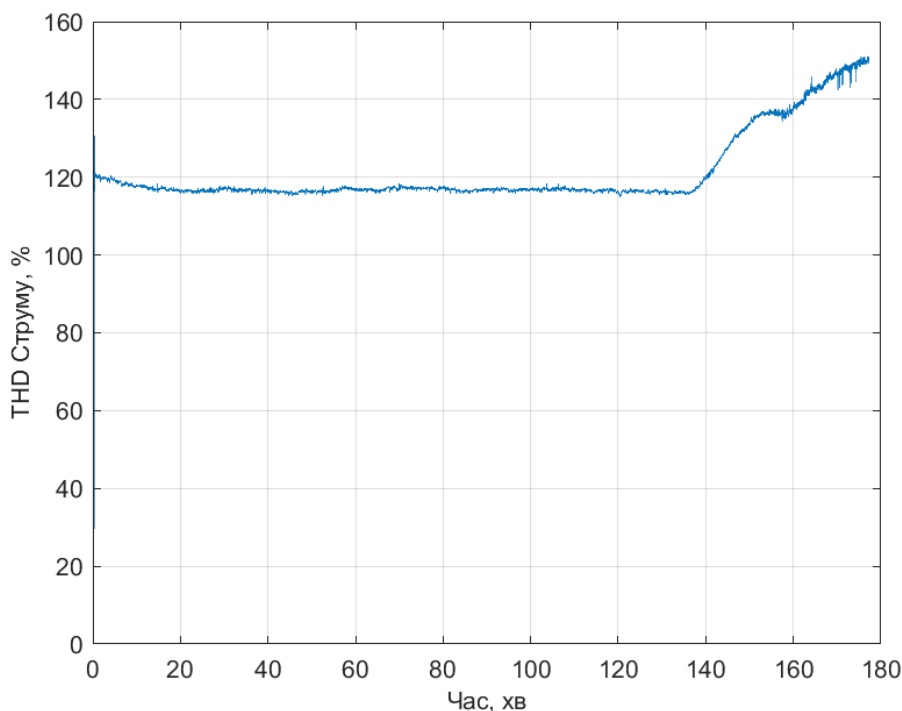


Рисунок 2.14 – Коефіцієнт гармонійних спотворень струму THDi протягом зарядки

Під час зарядки THDi залишається на рівні 120%, а після початку зарядки по методу постійної напруги збільшується до 150%.

На рис. 2.15 і на рис. 2.16 показано спектри напруги для основної фази та кінця циклу заряджання, відповідно. Ці графіки показують низький рівень дисбалансу напруги.

Наступні рис. 2.17 та рис. 2.18 відображають спектри струму батареї електромобіля для основної фази заряджання та кінця зарядки. Згідно рис. 2.14 сумарний коефіцієнт нелінійних спотворень THD може збільшуватися протягом циклу заряджання, але величина цього спотвореного струму фактично зменшується. Як видно, поточні вимірювання THD можуть бути дезінформативними: насправді загальне гармонійне спотворення зростає при меншому струмі. Ось чому вимірювання THD не настільки практичне у визначенні впливу зарядки на розподільну мережу та якість електроенергії.

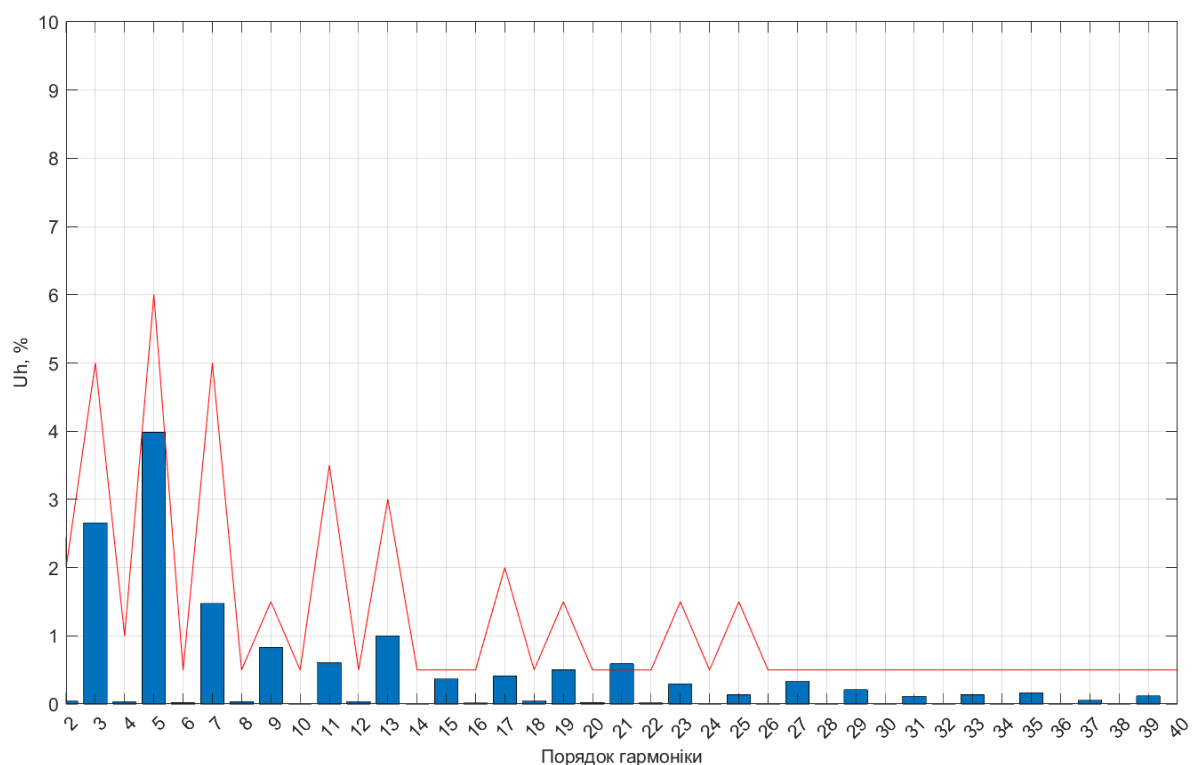


Рисунок 2.15 – Основна фаза заряджання. Спектр напруги для заряджання електромобіля на 20<sup>ту</sup> хвилину (синій) та стандарт EN50160 (лінія)

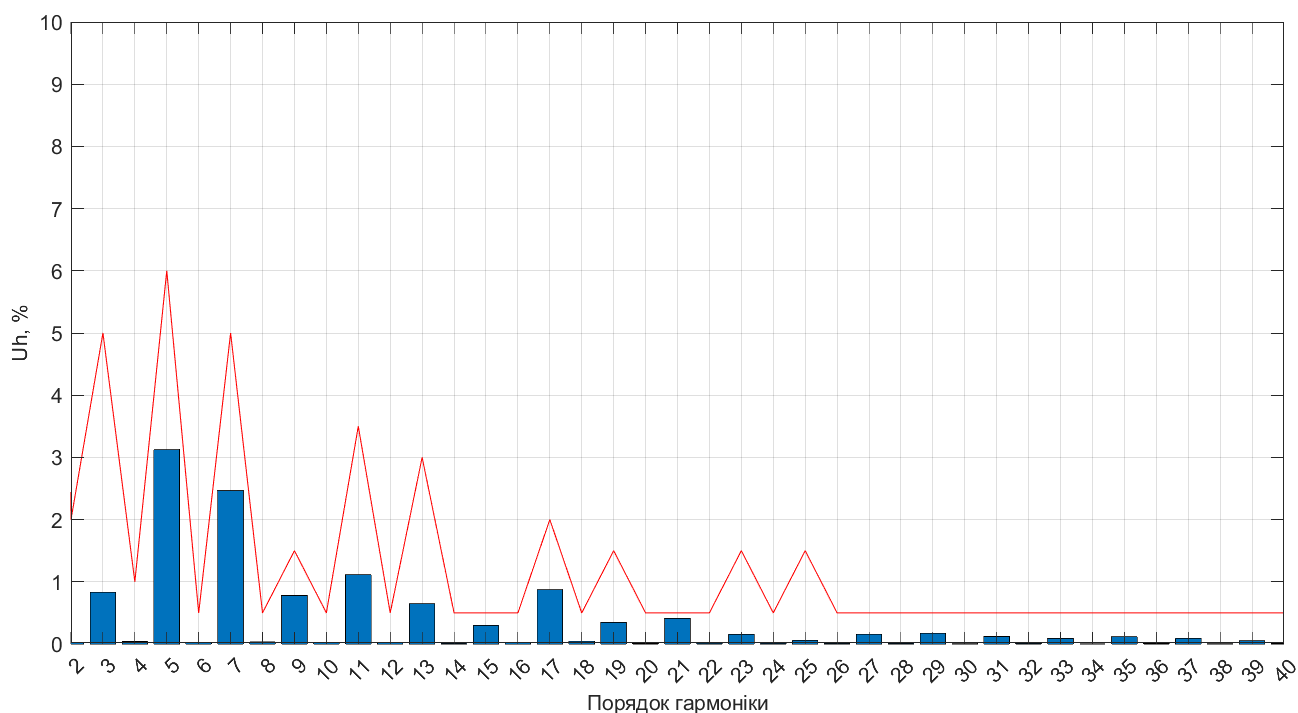


Рисунок 2.16 – Кінець циклу зарядки. Спектр напруги для заряджання електромобіля на 160<sup>ту</sup> хвилину (синій) та стандарт EN50160 (лінія)

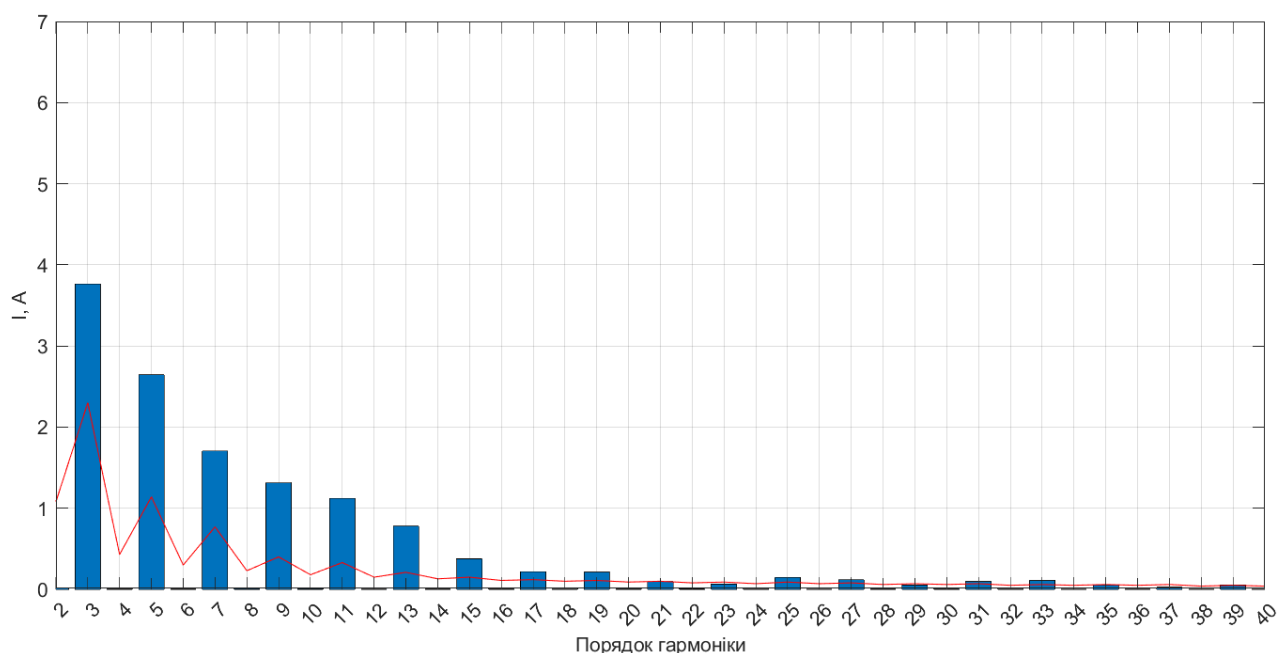


Рисунок 2.17 – Основна фаза заряджання. Спектр струму для заряджання електромобіля на 20<sup>ту</sup> хвилину (синій) та стандарт ІЕС 61000-3-2 (лінія)

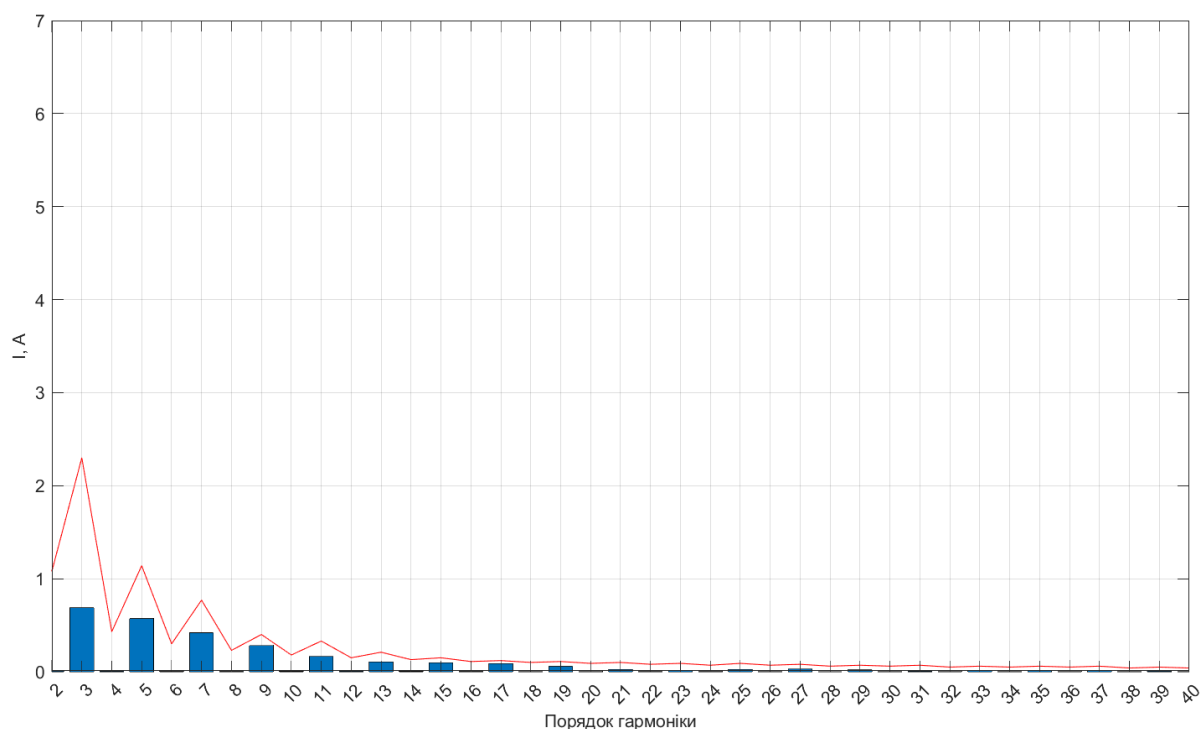


Рисунок 2.18 – Кінець циклу зарядки. Спектр струму для заряджання електромобіля на 160<sup>ту</sup> хвилину (синій) та стандарт ІЕС 61000-3-2 (лінія)

Для зменшення гармонік використовуються різні методи: застосування пасивних, активних та комбінованих фільтрів. Принцип роботи пасивного фільтру заключається в тому, що паралельно джерелу гармонік підключається індуктивно-

ємнісна схема, налаштована на кожну частоту гармоніки, що фільтруються. Активний фільтр генерує гармоніки в протифазі до існуючих таким чином, щоб компенсувати їх. Комбінований фільтр охоплює широкий діапазон потужностей та робочих характеристик - об'єднує два попередні рішення в один пристрій, що дає змогу суміщати їх переваги [61].

### **2.3 Відповідність умовам приєднання до електричної мережі**

Незалежно від типу використання зарядної станції для електромобілів (приватні, комерційні або корпоративні), вона повинна забезпечувати безпеку як для людини, що здійснює підключення електромобіля, так і для техніки. ЕЗС повинна бути оснащена автоматичним вимикачем, захистом від перенапруг, пристроєм захисного відключення, забезпечена необхідним рівнем пило-та вологозахисту. Важливим є захист від мінімальної напруги, від перенапруги мережі, так як ці захисти дозволять продовжити термін служби акумулятора електромобіля.

Виробниками зарядних станцій і електромобілів були систематизовані всі вимоги (в тому числі вищевказані) в спільно розробленому стандарті безпеки Z.E. Ready. У ньому вказані більше 400 позицій, яким повинні дотримуватися виробники і користувачі зарядних станцій.

Зарядні станції бажано індивідуально пристосовувати до особливостей місця монтажу:

- У середині громадських споруд (наприклад, підземний гараж торгового центру або аеропорту).
- Зовнішнє розміщення (наприклад, на бензозаправках, на парковці біля готелю).

Незалежно від місця установки і від того, який тип заправної станції, необхідно розробити проектну документацію. Проект повинен містити наступний мінімальний набір позицій:

- Схему планувальної організації земельної ділянки.
- Конструктивні креслення.

- Архітектурно-будівельні рішення.
- Обґрунтування розміщення заправної станції.
- Інженерно-технічні креслення електрифікації і автоматизації заправної станції.
- Розрахунок параметрів заземлюючих контурів і струмів короткого замикання.

## **Висновки до Розділу 2**

1. Доведено, що вимірювання частотної спотвореності (THD) при зарядці електромобілів можуть бути дезінформативними і не дуже практичними для визначення впливу на розподільну мережу та якість електроенергії.

2. Метод "перший прийшов - перший заряджається" може бути незручним в ситуаціях, коли електромобілі, що приєднуються пізніше, потребують термінової зарядки, і може призвести до нерівномірного розподілу енергії між електромобілями.

3. Метод непрямого контролю зарядки електромобілів, заснований на урахуванні тарифів на електроенергію, дозволяє власникам електромобілів оптимізувати свої витрати, не враховуючи зарядку інших електромобілів та обмеження мережі.

4. Системи керування, що базуються на вирішенні оптимізаційних задач і прогнозуванні прибуття електромобілів на зарядну станцію, можуть не враховувати інтереси власників електромобілів і керуватися лише обмеженнями енергосистеми та приєднання. Конфлікт може виникати між зручним часом для зарядки електромобіля та оптимальним для мережі.

5. Під час методу заряджання, що базується на вирішенні оптимізаційної задачі, існує ймовірність похибки прогнозування, яка може вплинути на ефективність зарядки електромобілів. Експериментальні характеристики процесу являються основою для функцій належності методу управління в реальному часі і формування профілю зарядки електромобіля для подальшого використання в моделі Matlab Simulink.



## РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА МЕТОДУ КЕРУВАННЯ ЗАРЯДНИМИ СТАНЦІЯМИ ПРИ УМОВІ ОБМЕЖЕННЯ СПОЖИВАННЯ В МІСЦІ ПІДКЛЮЧЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ЗАРЯДНИХ СТАНЦІЙ

### 3.1 Застосування запропонованого підходу на основі нечіткої логіки

З огляду на те, що кількість EV та їх вимоги на зарядку на ЕЗС стохастично змінюються і створюють характерні для ЕЗС ситуації, які не підлягають чіткому визначенню, в якості найбільш придатного математичного апарату для розробки системи управління можна прийняти правила та положення нечіткої логіки [62]. Структура запропонованої системи управління ЕЗС в реальному часу наведена на рис. 3.1. Система працює в реальному часі, базується на нечіткій експертній системі та враховує обмеження як мережі, так і інтереси власників транспортних засобів. Основою системи є визначення вагового індексу зарядки ( $ВІЗ$ ) для кожного EV. Визначення  $ВІЗ$  базується на рівні заряду батареї, потужності заряджання, необхідної енергії для заряджання та наявного на зарядку часу.

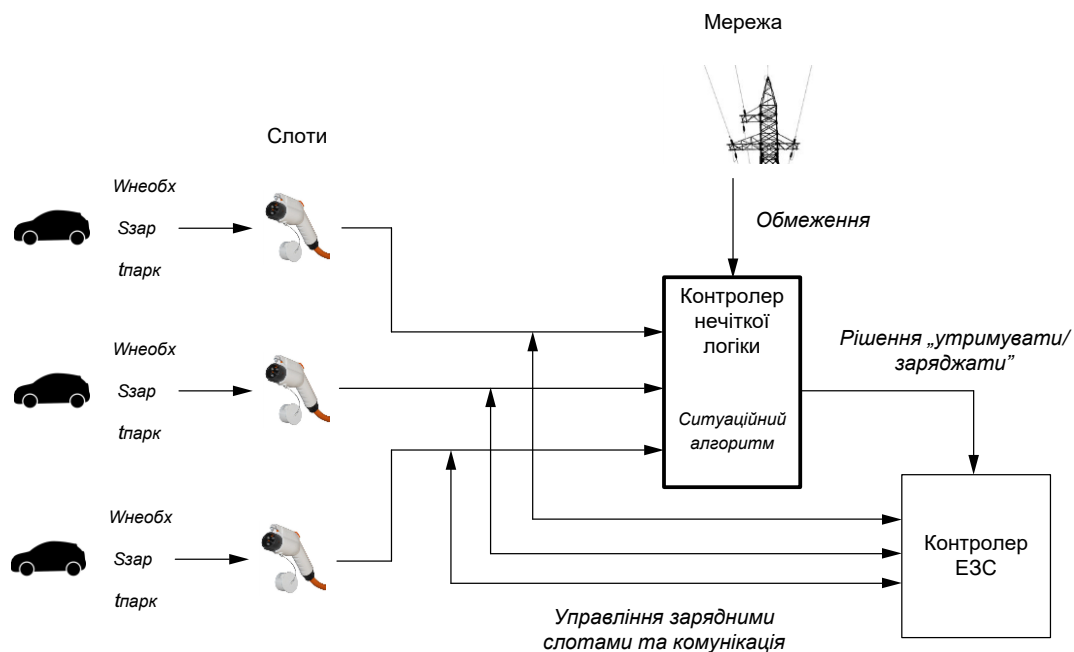


Рисунок 3.1 – Структура запропонованої системи управління ЕЗС в реальному часі

Метод розрахування *BIZ* базується на ідеї про використання нечіткої логіки в управлінні електромобілями [63]. У запропонованому в цій роботі методі, рішення контролера зарядної станції щодо заряджання чи утримання EV залежить від двох етапів обчислень. Система має більший рівень практичного застосування, більш рівномірний розподіл енергії та менші витрати енергії в години пік та при обмеженні перетоку потужності.

### 3.2 Побудова фазі-системи

На першому етапі всі підключені EV отримують ваговий індекс пріоритетності за допомогою фазі-системи. На другому кроці, мережеві та цінові обмеження, необхідний фінальний рівень заряду батареї беруться до уваги, і зарядна потужність доставляється до електромобілів з найвищими ваговими індексами зарядки.

Перший крок полягає в тому, що після підключення нового авто до зарядної станції, власник EV оголошує тривалість свого паркування  $t_{\text{парк}}$  та необхідний рівень заряду, який надсилається контролеру зарядної станції з зарядного слоту. За допомогою цієї та зчитаної інформації підраховується необхідна енергія для заряду батареї  $W_{\text{необх}}$  та потужність зарядки  $S_{\text{зар}}$ . Частка невизначеності, як в алгоритмах з плануванням [64], тут відсутня.

Фазі-система, представлена на рис. 3.2, отримує сигнали від зарядних слотів до першого з чотирьох блоків. Ці блоки - це "Фазифікація", "Блок рішень" з "Правилами" та "Дефазифікація".

Реалізація фазі-логіки наведена складається з [65]:

- Фазифікація - перетворення класичних числових даних у нечіткі фазі дані або функції належності (ФН).
- Блок рішень з правилами - об'єднує функції членства з правилами керування для отримання нечітких результатів.
- Дефазифікація - використовує різні методи, щоб обчислити кожен вихід з блоку рішень і помістити його в таблицю пошуку. Вибирає числовий вихід із таблиці пошуку на основі поточного вводу.

Наведена вище структура блоків нечіткої логіки показана на рис. 3.3.

Розрахований індекс далі використовується на другій оптимізаційній стадії алгоритму.

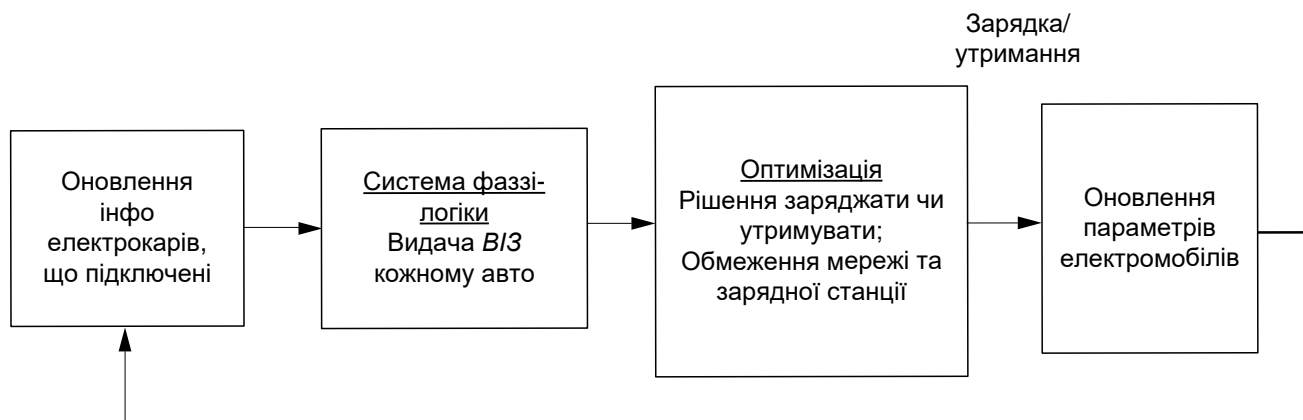


Рисунок 3.2 – Спрощена схема зарядки EV

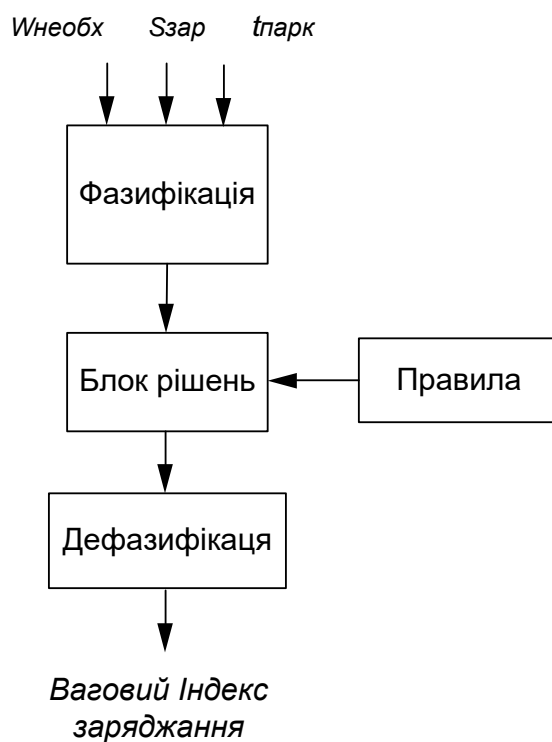


Рисунок 3.3 – Структура нечіткої логіки

### 3.3 Функції належності

Функції належності використовуються в фазі-логіці для опису вхідних та вихідних термів цього блоку, які залежать від форми та кількості нечітких значень.

Як правило, функція належності будується або на основі статистичної інформації, або за участі експерта (групи експертів). Методи побудови функцій належності діляться на прямі та непрямі. Прямі методи характеризуються тим, що експерт безпосередньо задає правила визначення функцій належності  $\mu_A(x)$ , що характеризує елемент  $x$ . Прямі методи використовуються для вимірюваних величин, таких як швидкість, час, відстань, тиск і т.д.

Нехай область, на якій буде будуватись функція належності буде позначатись  $X$ . Необхідно пам'ятати, що  $X$  – чітка множина.

Нечіткою множиною  $A$  в деякій області  $X$ , що позначається як  $A \subseteq X$ , називається множина пар:

$$A = \{(x, \mu_A(x)); x \in X\}, \quad (3.1)$$

де

$$\mu_A: X \rightarrow [0,1] \quad (3.2)$$

Це функція належності нечіткої множини  $A$ . Ця функція приписує кожному елементу  $x \in X$  степінь його належності до нечіткої множини  $A$ , при цьому можна виділити три випадки:

1.  $\mu_A(x) = 1$  означає повну приналежність елемента  $x$  до нечіткої множини  $A$ ,  $x \in A$ .
2.  $\mu_A(x) = 0$  означає відсутність належності елемента  $x$  до нечіткої множини  $A$ ,  $x \notin A$ .
3.  $0 < \mu_A(x) < 1$  означає часткову приналежність елемента  $x$  до нечіткої множини  $A$ .

В літературі приймається символічний опис нечітких множин. Якщо  $X = \{x_1, \dots, x_N\}$ , то нечітка множина  $A \subseteq X$  записується у вигляді:

$$A = \frac{\mu_A(x_1)}{x_1} + \frac{\mu_A(x_2)}{x_2} + \dots + \frac{\mu_A(x_n)}{x_n} = \sum_{i=1}^n \frac{\mu_A(x_i)}{x_i} \quad (3.3)$$

Як згадувалось вище – приведений запис має символічний характер, де знак « $\rightarrow$ » означає приписування конкретним елементам  $x_1, \dots, x_n$  степені належності  $\mu_A(x_1), \dots, \mu_A(x_n)$ , тобто:

$$\frac{\mu_A(x_i)}{x_i}, \quad i = 1, \dots, n \quad (3.4)$$

означає пару

$$(x_i, \mu_A(x_i)), \quad i = 1, \dots, n \quad (3.5)$$

Також знак «+» інтерпретується як множинна сума елементів:  $D = x_1 + x_2 + x_3 + x_4$  як  $D = \{x_1, x_2, x_3, x_4\}$ .

Функція належності трикутної форми визначається у вигляді:

$$t(x, a, b, c) = \begin{cases} 0, & \text{для } x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & \text{для } a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & \text{для } b \leq x \leq c \\ 0, & \text{для } x \geq c \end{cases} \quad (3.6)$$

де  $a, b, c$  – деякі числові параметри, що впорядковані відношенням  $a \leq b \leq c$  і приймають довільні дійсні значення. Функція належності породжує нормальну випуклу множину з носієм  $(a, c)$ , кордонами  $(a, c)$ , ядром  $\{b\}$ .

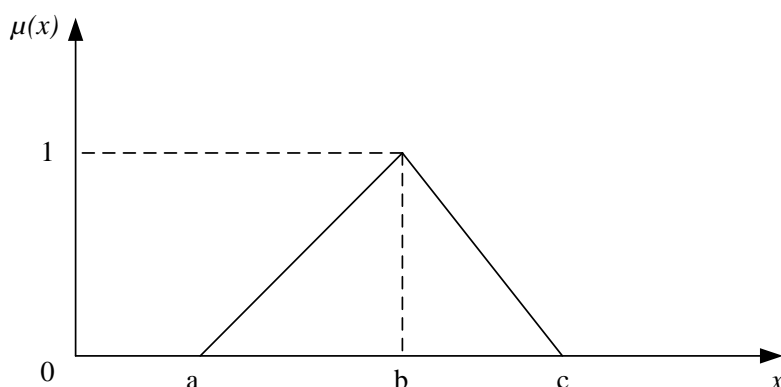


Рисунок 3.4 – Функція належності трикутної форми

Форма трикутника для функцій належності використовується для задання невизначеностей у вигляді відхилень від деякого числа. Наприклад для  $ВІЗ$ :

Дуже низький (VLP), від числа [0.05]

Низький (LP), [0.24]

Середній (MP), [0.45]

Високий (HP), [0.7]

Дуже високий (VHP) [0.95]

для цих чисел (ядро)  $\mu_{ВІЗ}(x) = 1$ , для кордонів  $0 < \mu_{ВІЗ}(x) < 1$

Центр і нахили вхідних функцій належності в кожній області скориговані так, щоб відповідне правило забезпечило відповідну дію управління.

Трапецевидна функція належності в загальному вигляді може бути задана аналітично наступним чином:

$$tr(x, a, b, c, d) = \begin{cases} 0, & \text{для } x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & \text{для } a \leq x \leq b \\ 1, & \text{для } b \leq x \leq c \\ \frac{c-x}{c-b}, & \text{для } c \leq x \leq d \\ 0, & \text{для } d \leq x \end{cases} \quad (3.7)$$

де  $a, b, c, d$  – деякі числові параметри, що впорядковані відношенням  $a \leq b \leq c \leq d$  й приймають довільні дійсні значення.

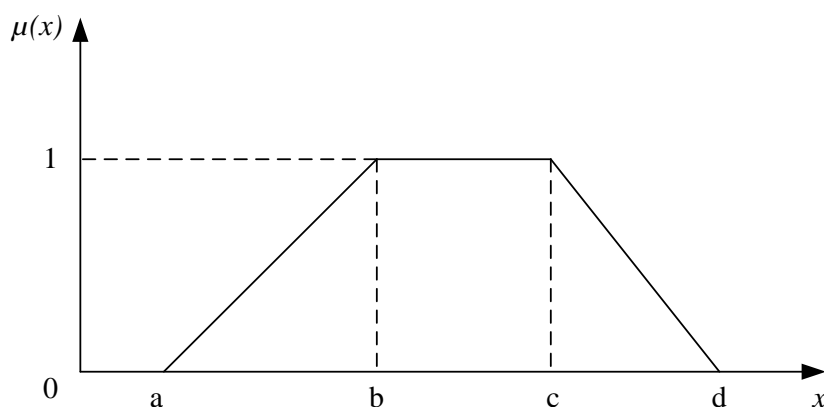


Рисунок 3.5 – Функція належності трапецевидної форми

Форма трапеції приймається для змінних, чий терм включають діапазон значень, що знаходяться на певному інтервалі.

Наприклад, для  $W_{необх} = [1, 22]$  терми та їх діапазони:

Дуже мала (VLow),  $[0, 3.5]$

Мала (Low),  $[5, 7.5]$

Середня (Medium),  $[10, 13]$

Велика (High),  $[16, 22]$

для цих інтервалів (ядро)  $\mu_{W_{необх}}(x) = 1$ , для кордонів  $0 < \mu_{W_{необх}}(x) < 1$

Для прикладу, розглянемо три неточні формулювання швидкості автомобіля:

1. Мала швидкість авто  $[0, 30]$

2. Середня [50] («близько 50»)
3. Велика [70,  $x_{max}$ ]

Прийmemo діапазон значень  $[0, x_{max}]$ , де  $x_{max}$  - це максимальна швидкість. На рисунку нижче зображені нечіткі множини  $A$ ,  $B$  та  $C$ , що відповідають попереднім формулюванням. Наприклад, щоб описати множину швидкостей, що рівні «близько 50» можна записати:

$$\mu_B(x) = \begin{cases} 1 - \sqrt{\frac{|x-50|}{20}} & \text{при } 30 \leq x \leq 70 \\ 0 & \text{в іншому випадку} \end{cases} \quad (3.8)$$

В фіксованій точці  $x = 33$  км/год функція належності «мала швидкість авто» приймає значення 0,67, тобто  $\mu_A(33) = 0,67$ . ФН «середня швидкість авто» приймає  $\mu_B(33) = 0,17$ , тоді як  $\mu_C(33) = 0$ .

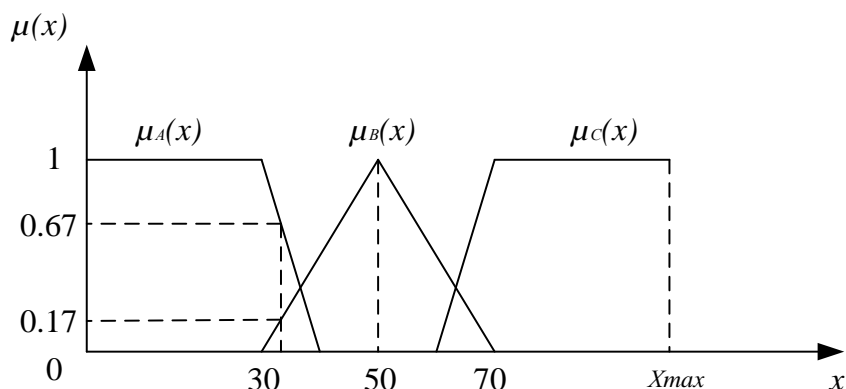


Рисунок 3.6 – Приклад побудови функції належності

Дані функції показані в рівнянні (3.9). Характеристики функцій належності, такі як вхідні та вихідні змінні, відповідні їм форми функцій та терми представлені у табл. 3.1 [63].

Вхідними змінними для фазі-системи є такі величини:

1. Ваговий індекс зарядки ( $BIZ$ ) знаходиться в діапазоні 0-1
2.  $W_{необх}$  необхідна кількість енергії для зарядки обмежується ємністю змодельованої батареї: від 0 до 22 кВт·год. Приведемо технічні характеристики Nissan Leaf 2010-2013, який використовується у моделюванні, для обґрунтування обраного діапазону. Nissan Leaf

комплектуються синхронним електродвигуном в передній частині кузова потужністю 80 кВт (110 к.с.) і 280 Н·м, має передній привід, живиться літій-іонним акумулятором, розрахованим на потужність до 90 кВт (120 к.с.) [66]. Батарея електромобіля ємністю 24 кВт·год (номінальна, фактична ємність акумулятора складає близько 21,4 кВт·год [67]) складається з 48 модулів, кожен з яких містить чотири батарейних елементи, що цілому складає 192 батареї. Очікується, що акумулятор зберігатиме 70-80% його ємності через 10 років, але його фактичний термін служби залежить від стилю їзди та факторів навколишнього середовища. Батарея розташована під підлогою салону.

3.  $S_{зар}$  потужність заряджання для 2 типу (type 2, роз'єм J1772) зарядних пристроїв Nissan Leaf поділяється на 3,5 кВт (Nissan Leaf S) і 6,6 кВт (Nissan Leaf SV та SL) (3,8 кВт та 7,2 кВт для мереж з напругою 240В) [68], та відхилення від цих потужностей в залежності від ступеню заряду батареї.
4.  $t_{парк}$  час парковки обмежений 10 годинами та поділений на 5 діапазонів. Для повної зарядки розглядаємого акумулятора Nissan Leaf зарядкою потужністю 3,5 кВт необхідно 8 год [66]. При зарядці при низьких температурах в зимній період час на заряд може збільшуватись, тому максимально доступний часом для зарядки електромобіля було обрано 9 год [57].

$$f: W_{необх}, S_{зар}, t_{парк} \rightarrow BIZ$$

$$\mu W_{необх}, \mu S_{зар}, \mu t_{парк}(EMi) \rightarrow \mu BIZ(EMi), \quad (3.9)$$

де  $W_{необх}, S_{зар}, t_{парк}$  - необхідна для зарядки енергія, потужність зарядки та час підключення до зарядного пристрою, тобто час парковки,  $\mu$  - функція належності.

$$W_{необх} = (SOC_{необх} - SOC_{початковий}) \cdot E_{бат}, \quad (3.10)$$

де  $SOC_{необх}, SOC_{початковий}$  - необхідний та початковий рівні зарядку батареї  $SOC$ ,  $E_{бат}$  - ємність батареї.



Графіки функцій належності з термами представлені на рис. 3.7, рис. 3.8, рис. 3.9 та для вихідного індексу  $BIZ$  на рис. 3.10.

Таблиця 3.1 – Характеристики функцій належності

	Змінна	Форма	Терми та їх діапазони/значення
<b>Вхід</b>	Необхідна к-сть енергії $W_{необх}$ кВт·год	Трапеція	Дуже мала [0, 3.5] Мала [5, 7.5] Середня [10, 13] Велика [16, 22]
	Потужність $S_{зар}$ кВт	Трапеція	Низька [2.9, 3.6] Висока [6.5, 7.2]
	Час парковки $t_{паркхв.}$	Трапеція	Дуже короткий [0, 75] Короткий [122, 180] Середній [240, 300] Довгий [360, 420] Дуже довгий [460, 540]
<b>Вихід</b>	Ваговий індекс заряджання $BIZ$	Трикутник	Дуже низький [0.05] Низький [0.25] Середній [0.45] Високий [0.7] Дуже високий [1]

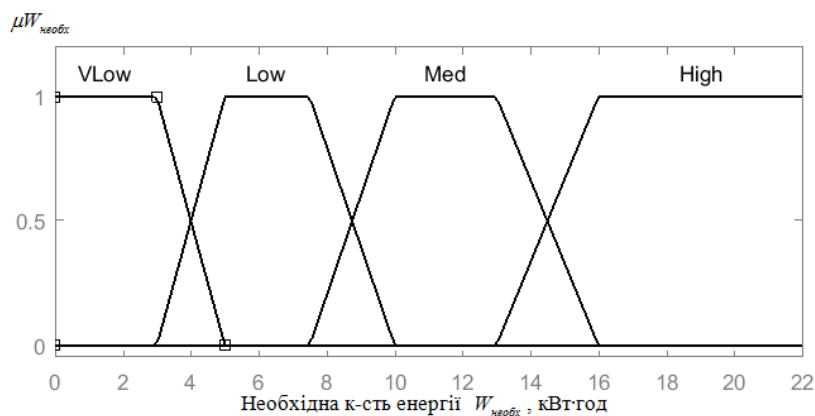


Рисунок 3.7 – Функція належності для необхідної енергії для зарядки  $W_{необх}$

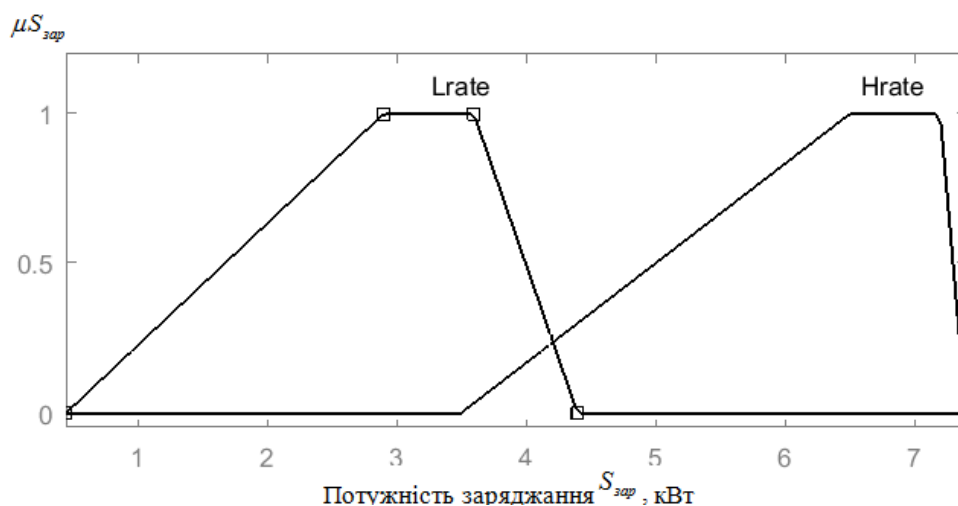


Рисунок 3.8 – Функція належності для потужності заряджання  $S_{зар}$

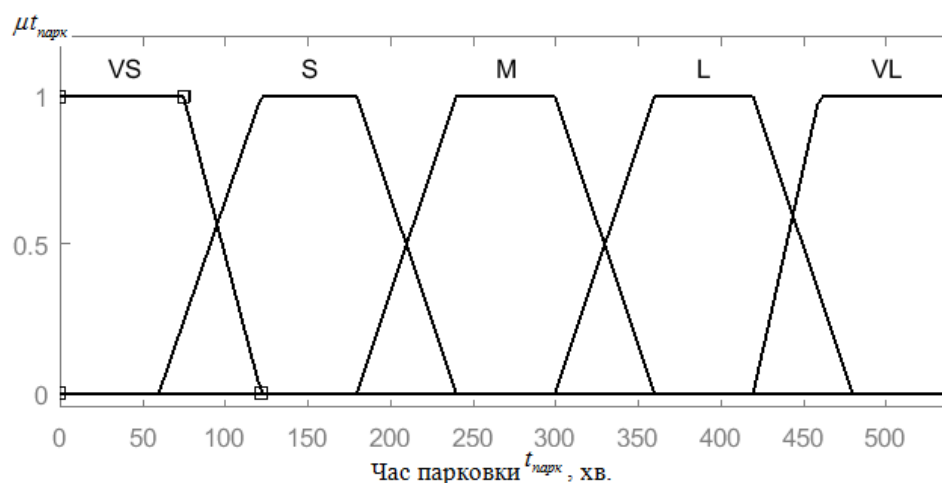


Рисунок 3.9 – Функція належності для часу парковки  $t_{парк}$

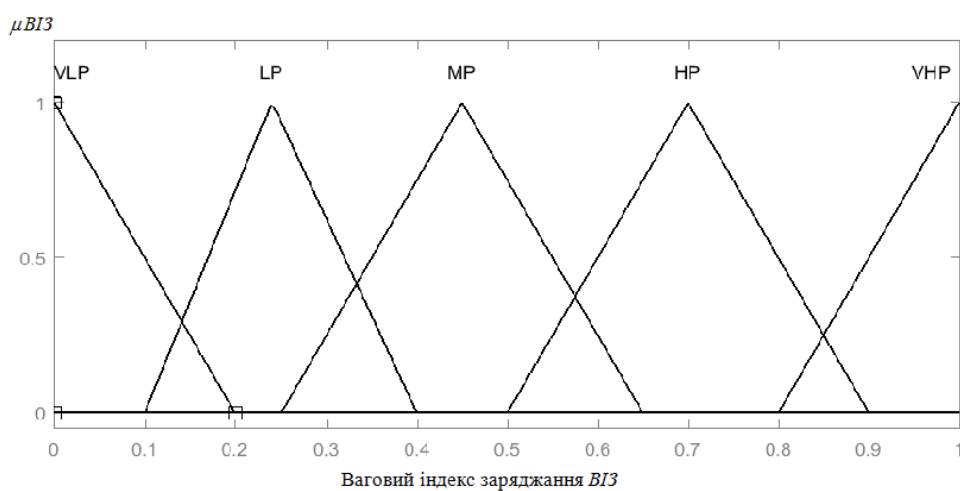


Рисунок 3.10 – Функція належності для вихідного  $ВІЗ$

Чим більша кількість термів, що визначають діапазони функції належності, тим більш гнучка та точна буде фазі-система. На мою експертну думку, така

кількість термів є достатньою. Забезпечується коректна видача пріоритету. Згідно досліджень [69], в діапазоні 2-7 нечітких множин виконується рівномірне розподілення по шкалі. Діапазони ФН розбивались на кількість проміжків в залежності від кількості дійсних чисел в множинах. Тобто, чим більший діапазон, тим більше термів, але в межах оптимальної кількості.

Відхилення бокових ліній від ядра ФН залежать від вибраних діапазонів і формуються перекриттям переходу від попереднього терму до наступного.

Також, в багатьох випадках найкращим методом побудови функцій належності є емпіричний з використанням потужностей Matlab.

3D-переглядач використовується для контролю змін ФН, щоб форма фігури мала спадаючий характер або рівні поверхні у координатах, де сусідні значення не дуже впливають на результат визначення вихідної змінної. Напрямок спуску обирався таким чином, щоб, при приближенні до нуля по осі необхідної для зарядки енергії площа спускалась, а для часу парковки навпаки йшла на підйом.

У переглядачі правил зручно перевіряти, чи логічно змінюється пріоритет в сторону зменшення або збільшення після корекції функцій та бази правил.

### 3.4 База правил фазі-контролю

Правила нечіткого керування базуються на експертному досвіді проектувальника та даних, отриманих після тестування. Зазвичай ці правила виражаються в логічній послідовності "if - then" для опису логічного зв'язку між вхідними та вихідними змінними [11].

Загалом це можна виразити так:

*"IF (сукупність умов), THEN (сукупність наслідків, з яких робиться висновок)".*

Фазі-система складається з 40 правил, які можна знайти в табл. 3.2 та табл. 3.3., де Д – дуже; ВП, СП, НП – високий, середній та низький пріоритет, відповідно. Кожне фазі-рішення має свій індекс в діапазоні вихідного терму (коефіцієнт). Повний перелік нечітких правил та пояснень представлені в Додаток А.

Блок прийняття рішень виводить вихід кожного правила і створює значення кожної функції належності. Використовується логічна операція AND – оператор імплікації (мінімум-оператор) (3.11) [70].

$$\mu_{BIZ}(EMi) = \mu_{W_{необх}} \cap \mu_{S_{зар}} \cap \mu_{t_{парк}}(EMi) = \min[\mu_{W_{необх}}, \mu_{S_{зар}}, \mu_{t_{парк}}]_{EMi}, \quad (3.11)$$

де  $\cap$ - оператор AND;  $\mu_{BIZ}, \mu_{W_{необх}}, \mu_{S_{зар}}, \mu_{t_{парк}}$ - функції належності, що відносяться до вагового індекса заряджання  $BIZ$ , необхідної енергії для зарядки, потужності заряджання та часу парковки електромобіля.

Таблиця 3.2 – Набір фазі-правил при низькій потужності заряджання  $S_{зар} = \text{Низька}$

$S_{зар} = \text{Низька}$		Тривалість парковки $t_{парк}$				
		Дуже коротка	Коротка	Середня	Довга	Дуже довга
<b>Необхідна для зарядки енергія <math>W_{необх}</math> кВт·год</b>	<b>Дуже мала</b>	СП <sub>0,9</sub>	СП <sub>0,7</sub>	НП <sub>0,4</sub>	ДНП <sub>0,5</sub>	ДНП <sub>0,3</sub>
	<b>Мала</b>	ВП <sub>0,6</sub>	СП <sub>0,9</sub>	СП <sub>0,5</sub>	НП <sub>0,6</sub>	ДНП <sub>0,5</sub>
	<b>Середня</b>	ДВП <sub>0,5</sub>	ВП <sub>0,8</sub>	ВП <sub>0,6</sub>	СП <sub>0,5</sub>	НП <sub>0,7</sub>
	<b>Висока</b>	ДВП <sub>1</sub>	ДВП <sub>0,8</sub>	ВП <sub>0,8</sub>	СП <sub>0,9</sub>	СП <sub>0,7</sub>

Таблиця 3.3 – Набір фазі-правил при високій потужності заряджання  $S_{зар} =$   
*Висока*

$S_{зар} = \text{Висока}$		Тривалість парковки $t_{парк}$				
		Дуже коротка	Коротка	Середня	Довга	Дуже довга
<b>Необхідна для зарядки енергія <math>W_{необх}</math> кВт·год</b>	<b>Дуже мала</b>	СП <sub>0,9</sub>	СП <sub>0,6</sub>	НП <sub>0,7</sub>	ДНП <sub>0,6</sub>	ДНП <sub>0,4</sub>
	<b>Мала</b>	ВП <sub>0,5</sub>	СП <sub>1</sub>	СП <sub>0,7</sub>	НП <sub>0,7</sub>	ДНП <sub>0,5</sub>
	<b>Середня</b>	ДВП <sub>0,4</sub>	ВП <sub>1</sub>	ВП <sub>0,7</sub>	СП <sub>0,6</sub>	НП <sub>0,5</sub>
	<b>Висока</b>	ДВП <sub>0,9</sub>	ДВП <sub>0,7</sub>	ВП <sub>0,9</sub>	СП <sub>1</sub>	СП <sub>0,6</sub>

Після діагностики та аналізу фазі-системи були отримані наступний вигляд тривимірного графіку функцій та правил, що на рис. 3.11, та графічного перегляду правил, зображеного на рис. 3.12.

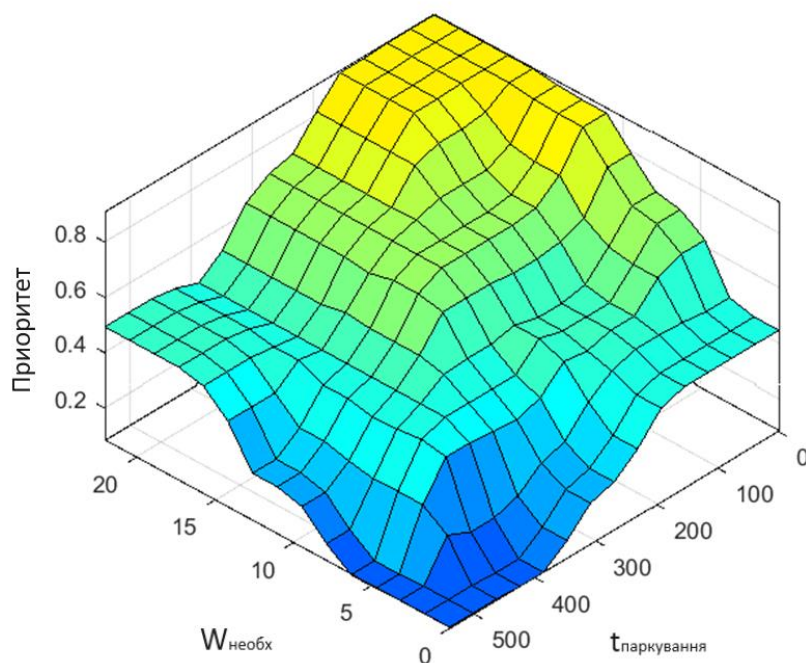


Рисунок 3.11 – Тривимірне відображення вхідних та вихідних функцій належності

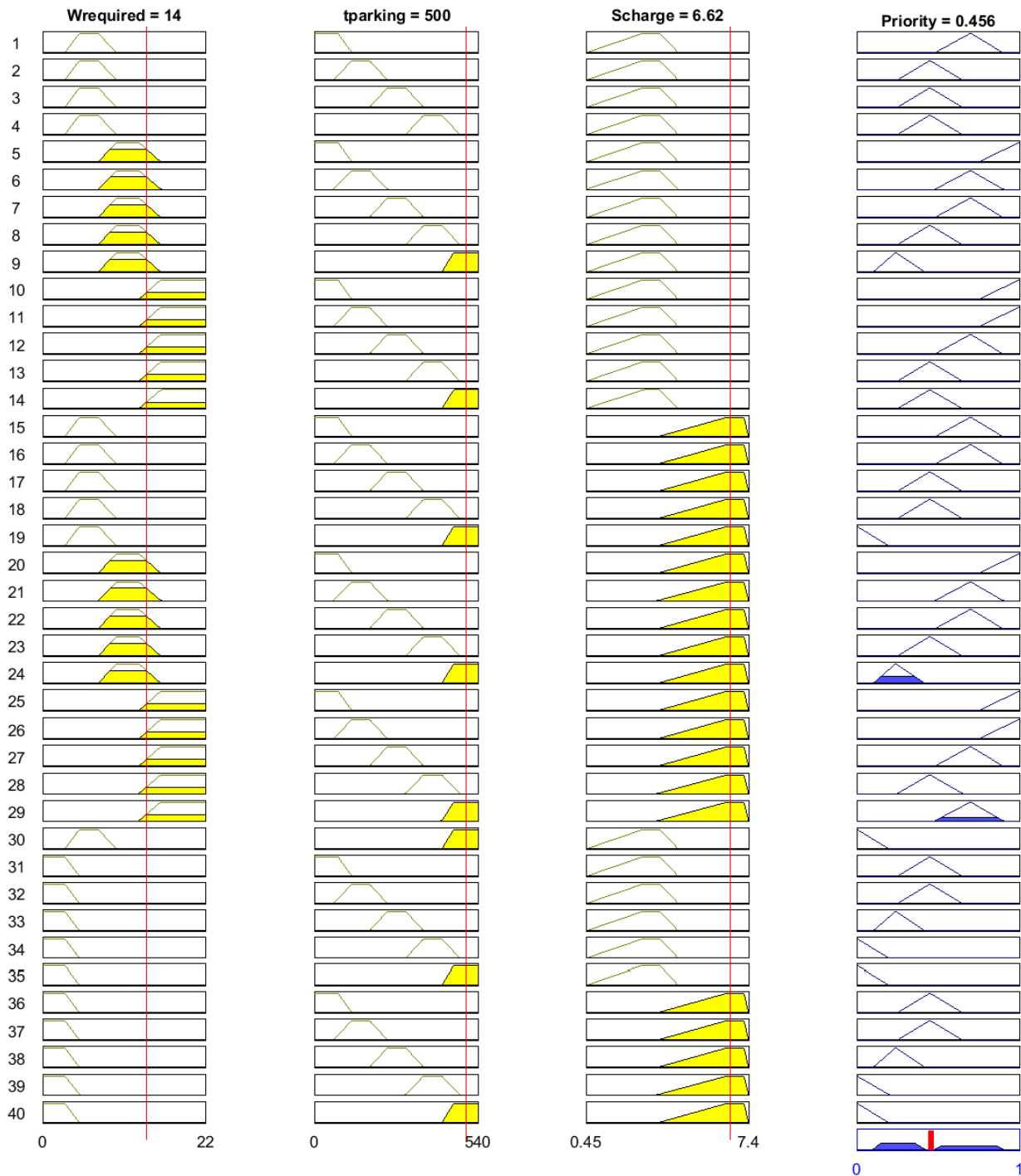


Рисунок 3.12 – Графічний вигляд спроектованих фазі-правил

### 3.5 Етап дефазифікації

Гравітаційний метод є найпопулярнішою методикою дефазифікації [65]. Це схоже на розрахунок центру тяжіння в фізиці і виражається як (3.12).

$$BIZ = \frac{\sum_{EM} EMi \mu(EMi)}{\sum_{EM} \mu(EMi)}, \quad (3.12)$$

де  $EM$  - всі підключені електромобілі,  $\mu(EM_i)$  - функції належності після блоку прийняття рішень

### 3.6 Оптимізація цільової функції

Це другий крок ситуаційного алгоритму зарядки. Після отримання  $BIZ$  для кожного електромобіля використовуючи фазі експертну систему, мета оптимізації цільової функції - обрати найбільшу кількість електромобілів з найвищими індексами пріоритетності  $BIZ$ . Вираз (3.13) є цільовою функцією з рішенням про дозвіл на заряджання автомобіля.

$$\max F(t) = \sum_{Slot(i)} BIZ_{(Slot(i),t)} \times P_{iш}(Slot(i),t), \quad (3.13)$$

де  $F(t)$ - оптимізована цільова функція,

$Slot(i)$  -  $i$ -тий слот зарядної станції,

$P_{iш}(CS(i),t)$  - рішення заряджати (1) чи ні (0) для кожного зарядного слота для періоду часу  $t$ .

Ця цільова функція підлягає таким обмеженням:

*Обмеження потужності.* Враховується попит на енергію у кожний період часу. Потужність навантаження електромобіля в даний момент часу вираховується як:

$$S_{EM(t)} = \sum_{Slot(i)} \frac{P_{зар}(Slot(i),t) \times P_{iш}(Slot(i),t)}{\eta_{(Slot(i))}}, \quad (3.14)$$

де  $P_{зар}(CS(i),t)$ - потужність заряджання електромобіля на зарядному слоті в момент часу  $t$ ;  $P_{iш}(CS(i),t)$ - попереднє рішення на зарядку чи утримання батареї;  $\eta_{(CS(i))}$  - ККД зарядного пристрою..

Потужність заряджання, в свою чергу виражається, як функція від рівня заряду, напруги та струму зарядки, що наведено в (2.4):

Обмеження потужності має вигляд:

$$S_{EM(t)} + S_{навант} \leq S_t^{max}, \quad (3.15)$$

де  $S_{EM(t)}$ - повна потужність навантаження електромобілів, що заряджаються в конкретний період часу;  $S_{\text{навант}}$ - потужність навантаження звичайних споживачів,  $S_t^{\text{max}}$  - максимальна потужність мережі.

*Обмеження струму та напруги на шині.* Ці обмеження представлені у вигляді даних виразів:

$$\begin{aligned} |I_{(t)}| &\leq I_{\text{MAX}(t)} \\ V(i, t)_{\text{maxmin}} &, \end{aligned} \quad (3.16)$$

де  $I_{(t)}$ - струм навантаження в даний період часу,  $I_{\text{MAX}(t)}$ - максимальний можливий струм;  $V_{\text{maxmin}}$ - мінімальна та максимальна величина напруги на шині, до якої підключена зарядна станція.

*Ціна на електроенергію.* Фактична ціна на електроенергію в Україні представлена на рис. 3.13 [71]. Згідно 3-зонний тарифу, диференційованого за періодами часу, власник зарядної станції може встановлювати обмеження на заряджання в період високого попиту та цін на електроенергію (наприклад, у період з 08:00 до 11:00 та 20:00 до 22:00) для зменшення витрат на електроенергію.

$$P_{\text{зар}} = k_c \cdot P_{\text{зарmax}} \quad (3.17)$$

де  $k_c$ - коефіцієнт зменшення максимальної потужності зарядки, що виставляється власником зарядної станції.

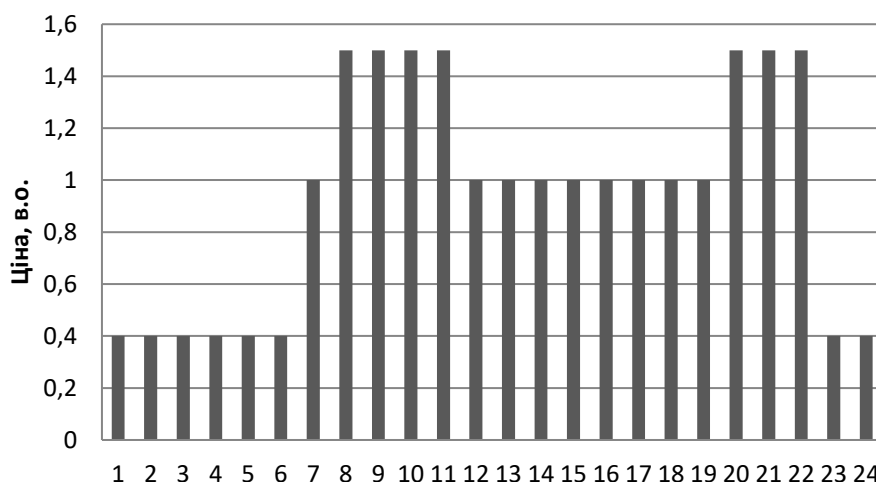


Рисунок 3.13 – Структура ціни на електроенергію в Україні станом на 2023 рік



Обмеження попереднього рішення. Змінна  $P_{iш}$  - це рішення (0/1), яке дозволяє утримувати або заряджати електромобіль. З огляду на умови, коли електромобіль досягає потрібного рівня заряду  $SOC$  або зарядний слот вільний, пропонуються наступні обмеження:

$$\begin{aligned} P_{iш}(Слот_{(i),t}) &= 0, \quad \text{якщо} \quad SOC_{(Слот_{(i),t})} \geq SOC_{необх(Слот_{(i),t})} \\ P_{iш}(Слот_{(i),t}) &= 0, \quad \text{якщо} \quad Статус_{(Слот_{(i),t})} = 0 \end{aligned}, \quad (3.18)$$

де  $SOC_{необх(Слот_{(i),t})}$  - необхідний рівень заряду  $SOC$ ,  $Статус_{(Слот_{(i),t})}$  - статус зарядного слоту – вільний (1) або зайнятий (0).

### 3.7 Алгоритм контролю зарядки в реальному часі

Блок-схема ситуаційного алгоритму зарядки наведено на рис. 3.14. Ця блок-схема підсумовує всі описані раніше операції та розрахунки.

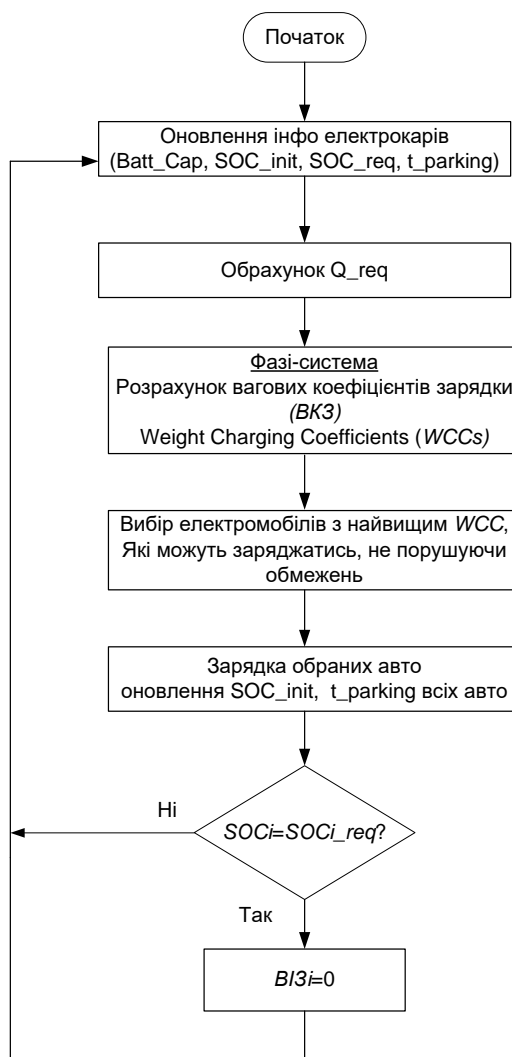


Рисунок 3.14 – Повний огляд ситуаційного алгоритму зарядки

Показаний на рис. 3.14 алгоритм може працювати в реальному часі без використання складних мікропроцесорних пристроїв. Період обчислення також може бути змінений в сторону збільшення або зменшення, якщо необхідна інша частота обчислень. На першому кроці всі інформаційні дані про електромобілі оновлюються і необхідна енергія для заряджання до необхідного рівня розраховуються. Отримавши ваговий індекс зарядки в фазі-системі, обчислюється актуальний рівень заряду *SOC*, споживана кожною машиною потужність та загальний попит на електроенергію в кінці 10-хвилинного періоду.

Крок оптимізації - обирається максимальна кількість електромобілів з найвищими *BIZ*, що не порушують усі обмеження енергопостачальної компанії та власника зарядної станції. Кожний електромобіль з дозволом на зарядку наповнить акумулятори енергією з повною швидкістю зарядки. Коли батарея досягає необхідного рівня заряду *SOC*, ваговий індекс *BIZ* цього автомобіля дорівнює нулю.

### **Висновки до Розділу 3**

1. Для управління зарядкою електромобілів найбільш прийнятним математичним інструментом є положення та методи нечіткої логіки.

2. Визначені входні змінні для пріоритету зарядки електромобілів, включаючи ваговий індекс заряджання, необхідну кількість енергії, потужність зарядки та тривалість паркування.

3. Метод управління зарядкою електромобілів поділяється на два етапи: визначення пріоритету зарядки на основі фазі-системи та оптимізація зарядки, враховуючи мережеві обмеження і потребу у встановленому рівні заряду.

4. Запропонований метод дозволяє оптимально розподіляти зарядну потужність між електромобілями, забезпечуючи індивідуальні потреби та обмеження кожного автомобіля.

6. Запропонований метод, на відміну від систем, що базуються на оптимізаційних задачах, враховує інтереси власників електромобілів та має просту реалізацію.

## РОЗДІЛ 4. МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ КЕРОВАНОЇ ЗАРЯДКИ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ЗАПРОПОНОВАНОГО АЛГОРИТМУ ТА ЙОГО РЕАЛІЗАЦІЯ

### 4.1 Побудова моделі розподільчої мережі з приєднанням електричної зарядної станції

Для моделювання запропонованого алгоритму використовується програмне забезпечення Matlab Simulink. Схема розподільчої мережі з звичайним та електромобільним навантаженнями представлена на рис. 4.1. Змодельована система для дослідження ефекту заряджання електромобіля протягом 24 годин показана на рис. 4.2. Вперше опис моделювання процесу запропонованої керованої зарядки електромобілів в умовах обмеженого електропостачання було описано у роботі [6].

Детальний опис компонентів наведена в наступних параграфах. У загальному модель складається з джерела живлення потужністю 10 МВт.

Трансформатор приєднання підприємства 10, 6 кВ / 0,4 кВ, номінальною потужністю 120 кВА. Трансформатор оливний ТМГ силовий трифазний двообмотковий. Призначений для потреб народного господарства для внутрішнього та зовнішнього встановлення.

ЕЗС потужністю 24 кВт та іншим навантаженням приєднання з максимально можливим споживанням 150 кВт.

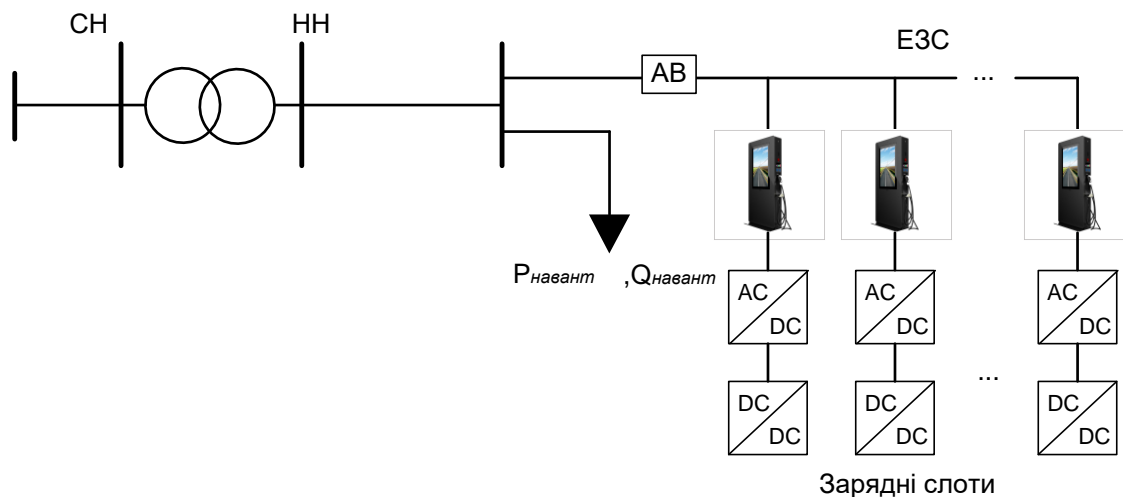


Рисунок 4.1 – Схема приєднання ЕЗС до мережі

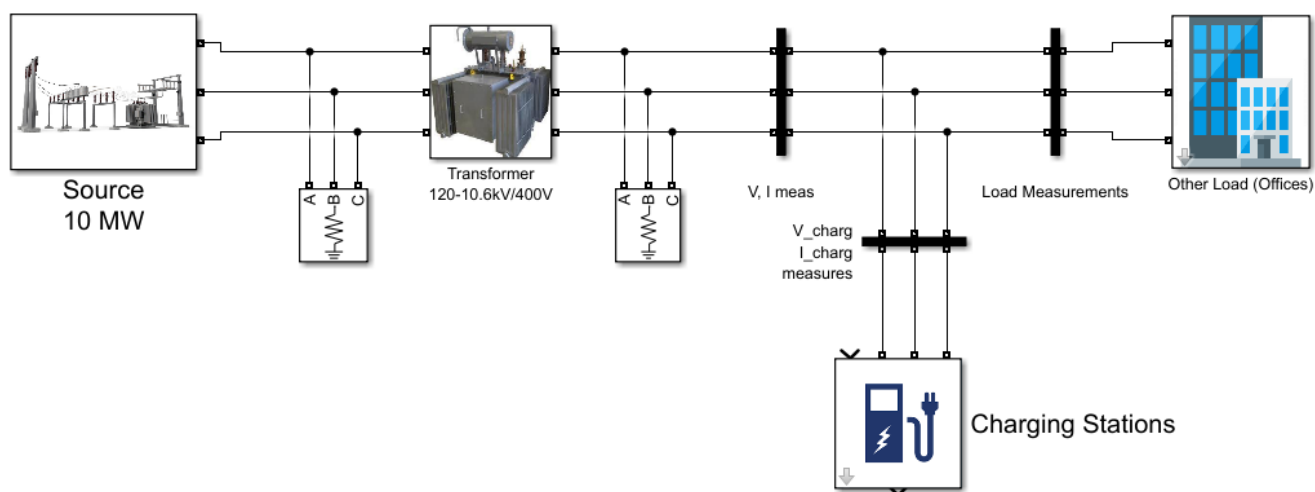


Рисунок 4.2 – Загальний вид всієї моделі в Matlab Simulink

Напругу та струм джерела, навантаження та зарядної станції активну, реактивну та повну потужності можна розраховувати на всіх шинах у запропонованій моделі.

#### 4.1.1 Джерело живлення

Джерело живлення моделюється 3-фазною синхронною машиною потужністю 10 МВт, представленою на рис. 4.3 [72].

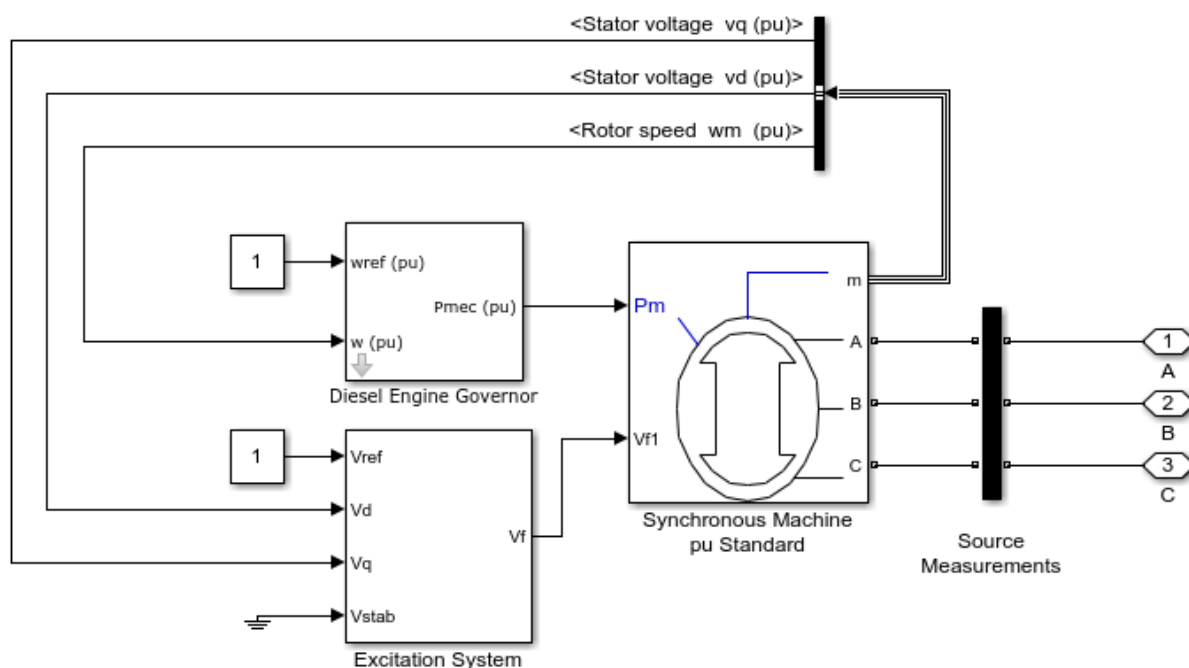


Рисунок 4.3 – Модель 3-фазної синхронної машини

Для того, щоб запустити симуляцію в стаціонарному режимі з підключеними приєднаннями і системою збудження, ці два блоки ініціалізуються відповідно до значень, обчислених інструментом ініціалізації машини. Ця ініціалізація виконується автоматично, якщо підключення відбувається на входи  $P_m$  і  $V_f$  машини або постійні блоки (або блоки регулювання з бібліотеки машини).

#### 4.1.2 Навантаження

Житловий споживач (підприємство та його офіси) має активну та реактивну енергію, що може бути змінена шляхом вибору коефіцієнта потужності PF, який у цьому випадку залежить від частки реактивного навантаження. Модель навантаження представлено на рис. 4.4. Розрахунок лінійних параметрів показано на рис. 4.6.

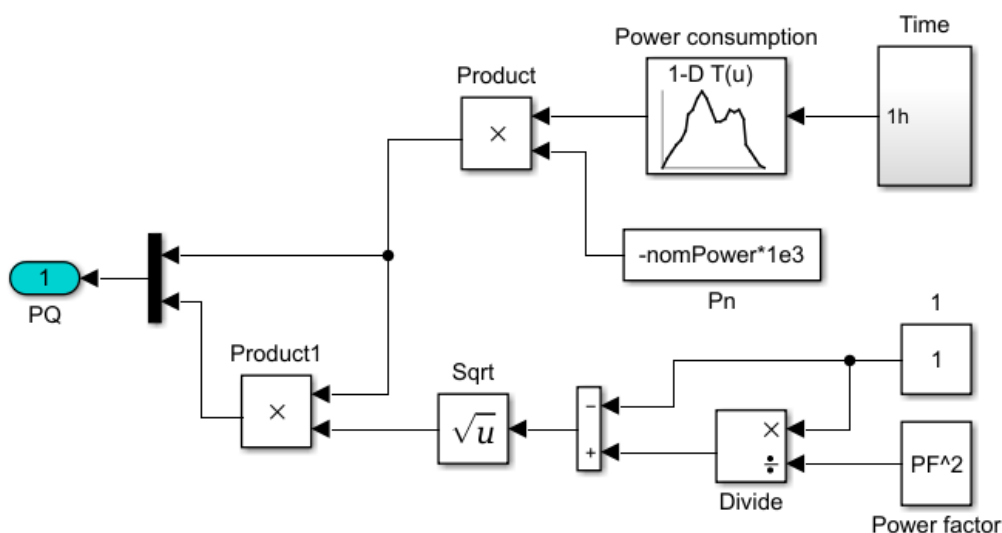


Рисунок 4.4 – Підсистема навантаження

Графік навантаження складається з усереднених даних навантаження пристроїв та обладнання офісних будівель для періоду  $T_n = 1$  година,  $n = 24$  [73]. Ці дані також можуть бути змінені. Графік максимального навантаження офісів протягом дня показано на рис. 4.5.

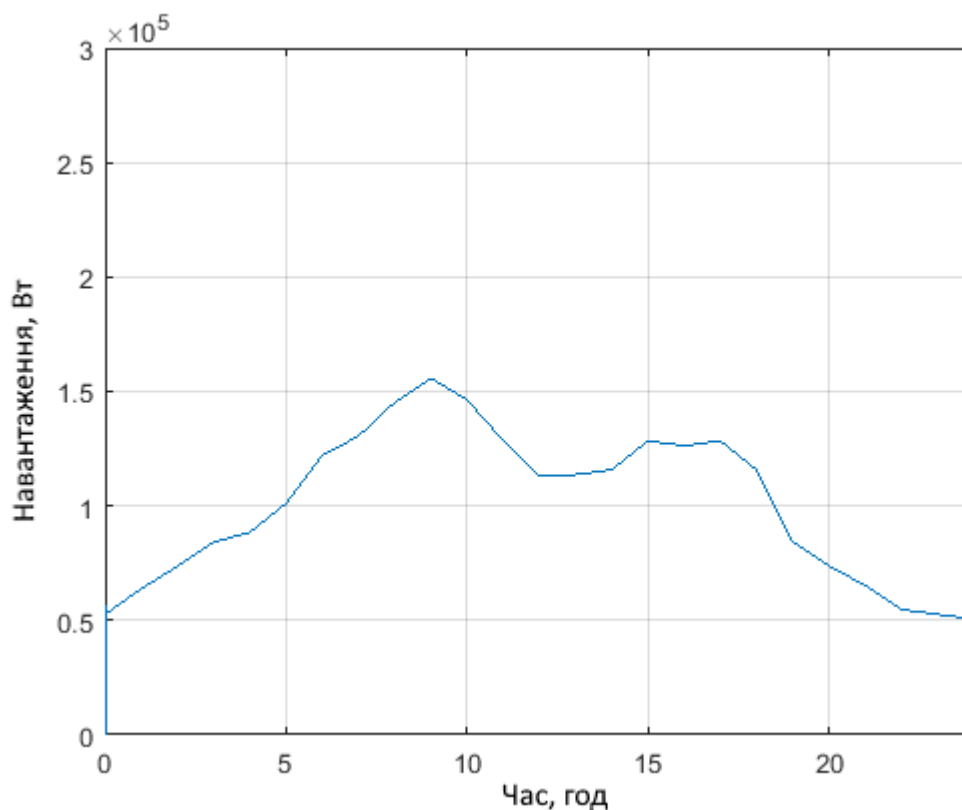


Рисунок 4.5 – Графік навантаження побутових споживачів протягом дня

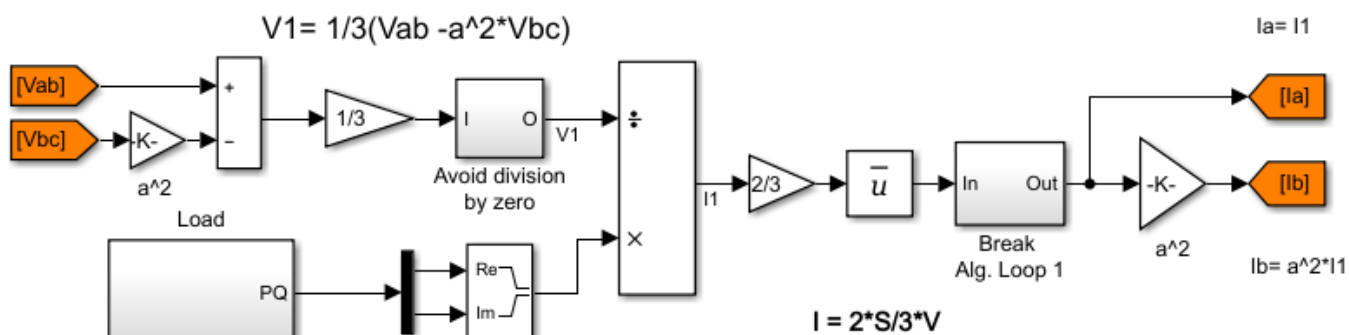


Рисунок 4.6 – Розрахунок напруг та струму навантаження

#### 4.1.3 Зарядна станція

Під час підключення електромобіля до зарядного слоту, власник електромобіля заповнює необхідну інформацію про бажаний рівень заряду SOC та тривалість паркування через графічний інтерфейс користувача (GUI) на панелі зарядного пристрою, що на рис. 4.7.

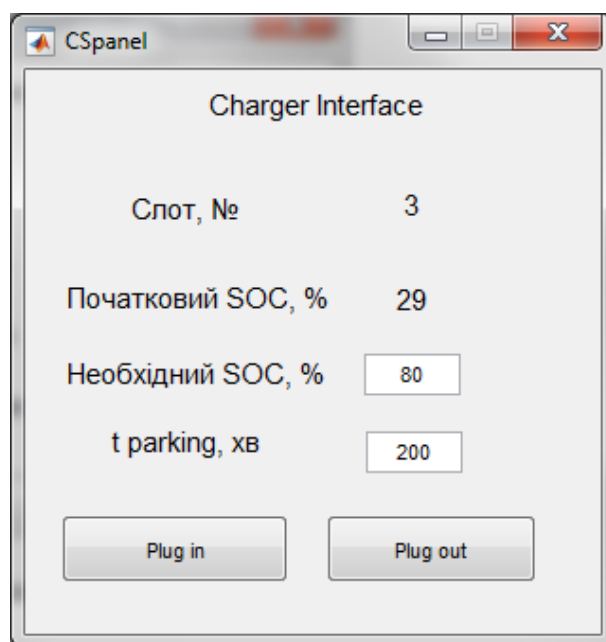


Рисунок 4.7 – Інтерфейс користувача зарядної станції

Модель обчислення напруги та струму зарядної станції з урахуванням характеру профілю зарядки та загальної потужності електричних транспортних засобів показує рис. 4.8.

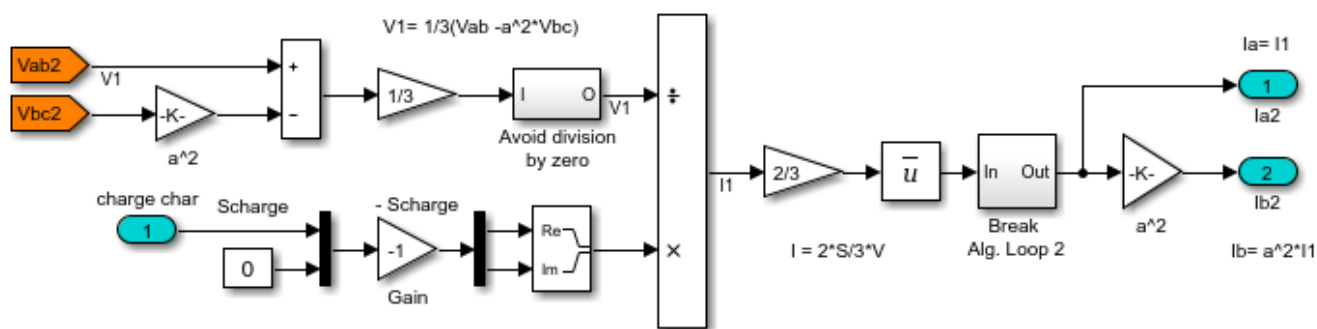


Рисунок 4.8 – Обчислення напруги та струму зарядної станції

Рис. 4.10 показує як отримується потужність електроживлення зарядки. Точка підключення зарядної станції до розподільної мережі представлена на рис.4.9. Зарядна станція складається з 6 зарядних слотів. Загальна потужність зарядної станції становить 24 кВт.

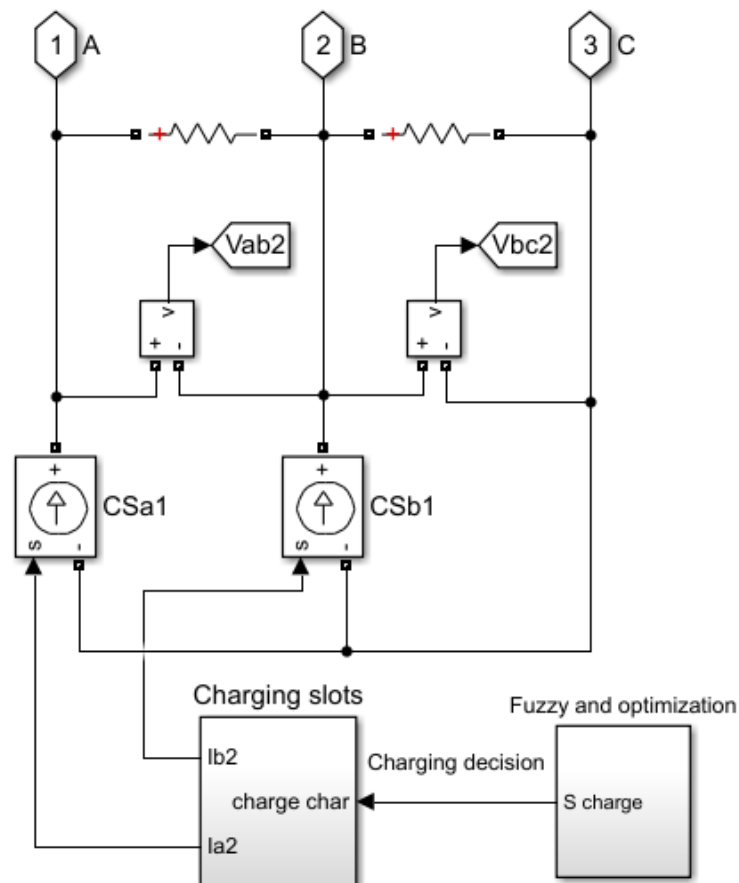


Рисунок 4.9 – Точка приєднання зарядної станції до мережі

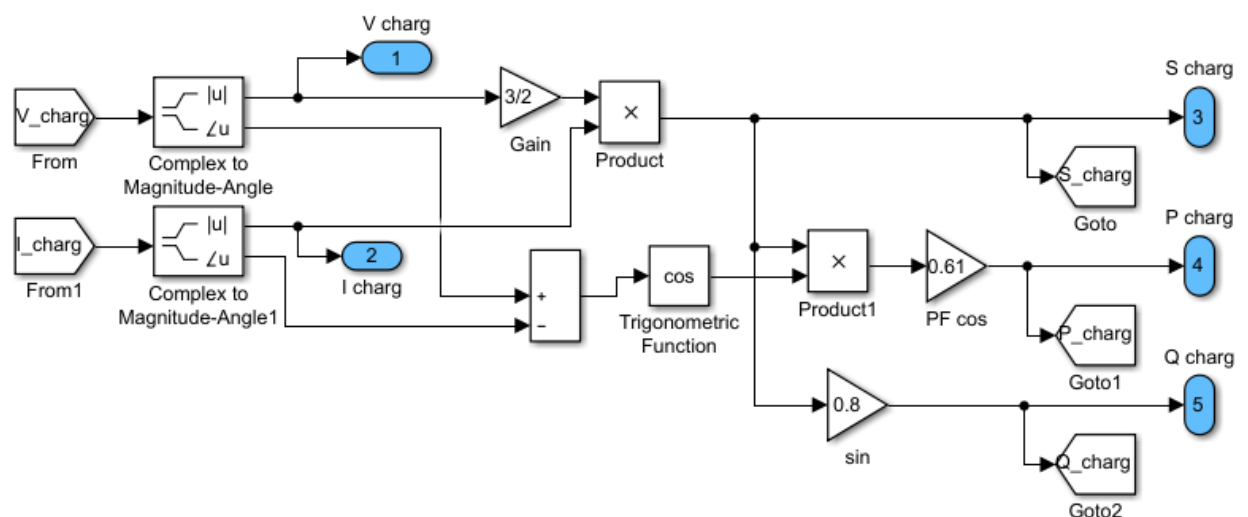


Рисунок 4.10 – Розрахунок загальної, активної та реактивної потужності зарядки

У Додатку Б приведено скріпти, створені в Matlab для управління та контролю над процесами заряджання на ЕЗС, такі як:



- фрагмент моделювання підключення електромобілів до вільного зарядного слоту;
- скрипт розрахунку параметрів зарядки до моменту прийняття рішення про зарядку/утримання електромобіля;
- крок реалізації нечіткої експертної системи – виклик фазі-логіки скриптом;
- скрипт прийняття вибору максимальних *ВІЗ* відповідного електромобіля та прийняття рішень про заряджання/утримання;
- скрипт розрахунку параметрів зарядки після моменту прийняття рішення та оптимізації.

#### 4.2 Застосування запропонованого методу керування

Запропонований алгоритм використовується у 24-годинному моделюванні роботи публічної зарядки, що підключена до мережі підприємства. Табл. 4.1 наводить перелік всіх електромобілів, що підключаються до ЕЗС за період моделювання.

Таблиця 4.1 – Електромобілі, що підключаються до ЕЗС протягом 24 годин

№ EV	Початковий рівень заряду, %	Необхідний рівень заряду, %	Час парковки, хв	Потужність бортового зарядного пристрою, кВт
1	2	3	4	5
1	21	80	340	3,5
2	45	70	150	3,5
3	10	98	320	7,2
4	25	80	190	7,2
5	40	60	80	7,2
6	60	95	150	7,2
7	34	60	190	7,2
8	50	75	99	7,2
9	44	80	320	7,2
10	78	93	60	7,2
11	55	80	225	7,2

12	38	80	300	7,2
1	2	3	4	5
13	79	95	100	7,2
14	31	70	350	7,2
15	50	70	70	7,2
16	25	80	245	7,2
17	29	70	290	3,5
18	34	85	153	3,5
19	71	95	150	7,2
20	60	95	105	7,2
21	41	70	320	7,2
22	58	90	130	7,2
23	81	95	90	3,5
24	66	95	120	7,2
25	51	80	180	7,2
26	40	80	310	3,5
27	35	90	290	7,2
28	23	85	300	3,5
29	20	90	400	7,2
30	31	80	350	3,5
31	21	80	340	3,5
32	45	70	150	3,5
33	10	98	320	7,2
34	25	80	190	7,2

### 4.3 Результати моделювання

У цьому розділі запропонований алгоритм порівнюється зі звичайним керованим алгоритмом зарядки з обмеженнями мережі і неконтрольованою зарядкою. Неконтрольована зарядка обмежена лише потужністю зарядної станції (24 кВт). Трансформатор та обладнання мережі, а та виділена потужність для споживача обмежені 120 кВт.

Попит на електроенергію протягом 24-годинного сценарію зарядки для різних стратегій зарядок відображає рис. 4.11, рис. 4.12 і рис. 4.13.

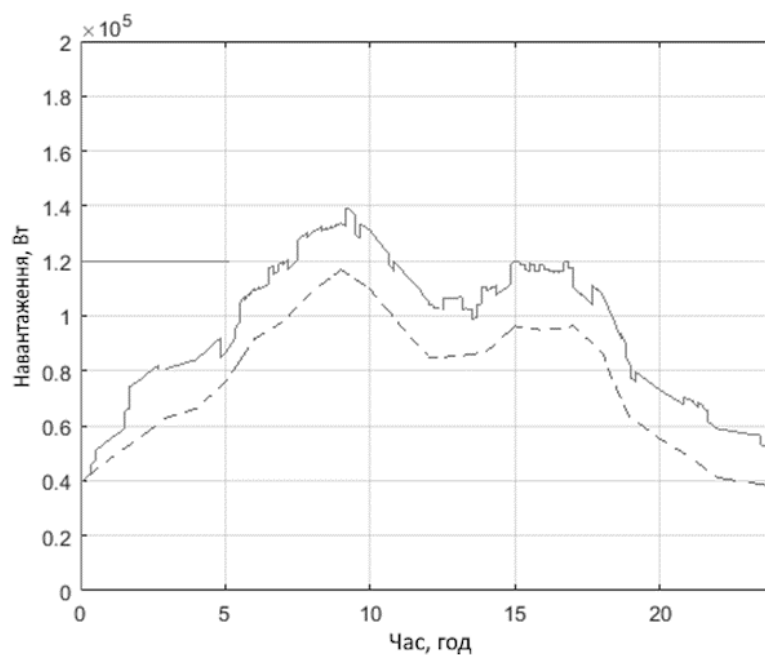


Рисунок 4.11 – Попит на електроенергію протягом 24 годин на основі неконтрольованої зарядки. (Суцільна лінія - загальний попит з електромобілями, штрих-пунктирна - житлове навантаження)

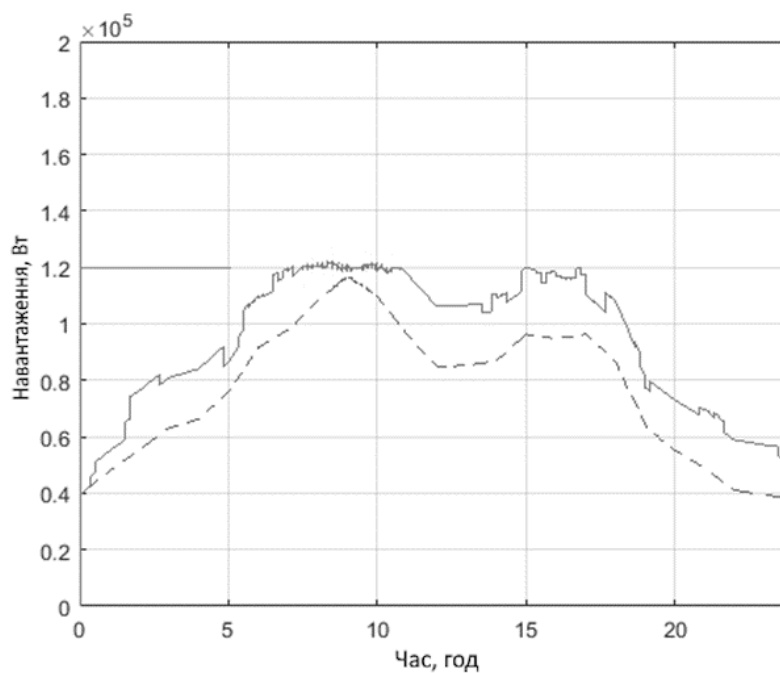


Рисунок 4.12 – Попит на електроенергію протягом 24 годин на основі типового методу керування з обмеженнями. (Суцільна - загальний попит з електромобілями, штрих-пунктирна - житлове навантаження)

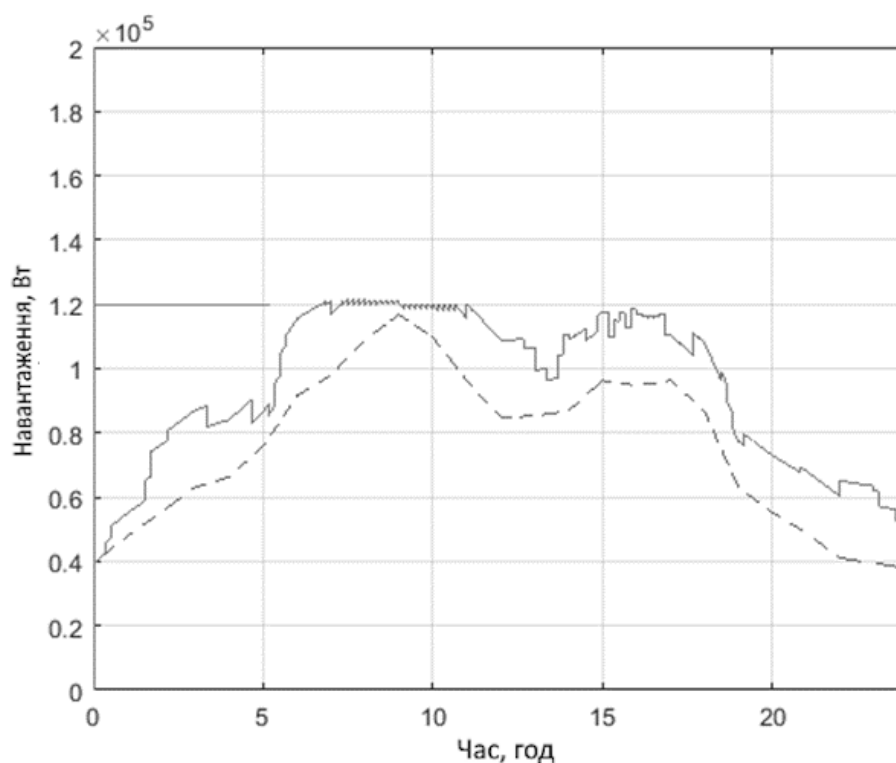


Рисунок 4.13 – Попит на електроенергію протягом 24 годин на основі запропонованого методу зарядки. (Суцільна - загальний попит з електромобілями, штрих-пунктирна - житлове навантаження)

Порівняння цих 3 алгоритмів зарядки показує рис. 4.14. Перевантаження мережі на 16% відбувається під час неконтрольованої зарядки.

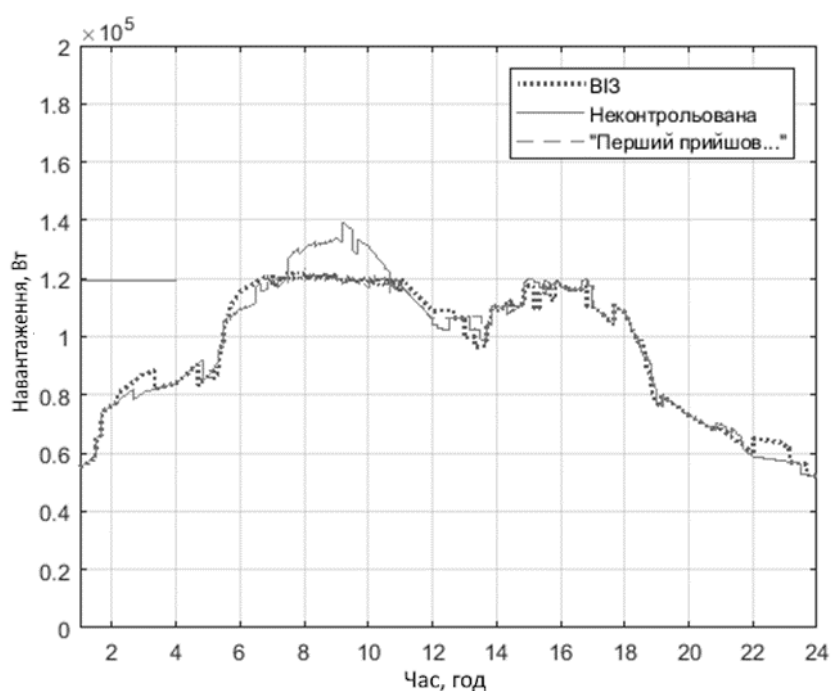


Рисунок 4.14 – Системне навантаження для трьох методів зарядки

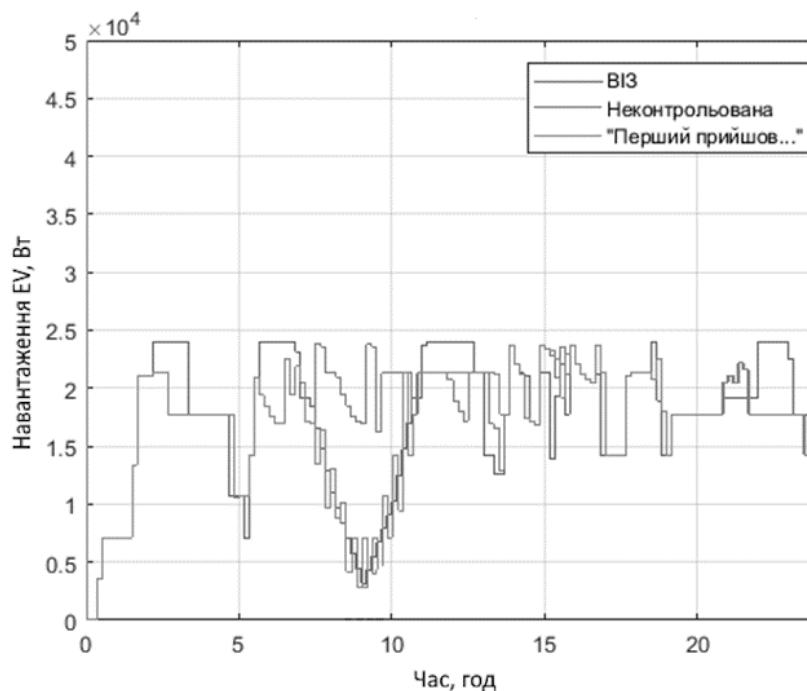


Рисунок 4.15 – Навантаження зарядної станції для трьох методів зарядки

Що стосується запропонованого та звичайного керованого алгоритму, то енергоспоживання електроенергії зменшується в години пік. Метод з видачею пріоритетності в реальному часі має більш гладку криву через розподіл залишкової енергії (якої недостатньо для повної потужності заряджання акумулятора) до останнього в черзі електромобіля.

Навантаження електричних транспортних засобів на шині для 3-х стратегій наводить рис. 4.15. Під час періодів із високою ціною на електроенергію, електромобілі з запропонованим алгоритмом споживали на 20% менше енергії для зменшення рахунків за електроенергію (налаштовується власником ЕЗС).

Рис. 4.16 та рис. 4.17 показує тенденцію зміни рівня заряду SOC для запропонованого та звичайного методу контрольованого заряду, відповідно. Найбільш очевидним недоліком звичайного алгоритму є те, що 4 електромобіля, які підключались до 5-го і 6-го зарядного слоту, не заряджаються. Для деяких з критичних електромобілів, які позначені червоним колом на рис. 4.17, енергії було недостатньо. Запропонований в даній роботі метод не має такого недоліку - практично всі підключені електромобілі заповнюють свій необхідний рівень заряду.

Після кожної ітерації експертного змінення коефіцієнта фазі-правила проводилась симуляція Simulink моделі та оцінювались графіки змінення  $SOC$  для кожного критичного підключеного електромобіля.

В якості критерію якості алгоритму використовується  $E$  - коефіцієнт відношення необхідної та доставленої енергії: (середньоквадратичне відхилення). Табл. 4.2. наводить порівняння середньоквадратичних відхилень для двох методів заряджання.

$$E = \sqrt{\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (W_{необх_i} - W_{доставлен_i})^2\right)}, \quad (4.1)$$

де  $n$  – кількість електромобілів,  $W_{доставлен_i}$  – доставлена до кожного електромобіля енергія.

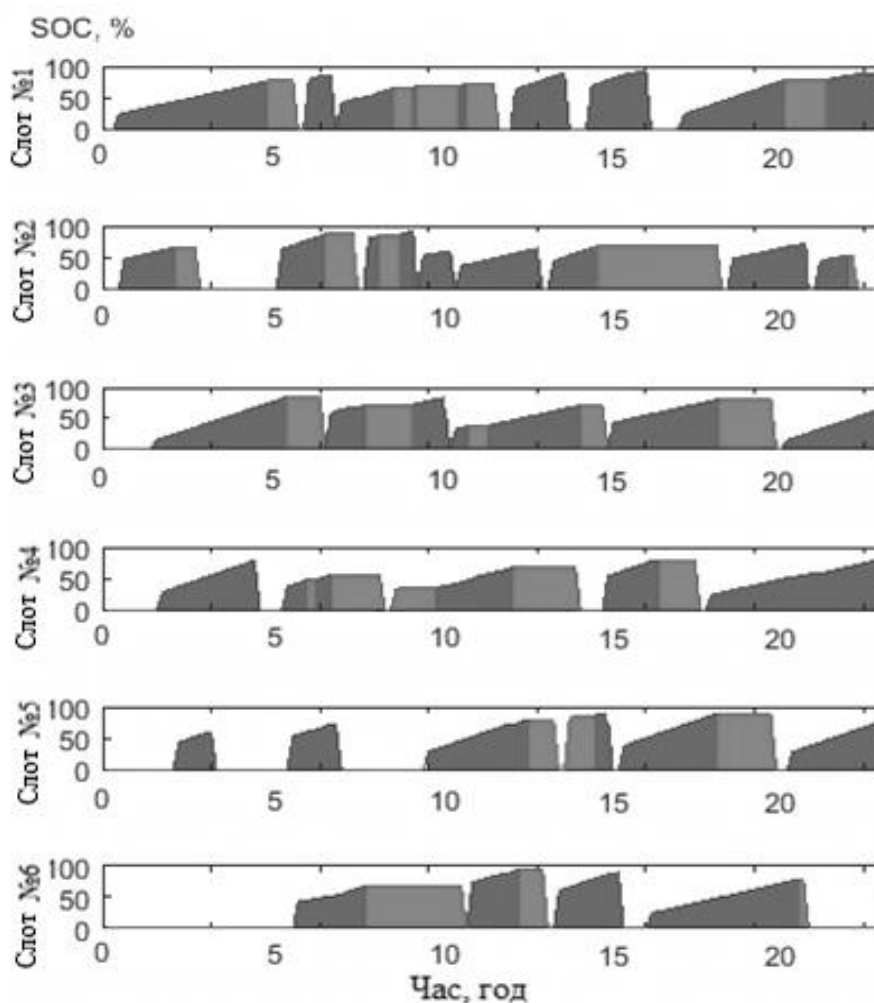


Рисунок 4.16 – Зміни рівня заряду  $SOC$  електромобілів на 6 зарядних слотах під час заряджання запропонованим алгоритмом ( $BI3$ ). (Сірий - електромобіль заряджається, світло-сірий - ЕМ утримується)

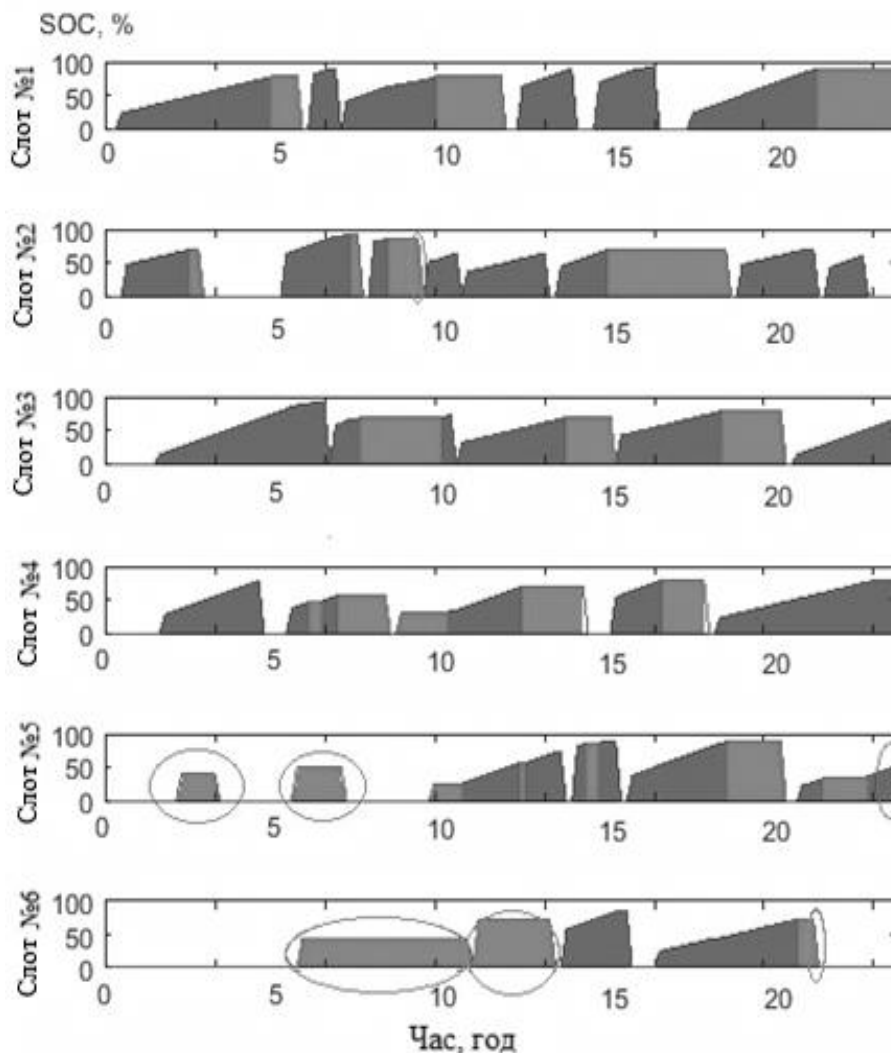


Рисунок 4.17 – Зміни рівня заряду  $SOC$  електромобілів на 6 зарядних слотах під час заряджання звичайним контрольованим алгоритмом. (Сірий - електромобіль заряджається, світло-сірий - ЕМ утримується)

Таблиця 4.2 – Коефіцієнт відношення необхідної та доставленої енергії

	Запропонований метод	«Перший прийшов...»
$E$ для всіх EV	1,889	2,799
$E$ для некритичних EV	0,582	1,851
$E$ для критичних EV	2,961	3,869

Другим критерієм якості є відсутність перевантаження приєднання під час заряджання електромобілів (див. табл. 4.3).

Максимальне перевантаження у %:

$$p = \frac{(S_{\text{ліміт}}_{\text{max}}}{S_{\text{ліміт}}} \quad (4.2)$$

де  $S_{\text{max}}$  - пікова потужність,  $S_{\text{ліміт}} = 120 \text{ кВт}$  - ліміт по потужності для даної мережі.

Навантаження з двома контрольованими методами зарядки приблизно рівний, проте при неконтрольованому методі має місце перевантаження на 16%, яке мало місце у години пік.

Таблиця 4.3 – Максимальне перевантаження лінії

	Без EV	Некерований	Керований з обмеженнями	ВІЗ
Максимальне завантаження лінії $p$ , %	97%	116,2%	99%	99%

Третій критерій: порівняння кількості спожитої енергії зарядною станцією за рівних умов споживання іншими електроприймачами для трьох різних алгоритмів.

У моделюванні було використано 34 електромобіля з різним початковим і необхідним рівнем заряду (табл. 4.4.).

Розрахунки проводились у Matlab після моделювання 24 годинного сценарію.

Спожита електромобілями за 24 години енергія:

$$W_{EM} = \sum_{t=1}^{24} W_{EM_t}, \quad (4.3)$$

де  $W_{EM_t}$  - спожита енергія за кожну годину всіма електромобілями, що заряджались.

Спожита енергія іншим навантаженням за 24 год:

$$W_{\text{заг}} = \sum_{t=1}^{24} W_{EM} + W_{\text{навант}}, \quad (4.4)$$

де  $W_t$  - спожита енергія за кожну годину всім навантаженням приєднання.



Таблиця 4.4 – Спожита енергія з запропонованим методом керування

Час, год	Спожита навантаженням $W_{\text{навант}}$ , кВт·год	Спожита ЕМ $W_{\text{ЕМt}}$ , кВт·год	Загальна спожита $W_{\text{заг}}$ , кВт·год
1	47209	6739	53948
2	54266	20920	75186
3	61912	24058	85970
4	65641	17650	83291
5	74766	10406	85172
6	89576	24264	113841
7	96702	22578	119280
8	107149	12302	119452
9	114657	4171	118828
10	108517	9297	117814
11	95805	21752	117557
12	84744	23743	108487
13	84328	23721	108050
14	86088	23866	109955
15	94489	22161	116650
16	93811	23755	117567
17	94705	23618	118324
18	85451	23774	109226
19	63596	21913	85510
20	54842	23949	78791
21	48411	22547	70958
22	40969	23727	64696

23	39027	22699	61727
24	37846	13927	51773

В табл. 4.5 наведено порівняння спожитої енергії за добу для різних режимів навантаження мережі. Запропонований метод показує навіть більшу кількість спожитої енергії, ніж некерована зарядка через те, що при установленій потужності самої зарядки пріоритет у заряджанні надавався електромобіль більшим струмом заряду.

Запропонований метод контролю процесу заряджання зарядив акумулятори електромобілів на 12% більше у порівнянні зі звичайним методом керування з врахуванням обмежень.

Таблиця 4.5 – Спожита енергія в мережі для різних методів зарядки

	Без EV	Некерований	Керований з обмеженнями	ВІЗ
Загальна спожита енергія за 24 год $W_{заг}$ , кВт·год	1825,2	2267,1	2234,5	2292,1
Спожита енергія EV за 24 год $W_{EM}$ , кВт·год	1825,2	441,9	408,3	467,5

#### 4.4 Реалізація на основі мікроконтролера на платі ARDUINO MEGA 2560

##### 4.4.1 Опис плат мікроконтролерів

Вибір найкращого мікроконтролера для впровадження нечіткої логіки та інтеграції її в існуючу систему контролю заряджання залежить від різних факторів,

включаючи конкретні вимоги системи, наявні ресурси та аналіз різних платформ мікроконтролерів. Ось деякі популярні варіанти плат мікроконтролерів, які часто використовуються для впровадження нечіткої логіки:

1. **Arduino:** Плати Arduino, такі як Arduino Uno, Duo та Mega, широко використовуються для прототипування та інтеграції в різні системи. У них є велике спільнота та численні бібліотеки, які можуть спростити реалізацію нечіткої логіки [74].
2. **Raspberry Pi:** Хоча Raspberry Pi не є мікроконтролером у традиційному розумінні, це популярний одноплатний комп'ютер із більшим обсягом обчислювальної потужності та пам'яті, ніж типові мікроконтролери. Він може впоратися із складними завданнями нечіткої логіки та легко інтегрується в існуючі системи [75].
3. **Серія STM32:** Мікроконтролери STM32 від STMicroelectronics пропонують широкий вибір, від енергоефективних до високопродуктивних пристроїв. Вони добре підходять для обчислень в режимі реального часу і мають доступні засоби розробки [76].
4. **PIC-мікроконтролери:** Мікроконтролери з родини PIC від Microchip відомі своєю надійністю та простотою використання. Вони мають різні розміри та можливості, що дозволяє знайти варіант для реалізації [77].
5. **ESP8266/ESP32:** Ці модулі мікроконтролера популярні для Інтернету речей (IoT). У них є можливості Wi-Fi та Bluetooth, що може бути корисним для дистанційного моніторингу та управління системами нечіткої логіки [78].
6. **Мікроконтролери NXP/Freescale:** Мікроконтролери від NXP, такі як HC12 являються одними з найпопулярніших для реалізації нечіткої логіки через свою поширеність та вартість [79].

При виборі мікроконтролера обов'язково потрібно врахувати наступні фактори, яку будуть порівняні у наступному параграфі [80]:

- Обчислювальна потужність - мікроконтролер повинен мати достатньо обчислювальної потужності для ефективної роботи з алгоритмами нечіткої логіки.
- Пам'ять: необхідна достатня як RAM, так і Flash пам'ять для зберігання нечітких множин, правил та інших даних.
- Інтерфейси введення/виведення необхідні для отримання змінних та видачі рішення на заряджання чи утримання електромобіля.
- Засоби розробки: важлива наявність засобів розробки, середовищ розробки та бібліотек для обраного мікроконтролера.
- Вартість: так як є ціль ефективного використання коштів необхідний оптимальний за ціною/вартістю контролер та плата.

Потужність та пам'ять. Обчислювальна потужність мікроконтролерів може значно відрізнятись залежно від моделі, серії і конфігурації. Приведені нижче порівняння будуть загальними, в свою чергу детальний огляд параметрів плат наведено в табл. 4.6.

Зазвичай, згадані вище плати мікроконтролерів розділені на декілька класів залежно від своєї потужності:

### **1. Arduino Uno, Duo, Mega (AVR-based):**

- Це класичний представник мікроконтролерів з низькою обчислювальною потужністю.
- Низька тактова частота (16 МГц).
- Обмежена кількість пам'яті (декілька кілобайт в RAM та Flash).
- Підходить для простих завдань нечіткої логіки (керування приводом, вентилятором тощо) - Uno, або для обчислювально-вимогливих операцій нечіткої логіки системи заряджання - Mega.

### **2. Raspberry Pi 4:**

- Raspberry Pi - це одноплатний комп'ютер, і він має значно вищу обчислювальну потужність порівняно з типовими мікроконтролерами.

- Має ARM-процесор зі значно вищою частотою тактування та більшим обсягом пам'яті (гігабайти RAM).
- Підходить для складних завдань нечіткої логіки та інших обчислювально інтенсивних операцій.

### 3. STM32 серії (наприклад, STM32F4xx):

- STM32 має різні моделі з різними рівнями обчислювальної потужності.
- Найпотужніші моделі в цій серії мають Cortex-M4 ядро зі швидкими тактовими частотами та апаратну підтримку для численних операцій.
- Зазвичай вони можуть обробляти складні операції нечіткої логіки без особливих труднощів.

### 4. ESP8266/ESP32 (ESP32):

- ESP8266/ESP32 має невелику обчислювальну потужність порівняно з деякими іншими мікроконтролерами (є більш потужними, ніж ті, що зазвичай знаходяться в Arduino Uno, але менш потужні, ніж у Raspberry Pi).
- Вони підходять для більшості завдань нечіткої логіки, але можуть мати обмеження в обсягу доступної пам'яті.

### 5. NXP/Freescale Microcontrollers (Kinetis, LPC):

- Всі ці серії мають різні моделі з різними характеристиками обчислювальної потужності.
- Найпотужніші моделі можуть впоратися із складними операціями нечіткої логіки.

Таблиця 4.6 – Основні характеристики мікроконтролерів

Мікроконтролер/ Платформа	Частота	Flash- пам'ять	ОЗП (RAM)	Спеціалізовані функції/інтерфейси
Arduino Uno	16 МГц (ATmega328P)	32 КБ	2 КБ	14 цифрових, 6 аналогових UART, SPI, I2C, PWM, USB

Arduino Mega 2560	16 МГц (ATmega2560)	256 КБ	8 КБ	54 цифрових, 16 аналогових UART, SPI, I2C, PWM, USB
Raspberry Pi 4 (4 ГБ)	1.5 ГГц (Quad-core ARM Cortex- A72)	4 ГБ	4 ГБ	GPIO, HDMI, Ethernet, USB, I2C, SPI, UART
STM32F407VG	168 МГц (Cortex-M4)	1 МБ	192 КБ	100 GPIO пінів, UART, SPI, I2C, PWM, CAN, USB, Ethernet
ESP32-WROOM-32	240 МГц (Dual-core Tensilica LX6)	4 МБ	520 КБ	UART, SPI, I2C, PWM, Wi-Fi, Bluetooth
NXP Kinetis K64F (MK64FN1M0VLL12)	120 МГц (Cortex-M4)	1 МБ	256 КБ	82 GPIO пінів, UART, SPI, I2C, PWM, CAN, USB, Ethernet
NXP LPC1768	100 МГц (Cortex-M3)	512 КБ	64 КБ	70 GPIO пінів, UART, SPI, I2C, PWM, CAN, USB, Ethernet

#### 4.4.2 Вибір мікроконтролера на платі Arduino Mega 2560

Arduino Mega - це мікроконтролерна плата, яка належить до лінійки Arduino та відрізняється великими ресурсами порівняно з більшими обсягами пам'яті та більшою кількістю GPIO-пінів порівняно з Arduino Uno. Ця плата добре підходить

для запропонованої системи, включаючи реалізацію нечіткої логіки [80]. Зовнішній вигляд плати зображено на рис. 4.18. Оскільки окрім обчислень нечіткої логіки потрібно проводити етап оптимізації цільової функції, був обраний даний мікроконтролер.

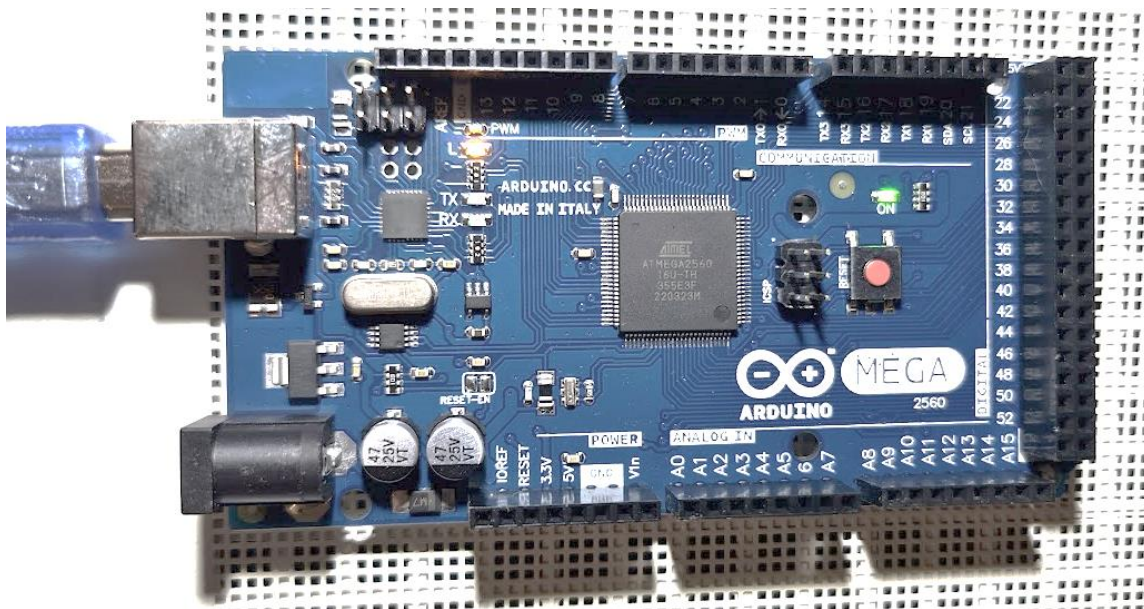


Рисунок 4.18 – Зовнішній вигляд плати Arduino Mega 2560

Детальний опис характеристик Arduino Mega [74]:

Мікроконтролер: ATmega2560. Частота: 16 МГц

Пам'ять:

- Flash-пам'ять: 256 КБ (для програмного коду);
- ОЗП (RAM): 8 КБ (для зберігання змінних та даних);
- EEPROM: 4 КБ (для зберігання даних).

Аналогові та цифрові GPIO піни:

- Цифрові піни: 54 цифрових GPIO-піни, з яких 15 можуть працювати як PWM-виходи;
- Аналогові піни: 16 аналогових входів для зчитування аналогових сигналів в діапазоні від 0 до 5 В.

Серійні інтерфейси:

- UART (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter): Є багато UART-портів для комунікації з комп'ютером або іншими пристроями;
- SPI (Serial Peripheral Interface): Мається апаратна підтримка SPI для комунікації з пристроями, такими як сенсори та дисплеї;
- I2C (Inter-Integrated Circuit): Мається апаратна підтримка I2C для зв'язку з пристроями через I2C.

Зовнішній інтерфейс:

- USB: USB-порт для програмування та зв'язку з комп'ютером.
- DC-роз'єм: Для живлення мікроконтролера.

Регульована напруга живлення: 7-12 В (рекомендовано 7-12 В).

Робоча напруга: 5 В (зазвичай живиться віднапругою через регулятор на платі).

Роз'єми: Arduino Mega має численні роз'єми для підключення додаткових модулів та сенсорів, включаючи шилди (shields) Arduino, які можна просто вставити на верхню частину плати.

#### 4.4.3 Порядок впровадження плати мікроконтролеру в систему заряджання

Електрозарядна станція, яка є об'єктом дослідження, являє собою об'єднання зарядних станцій (слотів) в одну мережу. Даний зарядний слот та його структурна схема підключення наведена на рис. 4.19.



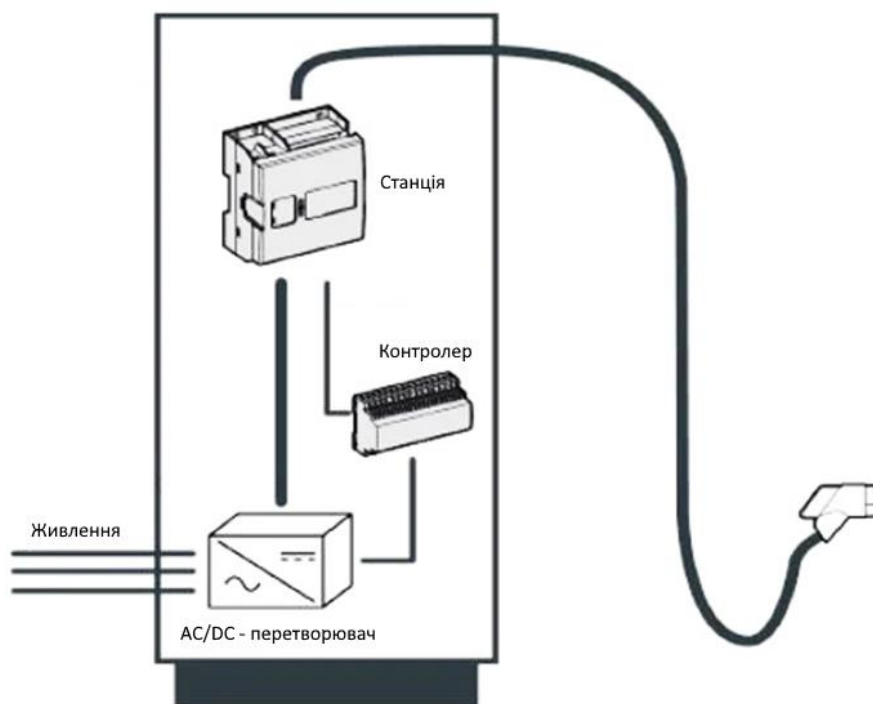


Рисунок 4.19 – Зарядний слот та структурна схема підключення

Основні конструкційні елементи ЕЗС, функції конектора і роз'єму J1772, процес підключення електромобіля до зарядної станції описано нижче. Також пристрої комутації, захисту та керування зарядного блоку було описано у розділі 1. На рис. 4.20 показано розташування контактів конектора зарядного слоту.

Контролер керує процесом електропостачання електромобіля під час заряджання [26].

Контактори використовуються для керування навантаженням (живлення електромобіля), зовнішньої вентиляції та блокування роз'єму J1772. Світлодіодна індикація вказує поточний стан системи. Налаштування уставки струму заряджання встановлюється через інтерфейс RS485.

Управління величиною струму заряджання можливе і під час процесу зарядки.

Одним з найбільших переваг даного алгоритму є простота, швидкість і дешевизна реалізації та обслуговування. Порівняно з іншими алгоритмами в реальному часі, що вирішують диференційні рівняння та потребують великих обчислювальних потужностей, представлений алгоритм може бути реалізований на

16-розрядному мікроконтролері з цілочисленним арифметико-логічним пристроєм та тактовою частотою всього 2 МГц. Схема підключення контролеру з запропонованим алгоритмом в існуючі слоти ЕЗС наведена на рис. 4.21.

Після обчислень нечіткої логіки та оптимізації цільової функції мікроконтролер подає сигнал на контрольний ключ Е2 (Control Switch) – якщо заряджання в даний проміжок часу дозволений контакт буде замкнутий. Якщо за рішенням алгоритму в даний проміжок часу заряджання не дозволено контакт Е2 залишиться розімкнутим.

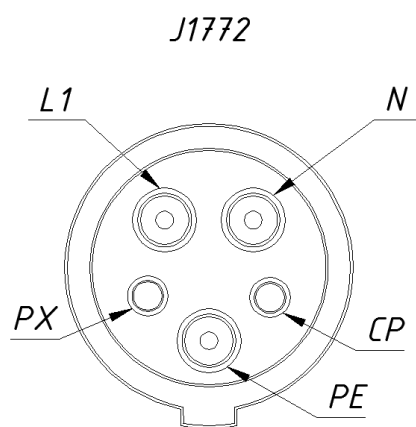


Рисунок 4.20 – Контакти конектора зарядного слоту

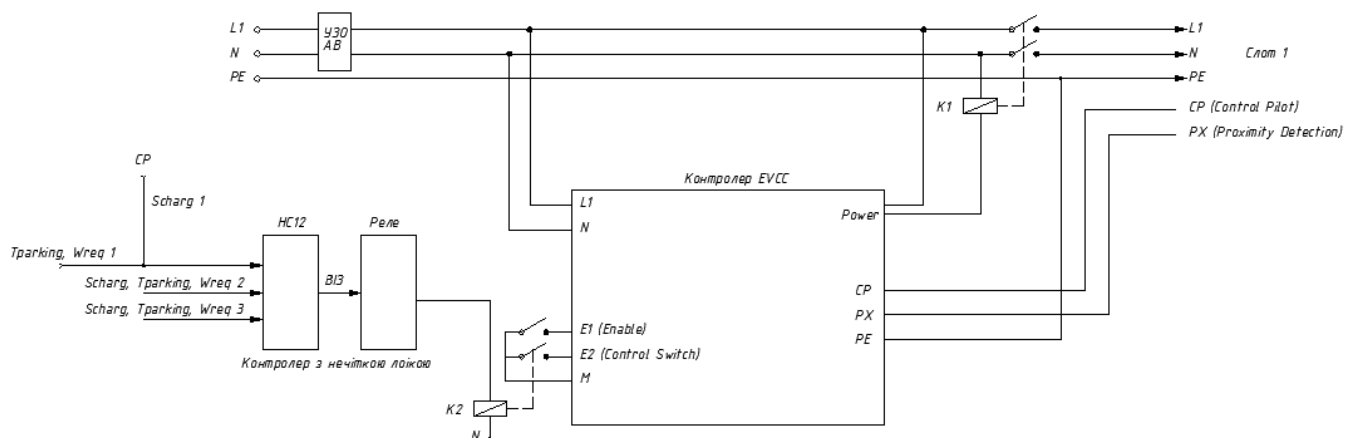


Рисунок 4.21 – Схема підключення контролеру нечіткої логіки з запропонованою системою до контролеру ЕЗС

Метою цієї роботи є розробка системи контролю заряджання електромобіля в реальному часі. Вибір було зупинено на поєднанні середовища

MATLAB/Simulink і плати Arduino. MATLAB/Simulink надає «Пакет підтримки Simulink для обладнання Arduino» для розробки алгоритмів керування в Simulink і завантаження його безпосередньо в апаратну платформу (плату Arduino). «Пакет підтримки Simulink для обладнання Arduino» дозволяє створювати та запускати моделі Simulink у різних областях та сферах використання. Він пропонує бібліотеку блоків для налаштування та доступу до датчиків, приводів та комунікаційних інтерфейсів Arduino через кабель USB [81].

Рисунок 4.224.22 зображує загальний вид моделі Matlab Simulink та підключення плати до зарядної станції. Потужність зарядної станції 24 кВт. Трансформатор та обладнання мережі обмежені потужністю 120 кВт. Після кожної ітерації експертного змінення коефіцієнта фазі-правила проводилась симуляція Simulink моделі та оцінювались графіки змінення SOC для кожного підключеного електромобіля.

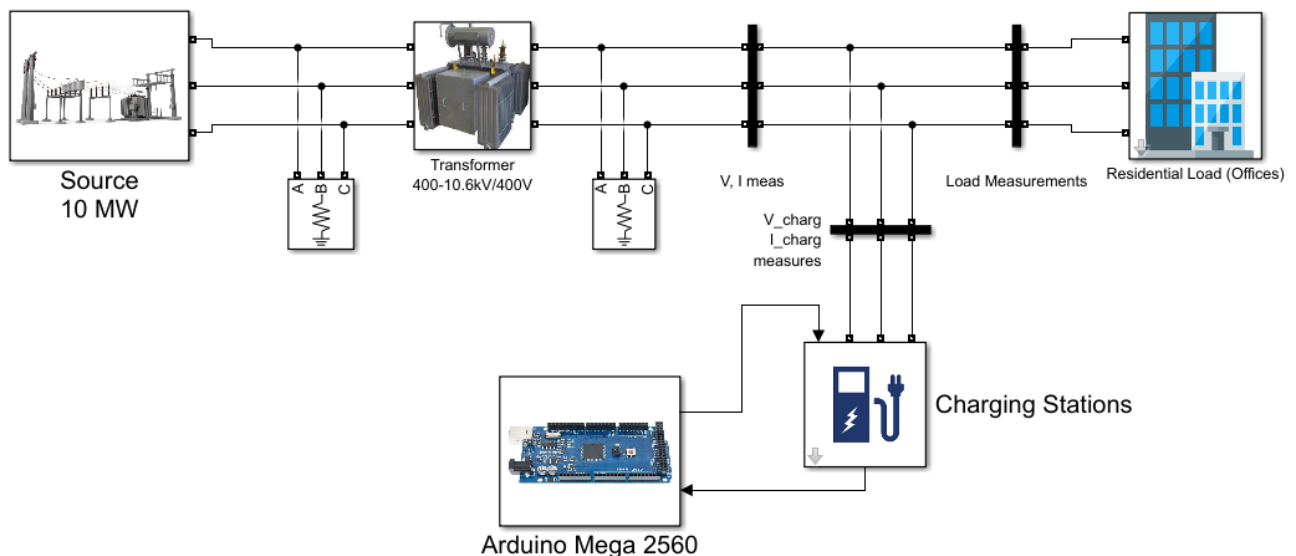


Рисунок 4.22 – Загальний вид всієї моделі в Matlab Simulink з підключеним Arduino Mega 2560

Пакет дозволяє виконувати такі завдання, як:

- Отримання аналогових і цифрових даних датчиків із плати Arduino.
- Керування пристроями з цифровими та ШІМ-виходами.
- Зв'язок із платою Arduino через USB кабель.

- Доступ до периферійних пристроїв і датчиків, підключених через інтегровану схему (I2C) або послідовний периферійний інтерфейс (SPI)

Розроблена в Matlab система була завантажена на Arduino Mega 2560 через USB інтерфейс. Рішення MATLAB Coder перетворило код запропонованої системи, що зберігався в m-файлі на код написаним на C++, що є “зрозумілим” для Arduino. Також з допомогою Matlab симулювалася передача зчитаних станцією з електромобіля  $S_{зар}$ ,  $W_{необх}$  та  $t_{парк}$ ; а також передача рішення мікроконтролера про заряджання або утримання електромобіля.

Передача ввідних даних про параметри електромобілів та мережі з моделі Matlab до плати відбувається за допомогою блоку Serial Transmit з бібліотеки Simulink Support Package for Arduino Hardware [82]. Вивід матриці з рішенням про заряджання чи утримання підключених електромобілів реалізовано за допомогою блоку Serial Receive (рис. 4.23).

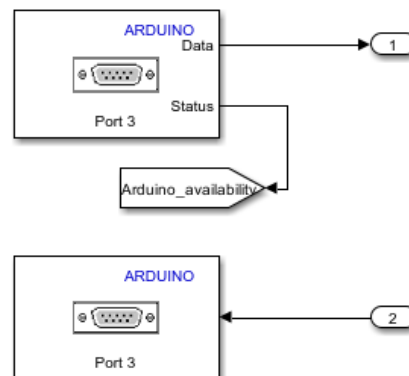


Рисунок 4.23 – Використані блоки бібліотеки Arduino

Розроблена в Matlab Fuzzy Logic Designer нечітка система була збережена у файлі з .fis розширенням, який не є «зрозумілим» для Arduino. Задля обрахування результату нечіткої логіки для кожної ітерації обчислень нечітка система була переписана мовою C++ та завантажена у пам'ять плати мікроконтролера.

Логіка оптимізації цільової функції з врахуванням обмежень мережені в моделі написана на мові Matlab, яка також конвертована в C++ та збережена в пам'яті Arduino.

Нижче на рис. 4.24 – 4.26 запропонована система заряджання з обчисленнями на Arduino Mega 2560 порівнюється зі обчисленнями виконаними на ПК. Як видно з рис. 4.24 перевантаження мережі (навантаження вище 120 кВт) до 16% відбувається під час неконтрольованої зарядки з 7 до 11 години ранку.

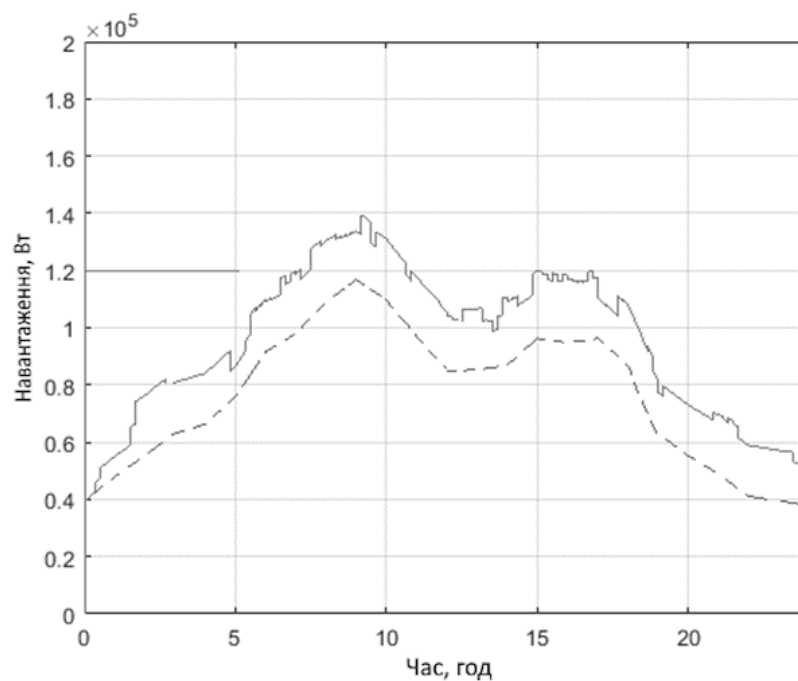


Рисунок 4.24 – Попит на електроенергію протягом 24 годин на основі неконтрольованої зарядки. (Суцільна лінія - загальний попит з електромобілями, штрих-пунктирна - інше навантаження)

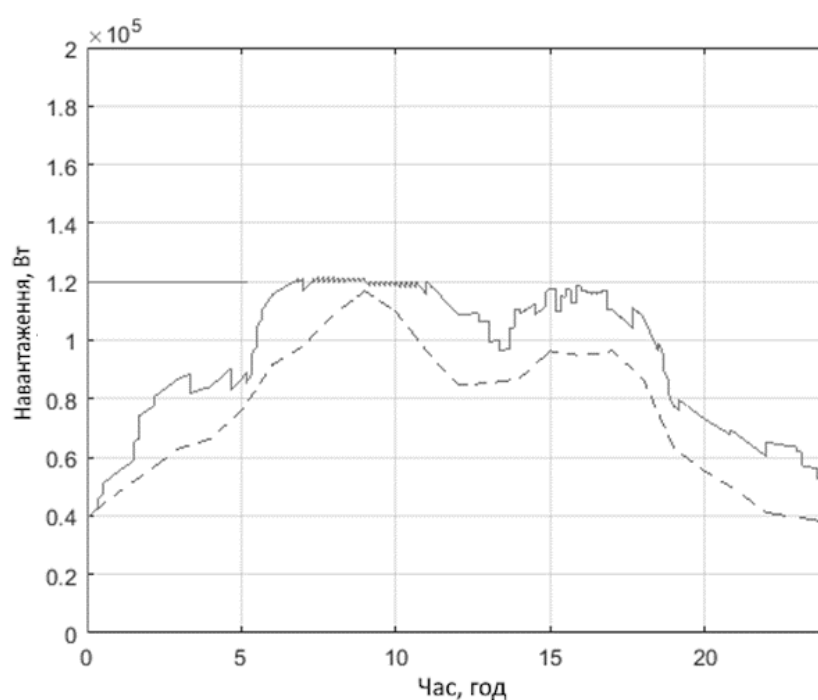


Рисунок 4.25 – Попит на електроенергію протягом 24 годин на основі запропонованого методу зарядки обчислений на ПК в середовищі Matlab Simulink. (Суцільна - загальний попит з електромобілями, штрих-пунктирна – інше навантаження)

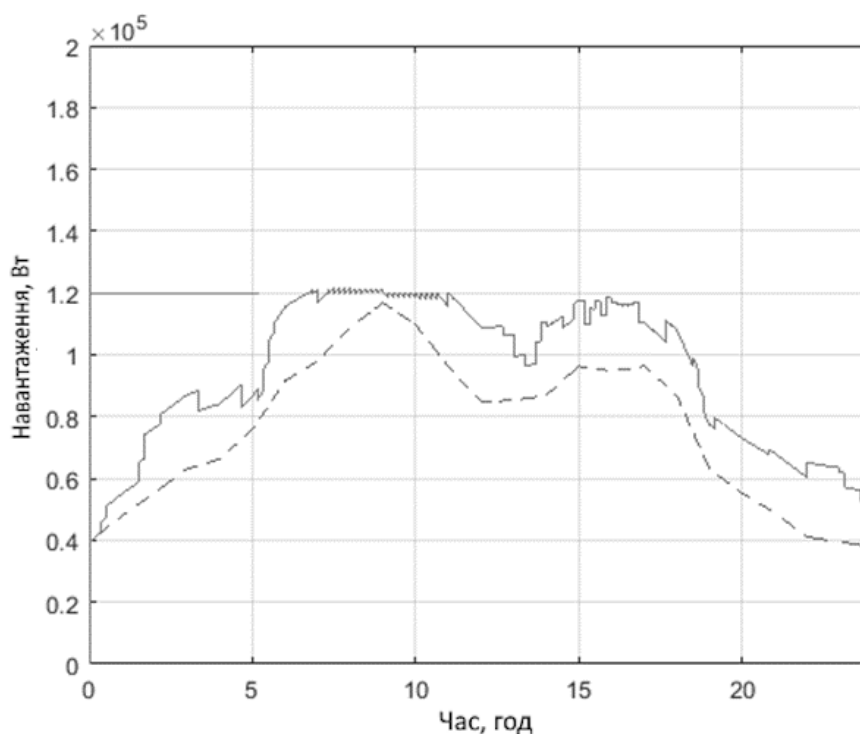


Рисунок 4.26 – Попит на електроенергію протягом 24 годин на основі запропонованого методу зарядки при виконанні обчислень на Arduino Mega 2560. (Суцільна - загальний попит з електромобілями, штрих-пунктирна - інше навантаження)

В табл. 4.7 наведено порівняння спожитої енергії за добу для різних режимів обчислень.

Порівняння цих обчислень зарядки показує – обчислення переданої електромобілям потужності при врахуванні обмежень в середовищі Matlab Simulink на персональному комп'ютері не відрізняються від обчислень виконаних на Arduino Mega 2560.

Таблиця 4.7 – Спожита енергія в мережі для різних методів зарядки з та без підключеним мікроконтролером

	Навантаження в мережі без EV (Matlab Simulink)	Некерований спосіб заряджання EV (Matlab Simulink)	Моделювання мережі - Matlab Simulink, обчислення системи керування заряджання - Matlab	Моделювання мережі - Matlab Simulink, обчислення системи керування заряджання - Arduino Mega 2560
Загальна спожита енергія за 24 год $W_{\text{заг}}$ , кВт·год	1825,2	2267,1 (відбувалось перевантаження мережі)	2292,1	2292
Спожита енергія EV за 24 год $W_{\text{ЕМ}}$ , кВт·год	1825,2	441,9	467,5	467

#### Висновки до Розділу 4

1. Запропонований метод зарядки електромобілів, який базується на нечіткій логіці, є ефективнішим у порівнянні з типовим алгоритмом з обмеженнями електропостачання.

2. Графіки навантаження для контрольованих методів зарядки близькі, але неконтрольований метод призводить до перевантаження на 16% у години пік.

3. Головний недолік звичайного методу зарядки з обмеженнями полягає в тому, що електромобілі, які підключаються пізніше, не заряджаються при

обмеженому електроспоживанні. Ситуаційний метод розв'язує цю проблему, дозволяючи всім електромобілям заповнити свій необхідний рівень заряду.

4. Результати моделювання та експерименту підтверджують ефективність запропонованої системи на основі нечіткої логіки як на ПК в середовищі Matlab, так і на реальному пристрої Arduino



## ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі вирішена важлива науково-прикладна задача оптимізації процесу керування зарядними станціями електромобілів у реальному часі в умовах обмеженого електропостачання, що дозволить забезпечити ефективне та стійке заряджання електромобілів та уникнути перевантаження електромережі.

В роботі одержані наступні наукові та практичні результати:

1. Вперше розроблено нову оптимізаційну модель керування зарядними станціями в реальному часі, що відрізняється від існуючих моделей тим, що дозволяє забезпечити більше енергії поставки до батарей електромобілів за однакових обмежень споживання в місці підключення електрозарядних станцій.

2. Розроблено методику експертної системи видачі пріоритетності заряджання на основі нечіткої логіки та вперше реалізовано запропоновану систему керування на мікроконтролері на платі Arduino Mega 2560.

3. Розроблено імітаційну модель і виконано моделювання процесу керованої зарядки із розробленим методом для роботи в реальному часі в умовах обмеженого електропостачання в середовищі Matlab, що дало можливість встановити, що розроблений метод зарядки забезпечує оптимальне розподілення зарядної потужності між електромобілями з урахуванням обмежень мережі та індивідуальних потреб.

4. Запропоновано систему керування електрозарядними станціями в режимі реального часу на основі нечіткої логіки та оптимізації цільової функції в умовах обмеженого електропостачання.

5. Доведено ефективність запропонованої системи роботи в реальному часі у порівнянні з іншими алгоритмами на основі планування та централізованого управління та встановлено, що запропонований метод забезпечує відповідність накладеним обмеженням та забезпечує належне заряджання електромобілів у контексті даної системи.

6. Реалізація системи виконана на мікроконтролері на платі Arduino Mega 2560, і запропоновано схему його підключення до існуючої електростанції.

7. Результати роботи впроваджено в освітній процес кафедри Автоматизації електротехнічних та мехатронних комплексів та використовуються в освітніх компонентах освітньо-професійної програми підготовки бакалаврів та магістрів «Інжиніринг інтелектуальних електротехнічних та мехатронних комплексів» за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» а саме: дисципліна «Інжиніринг електротехнічних та мехатронних комплексів», «Автоматизований електропривод машин і установок».

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] «Directive 2012/27/EU of the European Parliament and of the Council of 25 October 2012 on energy efficiency, amending Directives 2009/125/EC and 2010/30/EU and repealing Directives 2004/8/EC and 2006/32/EC Text with EEA relevance. Official Journal of the European Union 2012, 315, 1–56. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32012L0027&qid=1648304389694>».
- [2] «Directive (EU) 2018/844 of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018 amending Directive 2010/31/EU on the energy performance of buildings and Directive 2012/27/EU on energy efficiency (Text with EEA relevance). PE/4/2018/REV/1. Official Journal of the European Union 2018, 156, 75–91. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32018L0844&qid=1628935298304>».
- [3] «Council Decision (EU) 2016/590 of 11 April 2016 on the signing, on behalf of the European Union, of the Paris Agreement adopted under the United Nations Framework Convention on Climate Change. Official Journal of the European Union 2016, 103, 1–2. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32016D0590&qid=1648304505396>».
- [4] «Directive (EU) 2019/944 of the European Parliament and of the Council of 5 June 2019 on common rules for the internal market for electricity and amending Directive 2012/27/EU (Text with EEA relevance.). Official Journal of the European Union 2019, 158, 125–199. URL: <http://data.europa.eu/eli/dir/2019/944/oj>».
- [5] «Directive (EU) 2018/2002 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 amending Directive 2012/27/EU on energy efficiency (Text with EEA relevance.) PE/54/2018/REV/1. Official Journal of the European Union 2018, 328, 210–230. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32018L2002>».
- [6] National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» *et al.*, «SIMULATION OF THE PROCESS OF CONTROLLED CHARGING OF ELECTRIC VEHICLES IN THE CONDITIONS OF LIMITED ELECTRICITY

SUPPLY», *Trans. Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi Natl. Univ.*, вип. 3(128), с. 91–98, Чер 2021, doi: 10.30929/1995-0519.2021.3.91-98.

[7] L. Davydenko, N. Davydenko, A. Bosak, A. Bosak, A. Deja, i T. Dzhuguryan, «Smart Sustainable Freight Transport for a City Multi-Floor Manufacturing Cluster: A Framework of the Energy Efficiency Monitoring of Electric Vehicle Fleet Charging», *Energies*, вип. 15, вип. 10, с. 3780, Трав 2022, doi: 10.3390/en15103780.

[8] А. В. Andrii Bosak, «Implementation of a Real-Time Fuzzy Control System for Electric Vehicle Charging Stations Based on Arduino Mega 2560 Microcontroller», *Implement. Real-Time Fuzzy Control Syst. Electr. Veh. Charg. Stn. Based Arduino Mega 2560 Microcontroller*, вип. 4, 2023.

[9] Андрій Гурков, «З 2035 року в ЄС заборонять продаж авто з ДВЗ? Плани і факти», *DW*, 2022, [Online]. Доступний у: <https://www.dw.com/uk/z-2035-roku-v-yevropi-zaboroniat-prodazh-avto-z-dvz-plany-fakty-zaperechennia/a-62092714>

[10] Мінфін, «Коли українці масово пересядуть на дешеві китайські електрокари», 2021, [Online]. Доступний у: <https://minfin.com.ua/ua/2021/07/08/67604307>

[11] Jameson Dow, «Washington State bans gas cars by 2030 – the earliest in the US», *Electerk*, 2021, [Online]. Доступний у: <https://electrek.co/2021/04/15/washington-state-bans-gas-cars-by-2030-the-earliest-in-the-us/>

[12] Opendatabot, «Рекордну кількість електроавто ввезли в Україну за півроку. Найпопулярніші марки та моделі електрокарів в Україні», 2023.

[13] Maryna Kytina, «Ukraine Invest - Попит на електромобілі в Україні стрімко зростає». [Online]. Доступний у: <https://www.facebook.com/UkraineInvest/posts/pfbid02EsAamYyxza2ihLJSq2eLCVGvyJXX1Zqkz2hHtX5kmjrS9VSTJWGZaGY8LoMnURtHl>

[14] Електромобілі в Україні: розподіл за регіонами та рівень електромобілізації. *AUTO.RIA*. URL: <https://auto.ria.com/uk/news/electric-cars/258584/elektromobili-v-ukraini-rozpodil-za-regionami-ta-riven-elektromobili.html> (Дата звернення: 13.03.2024).

- [15] Волошин Павло, «П'ять графіків про електромобілі в Україні», [Online]. Доступний у: <http://uprom.info/news/cars/p-yat-grafikov-pro-elektromobili-v-ukrayini-infografika/>
- [16] Віта Молодан, «За 2022 рік український ринок електромобілів зріс у півтора рази: топ-5 марок», *Журнал Delo.ua*.
- [17] «Про внесення змін до деяких законів України щодо стимулювання розвитку галузі електричного транспорту в Україні». 2018.
- [18] Assaf Oron, «Top 10 Countries in the Global EV Revolution», 2016, [Online]. Доступний у: <https://insideevs.com/top-10-countries-in-the-global-ev-revolution-2016-edition/>
- [19] Т.Г. Письменна, «Електромобілі та державна політика», [Online]. Доступний у: [https://dt.ua/business/elektromobili-ta-derzhavna-politika-vrahovuyuchi-racionalnist-ukrayinciv-mozhna-chekati-vidchutnogo-rozvitku-rinku-elektromobiliv-i-bez-osoblivoyi-pidtrimki-z-boku-derzhavi-\\_.html](https://dt.ua/business/elektromobili-ta-derzhavna-politika-vrahovuyuchi-racionalnist-ukrayinciv-mozhna-chekati-vidchutnogo-rozvitku-rinku-elektromobiliv-i-bez-osoblivoyi-pidtrimki-z-boku-derzhavi-_.html)
- [20] Журнал «MyMyCars», «Розвиток мережі швидкісних зарядних станцій в Україні. Пропозиції від компаній», 2023, [Online]. Доступний у: <https://mymycars.com/full-news/rozv-1c640130-e3d6-47b1-b3c7-ccf1533cbaad>
- [21] IRS Group, «Аналіз ринку електромобілів. Дослідження», [Online]. Доступний у: <http://irsgroup.com.ua/ecars>
- [22] M. C. Falvo, D. Sbordone, I. S. Bayram, i M. Devetsikiotis, «EV charging stations and modes: International standards», в *2014 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion*, Ischia, Italy: IEEE, Чер 2014, с. 1134–1139. doi: 10.1109/SPEEDAM.2014.6872107.
- [23] «EV charger type». [Online]. Доступний у: [https://www.hjlcharger.com/frequently\\_question/483.html](https://www.hjlcharger.com/frequently_question/483.html)
- [24] «Type2 / IEC 62196-2 32A EV Charging Female Plug». [Online]. Доступний у: <https://www.made-in-china.com/showroom/njuptlz2/product-detailLKtmBDcVAehN/China-Type2-IEC-62196-2-32A-EV-Charging-Female-Plug.html>

- [25] Mober, «CHARGING PLUGS». [Online]. Доступний у: <https://www.mober.co.za/drivers/>
- [26] Dana Plymouth Technology Center, «OpenECU-EVCC (OE-EVCC) User Guide». 2022. [Online]. Доступний у: <https://www.scribd.com/document/589256904/OpenECU-EVCC-UserGuide>
- [27] «Bereit. Für die Zukunft.», *Bayern-innovativ*, 2023. [Online]. Доступний у: <https://www.bayern-innovativ.de/de/magazin/magazin-vernetzt>
- [28] ДП «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості» (ДП «УкрНДНЦ»), «ДСТУ EN ІЕС 61851-1:2021 Система зарядки електричних транспортних засобів дротова. Частина 1. Загальні вимоги (EN ІЕС 61851-1:2019, IDT; ІЕС 61851-1:2017, IDT)». 2021.
- [29] International Standard, «IEC 62196-1:2022 Plugs, socket-outlets, vehicle connectors and vehicle inlets - Conductive charging of electric vehicles - Part 1: General requirements». 2023.
- [30] ZDWL New Energy Technology Co, «Technical Requirements for EV Charger». [Online]. Доступний у: <https://zdw1-tec.com/news/technical-requirements-for-ev-charger/>
- [31] R. Godina, E. M. G. Rodrigues, N. G. Paterakis, O. Erdinc, i J. P. S. Catalão, «Innovative impact assessment of electric vehicles charging loads on distribution transformers using real data», *Energy Convers. Manag.*, вип. 120, с. 206–216, Лип 2016, doi: 10.1016/j.enconman.2016.04.087.
- [32] M. S. ElNozahy i M. M. A. Salama, «A Comprehensive Study of the Impacts of PHEVs on Residential Distribution Networks», *IEEE Trans. Sustain. Energy*, вип. 5, вип. 1, с. 332–342, Січ 2014, doi: 10.1109/TSTE.2013.2284573.
- [33] G. Razeghi, L. Zhang, T. Brown, i S. Samuelsen, «Impacts of plug-in hybrid electric vehicles on a residential transformer using stochastic and empirical analysis», *J. Power Sources*, вип. 252, с. 277–285, Квіт 2014, doi: 10.1016/j.jpowsour.2013.11.089.

- [34] C. D. M. Affonso i M. Kezunovic, «Technical and Economic Impact of PV-BESS Charging Station on Transformer Life: A Case Study», *IEEE Trans. Smart Grid*, вип. 10, вип. 4, с. 4683–4692, Лип 2019, doi: 10.1109/TSG.2018.2866938.
- [35] R. Freire, J. Delgado, J. M. Santos, i A. T. De Almeida, «Integration of renewable energy generation with EV charging strategies to optimize grid load balancing», в *13th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*, Funchal, Madeira Island, Portugal: IEEE, Вер 2010, с. 392–396. doi: 10.1109/ITSC.2010.5625071.
- [36] A. Von Jouanne i B. Banerjee, «Assessment of voltage unbalance», *IEEE Trans. Power Deliv.*, вип. 16, вип. 4, с. 782–790, Жов 2001, doi: 10.1109/61.956770.
- [37] A. Srivastava, M. Manas, i R. K. Dubey, «Electric vehicle integration's impacts on power quality in distribution network and associated mitigation measures: a review», *J. Eng. Appl. Sci.*, вип. 70, вип. 1, с. 32, Груд 2023, doi: 10.1186/s44147-023-00193-w.
- [38] T. Hoevenaars, K. LeDoux, i M. Colosino, «Interpreting IEEE STD 519 and meeting its harmonic limits in VFD applications», в *IEEE Industry Applications Society 50th Annual Petroleum and Chemical Industry Conference, 2003. Record of Conference Papers.*, Houston, TX, USA: IEEE, 2003, с. 145–150. doi: 10.1109/PCICON.2003.1242609.
- [39] Z. Guo, J. Deride, i Y. Fan, «Infrastructure planning for fast charging stations in a competitive market», *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.*, вип. 68, с. 215–227, Лип 2016, doi: 10.1016/j.trc.2016.04.010.
- [40] D. Pejovski, K. Najdenkoski, i M. Digalovski, «Impact of different harmonic loads on distribution transformers», *Procedia Eng.*, вип. 202, с. 76–87, 2017, doi: 10.1016/j.proeng.2017.09.696.
- [41] L. Kutt, E. Saarijarvi, M. Lehtonen, H. Molder, i J. Niitsoo, «Current harmonics of EV chargers and effects of diversity to charging load current distortions in distribution networks», в *2013 International Conference on Connected Vehicles and Expo (ICCVE)*, Las Vegas, NV, USA: IEEE, Груд 2013, с. 726–731. doi: 10.1109/ICCVE.2013.6799884.

- [42] Міністерство Енергетики України, «Правила улаштування електроустановок». [Online]. Доступний у: <https://mev.gov.ua/storinka/pravyula-shtuvannya-elektroustanovok>
- [43] «Правила користування електричною енергією». Постанова Національної комісії регулювання електроенергетики України від 31 липня 1996 року N 28. [Online]. Доступний у: [https://www.ukrenergexport.com/materials/Ukrenergexport\\_pravila\\_koristuvannya\\_e.pdf](https://www.ukrenergexport.com/materials/Ukrenergexport_pravila_koristuvannya_e.pdf)
- [44] Офіс ефективного регулювання BRDO, «Концепція розвитку ринку електрозарядних станцій». 2017. [Online]. Доступний у: [https://brdo.com.ua/wp-content/uploads/2021/02/Report\\_2017print.pdf](https://brdo.com.ua/wp-content/uploads/2021/02/Report_2017print.pdf)
- [45] G. K. K. P.-Y. Kong, «Charging Schemes for Plug-In Hybrid Electric Vehicles in Smart Grid».
- [46] ISO Standards, «ISO 50001:2018(E) Energy management systems - Requirement with guidance for use (second edition). ISO, 2018. 30 p.»
- [47] N. Davydenko, I. Korobiichuk, L. Davydenko, M. Nowicki, i V. Davydenko, «Identification of Cyclic Changes in the Operation Mode of the Production Facility Based on the Monitoring Data», в *Mechatronics 2019: Recent Advances Towards Industry 4.0*, вип. 1044, R. Szewczyk, J. Krejsa, M. Nowicki, i A. Ostaszewska-Liżewska, Ред., в *Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol. 1044. , Cham: Springer International Publishing, 2020, с. 189–197. doi: 10.1007/978-3-030-29993-4\_24.
- [48] N. Jewell, L. Bai, J. Naber, i M. L. McIntyre, «Analysis of electric vehicle charge scheduling and effects on electricity demand costs», *Energy Syst.*, вип. 5, вип. 4, с. 767–786, Груд 2014, doi: 10.1007/s12667-013-0114-0.
- [49] за заг. ред. О.В. Кириленка, *Інтелектуальні електричні мережі: елементи та режими*. Інститут електродинаміки, 2016.
- [50] S. Shao, M. Pipattanasomporn, i S. Rahman, «Challenges of PHEV penetration to the residential distribution network», в *2009 IEEE Power & Energy Society General*



*Meeting*, Calgary, AB, Canada: IEEE, Лип 2009, с. 1–8. doi: 10.1109/PES.2009.5275806.

[51] Jing Huang, V. Gupta, i Yih-Fang Huang, «Scheduling algorithms for PHEV charging in shared parking lots», в *2012 American Control Conference (ACC)*, Montreal, QC: IEEE, Чеп 2012, с. 276–281. doi: 10.1109/ACC.2012.6314939.

[52] O. Sundstrom i C. Binding, «Flexible Charging Optimization for Electric Vehicles Considering Distribution Grid Constraints», *IEEE Trans. Smart Grid*, вып. 3, вып. 1, с. 26–37, Бер 2012, doi: 10.1109/TSG.2011.2168431.

[53] U. Reiner, C. Elsinger, i T. Leibfried, «Distributed self organising Electric Vehicle charge controller system: Peak power demand and grid load reduction with adaptive EV charging stations», в *2012 IEEE International Electric Vehicle Conference*, Greenville, SC, USA: IEEE, Бер 2012, с. 1–6. doi: 10.1109/IEVC.2012.6183277.

[54] V. Bertsch, W. Fichtner, V. Heuveline, i T. Leibfried, Ред., *Advances in Energy System Optimization: Proceedings of the first International Symposium on Energy System Optimization*. в Trends in Mathematics. Cham: Springer International Publishing, 2017. doi: 10.1007/978-3-319-51795-7.

[55] Francesco Marra, «Electric Vehicles Integration in the Electric Power System with Intermittent Energy Sources - The Charge/Discharge infrastructure», Technical University of Denmark (DTU), 2013.

[56] F. Marra, Guang Ya Yang, E. Larsen, C. N. Rasmussen, i Shi You, «Demand profile study of battery electric vehicle under different charging options», в *2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, San Diego, CA: IEEE, Лип 2012, с. 1–7. doi: 10.1109/PESGM.2012.6345063.

[57] Weixiang Shen, Thanh Tu Vo, i A. Kapoor, «Charging algorithms of lithium-ion batteries: An overview», в *2012 7th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*, Singapore, Singapore: IEEE, Лип 2012, с. 1567–1572. doi: 10.1109/ICIEA.2012.6360973.

- [58] M. Chen i G. A. Rincon-Mora, «Accurate electrical battery model capable of predicting runtime and I-V performance», *IEEE Trans. Energy Convers.*, вип. 21, вип. 2, с. 504–511, Чер 2006, doi: 10.1109/TEC.2006.874229.
- [59] InnoPOWER, «Battery Tech specifications. InnoPOWER-LFMP40AH Batteriezele». [Online]. Доступний у: <http://www.innower.de/de/produkte/akkus/43-innower-lfmp40ah>
- [60] A. Bosak, A. Bosak, L. Kulakovskiy, i T. Oboronov, «Impact of EV Chargers on Total Harmonic Distortion in the Distribution System Network», в *2019 IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems (ESS)*, Kyiv, Ukraine: IEEE, Квіт 2019, с. 329–333. doi: 10.1109/ESS.2019.8764244.
- [61] «Electromagnetic compatibility (EMC). – Geneva: IEC».
- [62] IEEE Power & Energy Society, *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT)*. Washington, DC, USA, 2014.
- [63] E. Akhavan-Rezai, M. F. Shaaban, E. F. El-Saadany, i F. Karray, «Online Intelligent Demand Management of Plug-In Electric Vehicles in Future Smart Parking Lots», *IEEE Syst. J.*, вип. 10, вип. 2, с. 483–494, Чер 2016, doi: 10.1109/JSYST.2014.2349357.
- [64] K. Qian, C. Zhou, M. Allan, i Y. Yuan, «Modeling of Load Demand Due to EV Battery Charging in Distribution Systems», *IEEE Trans. Power Syst.*, вип. 26, вип. 2, с. 802–810, Трав 2011, doi: 10.1109/TPWRS.2010.2057456.
- [65] Y. Bai, H. Zhuang, i D. Wang, Ред., *Advanced Fuzzy Logic Technologies in Industrial Applications*. в *Advances in Industrial Control*. London: Springer London, 2006. doi: 10.1007/978-1-84628-469-4.
- [66] «Electric Vehicle Database. Nissan Leaf 24 kWh. Battery Electric Vehicle». 2023. [Online]. Доступний у: <https://ev-database.uk/car/1019/Nissan-Leaf-24-kWh>
- [67] S. Howroyd i R. Thring, «An electric vehicle model and validation using a Nissan Leaf: A Python-based object-oriented programming approach», *Adv. Mech. Eng.*, вип. 10, вип. 7, с. 168781401878209, Лип 2018, doi: 10.1177/1687814018782099.

- [68] David Murray, «Used Nissan Leaf Buying Guide». 2015. [Online]. Доступний у: <https://insideevs.com/used-nissan-leaf-buying-guide/>
- [69] Oleksiy Kozlov, «Optimal Selection of Membership Functions Types for Fuzzy Control and Decision Making Systems», представлена на IntelITSIS'2021: 2nd International Workshop on Intelligent Information Technologies and Systems of Information Security, March 24–26, 2021, Khmelnytskyi, Ukraine, Petro Mohyla Black Sea National University.
- [70] F. O. Karray i C. W. De Silva, *Soft computing and intelligent systems design: theory, tools, and applications*. Harlow, England ; New York: Pearson/Addison Wesley, 2004.
- [71] YASNO, «3-зонний тариф, диференційований за періодами часу». 2023. [Online]. Доступний у: <https://yasno.com.ua/tarifni-koeficiyenti-dlya-bagatozonnih-elektrolichilnikov>
- [72] Mathworks, «Mathworks. Synchronous Machine». [Online]. Доступний у: Mathworks. Synchronous Machine
- [73] A. C. Menezes, A. Cripps, R. A. Buswell, J. Wright, i D. Bouchlaghem, «Estimating the energy consumption and power demand of small power equipment in office buildings», *Energy Build.*, вип. 75, с. 199–209, Чер 2014, doi: 10.1016/j.enbuild.2014.02.011.
- [74] L. Louis, «Working Principle of Arduino and Using it as a Tool for Study and Research», *Int. J. Control Autom. Commun. Syst.*, вип. 1, вип. 2, с. 21–29, Квіт 2016, doi: 10.5121/ijcacs.2016.1203.
- [75] S. Karthikeyan, R. A. Raj, M. V. Cruz, L. Chen, J. L. A. Vishal, i V. S. Rohith, «A Systematic Analysis on Raspberry Pi Prototyping: Uses, Challenges, Benefits, and Drawbacks», *IEEE Internet Things J.*, вип. 10, вип. 16, с. 14397–14417, Сер 2023, doi: 10.1109/IIOT.2023.3262942.
- [76] B. Deng, Z. Bo, Y. Jia, Z. Gao, i Z. Liu, «Research on STM32 Development Board Based on ARM Cortex-M3», в 2020 *IEEE 2nd International Conference on Civil*

*Aviation Safety and Information Technology (ICCASIT, Weihai, China: IEEE, Жов 2020, с. 266–272. doi: 10.1109/ICCASIT50869.2020.9368860.*

[77] *The Quintessential PIC® Microcontroller*. в Computer Communications and Networks. London: Springer-Verlag, 2005. doi: 10.1007/1-84628-202-0.

[78] D. Hercog, T. Lerher, M. Truntič, i O. Težak, «Design and Implementation of ESP32-Based IoT Devices», *Sensors*, вип. 23, вип. 15, с. 6739, Лип 2023, doi: 10.3390/s23156739.

[79] D. H. Summerville, *Embedded Systems Interfacing for Engineers using the Freescale HCS08 Microcontroller II: Digital and Analog Hardware Interfacing*. в Synthesis Lectures on Digital Circuits & Systems. Cham: Springer International Publishing, 2009. doi: 10.1007/978-3-031-79803-0.

[80] A. M. Ibrahim, *Fuzzy logic for embedded systems applications*. в Embedded technology series. Amsterdam ; Boston, Mass: Newnes, 2004.

[81] Mathworks, «Arduino Support from MATLAB and Simulink». [Online].  
Доступний у: <https://www.mathworks.com/hardware-support/arduino.html>

[82] MathWorks, «Simulink Support Package for Arduino Hardware». [Online].  
Доступний у: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/40312-simulink-support-package-for-arduino-hardware>

## **ДОДАТКИ**

## ДОДАТОК А

### Набір фазі-правил

1. If (Qrequired is LowQ) and (ParkT is VS) and (Crate is Lrate) then (Priority is HP)  
(0.6)
2. If (Qrequired is LowQ) and (ParkT is S) and (Crate is Lrate) then (Priority is MP) (0.9)
3. If (Qrequired is LowQ) and (ParkT is M) and (Crate is Lrate) then (Priority is MP)  
(0.5)
4. If (Qrequired is LowQ) and (ParkT is L) and (Crate is Lrate) then (Priority is MP)  
(0.6)
5. If (Qrequired is MedQ) and (ParkT is VS) and (Crate is Lrate) then (Priority is VHP)  
(0.5)
6. If (Qrequired is MedQ) and (ParkT is S) and (Crate is Lrate) then (Priority is HP) (0.8)
7. If (Qrequired is MedQ) and (ParkT is M) and (Crate is Lrate) then (Priority is HP)  
(0.6)
8. If (Qrequired is MedQ) and (ParkT is L) and (Crate is Lrate) then (Priority is MP)  
(0.5)
9. If (Qrequired is MedQ) and (ParkT is VL) and (Crate is Lrate) then (Priority is LP)  
(0.7)
10. If (Qrequired is HighQ) and (ParkT is VS) and (Crate is Lrate) then (Priority is VHP)  
(1)
11. If (Qrequired is HighQ) and (ParkT is S) and (Crate is Lrate) then (Priority is VHP)  
(0.8)
12. If (Qrequired is HighQ) and (ParkT is M) and (Crate is Lrate) then (Priority is HP)  
(0.8)
13. If (Qrequired is HighQ) and (ParkT is L) and (Crate is Lrate) then (Priority is MP)  
(0.9)
14. If (Qrequired is HighQ) and (ParkT is VL) and (Crate is Lrate) then (Priority is MP)  
(0.7)

15. If (Qrequired is LowQ) and (ParkT is VS) and (Crate is Hrate) then (Priority is HP)  
(0.5)
16. If (Qrequired is LowQ) and (ParkT is S) and (Crate is Hrate) then (Priority is HP) (1)
17. If (Qrequired is LowQ) and (ParkT is M) and (Crate is Hrate) then (Priority is MP)  
(0.9)
18. If (Qrequired is LowQ) and (ParkT is L) and (Crate is Hrate) then (Priority is MP)  
(0.7)
19. If (Qrequired is LowQ) and (ParkT is VL) and (Crate is Hrate) then (Priority is VLP)  
(0.5)
20. If (Qrequired is MedQ) and (ParkT is VS) and (Crate is Hrate) then (Priority is VHP)  
(0.4)
21. If (Qrequired is MedQ) and (ParkT is S) and (Crate is Hrate) then (Priority is HP) (1)
22. If (Qrequired is MedQ) and (ParkT is M) and (Crate is Hrate) then (Priority is HP)  
(0.7)
23. If (Qrequired is MedQ) and (ParkT is L) and (Crate is Hrate) then (Priority is MP)  
(0.6)
24. If (Qrequired is MedQ) and (ParkT is VL) and (Crate is Hrate) then (Priority is LP)  
(0.5)
25. If (Qrequired is HighQ) and (ParkT is VS) and (Crate is Hrate) then (Priority is VHP)  
(0.9)
26. If (Qrequired is HighQ) and (ParkT is S) and (Crate is Hrate) then (Priority is VHP)  
(0.7)
27. If (Qrequired is HighQ) and (ParkT is M) and (Crate is Hrate) then (Priority is HP)  
(0.9)
28. If (Qrequired is HighQ) and (ParkT is L) and (Crate is Hrate) then (Priority is MP)  
(1)
29. If (Qrequired is HighQ) and (ParkT is VL) and (Crate is Hrate) then (Priority is HP)  
(0.6)

30. If (Qrequired is LowQ) and (ParkT is VL) and (Crate is Lrate) then (Priority is VLP)  
(0.5)
31. If (Qrequired is VLowQ) and (ParkT is VS) and (Crate is Lrate) then (Priority is MP)  
(0.9)
32. If (Qrequired is VLowQ) and (ParkT is S) and (Crate is Lrate) then (Priority is MP)  
(0.7)
33. If (Qrequired is VLowQ) and (ParkT is M) and (Crate is Lrate) then (Priority is LP)  
(0.4)
34. If (Qrequired is VLowQ) and (ParkT is L) and (Crate is Lrate) then (Priority is VLP)  
(0.5)
35. If (Qrequired is VLowQ) and (ParkT is VL) and (Crate is Lrate) then (Priority is VLP) (0.3)
36. If (Qrequired is VLowQ) and (ParkT is VS) and (Crate is Hrate) then (Priority is MP)  
(0.9)
37. If (Qrequired is VLowQ) and (ParkT is S) and (Crate is Hrate) then (Priority is MP)  
(0.6)
38. If (Qrequired is VLowQ) and (ParkT is M) and (Crate is Hrate) then (Priority is LP)  
(0.7)
39. If (Qrequired is VLowQ) and (ParkT is L) and (Crate is Hrate) then (Priority is VLP)  
(0.6)
40. If (Qrequired is VLowQ) and (ParkT is VL) and (Crate is Hrate) then (Priority is VLP) (0.4)



## ДОДАТОК Б

У цьому додатку приведено скрипти, створені в Matlab для управління та контролю над процесами заряджання на ЕЗС.

Фрагмент моделювання підключення електромобілів до вільного зарядного слоту:

```
timepl=timenow(length(timenow)); %detecting time of plugging in
the model
en=pltime(timepl); %number of EVs that have to plug at this
moment

if pltime(timepl)> 0 %if there are EVs that are plugging
    i=1;
    while en>0
        if plug(i) == 0 %if charging spot is available
            SOCin(i)=EVs(s,1);
            SOCreq(i)=EVs(s,2);
            tpark(i)=EVs(s,3);
            Crate(i)=EVs(s,4);

            CS(i,1)=(SOCreq(i)-SOCin(i))*Qb/100; %Qreq for i EV
in kWh
            CS(i,2)=tpark(i); %ParkT for i EV.
            Schargeev(i)=(SOCs(SOCin(i),1))/(Crate(i));%Scharge
for EV in W
            CS(i,3)=Schargeev(i)/1000; %Crate (Scharge in kW)
for i EV.
            plug(i) = 1; %charging spot is busy
            timeEV(i,1)=timepl; %initial in model
            timeEV(i,2)=tpark(i)/10+timepl;% final considering
to model
            timeEV(i,3)=tpark(i);
            en=en-1;
            i=i+1;
            if i>n %if there are no available spots
                en=0;
                i=i-1;
            end
        else
            i=i+1;
            if i>n
```

```

        en=0;
        i=i-1;
    end
end
end
end
end

```

Скрипт розрахунку параметрів зарядки до моменту прийняття рішення про зарядку/утримання електромобіля:

```

for g=1:n
    % dont changed after decision
    timeEV(g,3)=timeEV(g,3)-10; %next time step
    if timeEV(g,3)<=0
        timeEV(g,3)=0 ;
    end
    %
    CS2(g,2)=(timeEV(g,3))*plug(g); % t park
    %calculating required capacity Q and Charging rate
    if SOCin(g)>0
        CS2(g,1)=(SOCreq(g)-SOCin(g))*Qb/100)*plug(g);
    %required capacity Q kWh
        Schargeev2(g)=(SOCs(SOCin(g),1))/(Crate(g))*plug(g);
    %S Charging rate
        u(g)=Qb-(Schargeev2(g))/6000)*effi;
        SOCin2(g)= round(SOCin(g)+(100*(1-(u(g))/Qb))*plug(g);
    %calc SOC (6 because of 10mins intervals; 1000 in kWh)
        CS2(g,3)=(Schargeev2(g)/1000)*plug(g);
    end
end

Schargeall2(1:144)=sum(Schargeev2); %EVs' charging load for
each 10mins interval

```

Щодо кроку реалізації нечіткої експертної системи, було прийнято рішення виклику фазі-логіки скриптом, так як моделювання займало 86400 секунд, що призвело би до надто довгих обчислень, якби використовувався Fuzzy block в Matlab Simulink. Скрипт:

```

WCC=evalfis(CS2,fiss);

for f=1:n

```

```

%if one of inputs =0
if WCC(f)== 0.5000
    WCC(f)=0;
end
%preventing equal WCC
if WCC(f)>0
    a=length(find(WCC == WCC(f)));
    if a>1 %if there are other WCC with the same value
        findminT=min(timeEV((find(WCC == WCC(f))),1)); %min
initial time of the same coeff
        if timeEV(f,1) == findminT
            WCC(f)=WCC(f)+z;
            z=z+0.0000000001;
        end
    end
end
end
end

```

Скрипт прийняття вибору максимальних *ВІЗ* відповідного електромобіля та прийняття рішень про заряджання/утримання:

```

%if Electricity price more than limit for charger owner
if EP(timenow(length(timenow))) > 1.1
    Plim=0.8*Plim;
end

%limit of overall demand
Plim=24000; %Charger power limit
Plimgrid=-(Sresid(1))*0.8;
Plimg=160000; %rewriting
if Schargeall2(1)+ Sload(length(Sload))> Plimgrid
    Plimg=Plimgrid - Sload(length(Sload));
end

%setting flag to the type of overdemand (reducing power limit
of CS)
if Plimg<Plim
    Plim=Plimg;
end

for L=1:n
    %Constarints: Vmin<Vcharge<Vmax; Pcharge<Pavailable

```

```

while Vcharge(length(Vcharge))> 200 &&
Vcharge(length(Vcharge)) < 250 && sum(Sc)< Plim && sum(Sc)<
Plimg
    nextmax = max(WCCo);
    if nextmax ==0
        break
    end
    Sc(WCCo == nextmax)= Schargeev2(WCCo == nextmax);
    if sum(Sc)< Plim
        charge(WCCo == nextmax) = 1;
        WCCo = WCCo - (WCCo == nextmax);
        overP=0; %flag of high demand
    else
        overP=1; %flag of high demand
        charge(WCCo == nextmax) = 0;
    end
end
end
end

```

Скрипт розрахунку параметрів зарядки після моменту прийняття рішення та оптимізації:

```

for g=1:n
    CS(g,2)= CS2(g,2);
    if charge(g) == 1 %decision to charge or to hold
        SOCin(g)= SOCin2(g);% SOCin
        if SOCin(g)>= SOCreq(g) %if charged to require
            p=0; %variable for setting Qreq and Schar to zero
        if EV is charged
            SOCin(g)=SOCin(g) - (SOCin(g)-SOCreq(g)); %minus of
overcharged soc
        else
            p=1; %variable if EV is not charged
        end
        CS(g,1)= CS2(g,1)*p; %required capacity Q
        CS(g,3)= CS2(g,3)*p; %S Charging rate
        Schargeev(g)= Sc(g)*p; %S Charging rate
    end
    %if parking time is ended
    if timeEV(g,3)==0
        plug(g) = 0;
        SOCin(g)=0;
        SOCreq(g)=0;
    end
end

```

```

    tpark(g)=0;
    CS(g,1)=0; %Qreq for i EV in kWh
    CS(g,2)=0; %ParkT for i EV.
    CS(g,3)=0; %Crate (Scharge in kW) for i EV.
    timeEV(g,1)=0; %initial in model
    timeEV(g,2)=0;% final considering to model
end
end
Schargeev=Schargeev.*charge; %only available charging spots are
charging
%condition if demand is high
if overP==1
    if Plim>0
        o=WCCo == nextmax;
        if sum(o)~=n
            Pfree=Plim-sum(Schargeev); %calculating free to
charge Power for sum(Sc)>Plim
            Schargeev(o)=Pfree; %Reaminer of available energy
            u(o)=Qb-((Schargeev(o))/6000)*effi;
            SOCin(o)= round(SOCin(o)+(100*(1-
(u(o))/Qb)))*plug(o);
            if SOCin(o)>= SOCreq(o) %if charged to require
                p=0; %variable for setting Qreq and Schar to
zero if EV is charged
                SOCin(o)=SOCin(o)-(SOCin(o)-SOCreq(o)); %minus
of overcharged soc
            else
                p=1; %variable if EV is not charged
            end
        end
    end
end
end
%
Schargeall(1:144)=sum(Schargeev); %EVs' charging load for each
10mins interval

```

## ДОДАТОК В

Код нечіткої логіки на C++, що був завантажений на плату Arduino.

```
//*****
//      FuzzyExpSysFinal.fis
//
//
//*****
#define FIS_TYPE float
#define FIS_RESOLUTION 101
#define FIS_MIN -3.4028235E+38
#define FIS_MAX 3.4028235E+38
typedef FIS_TYPE(*_FIS_MF)(FIS_TYPE, FIS_TYPE*);
typedef FIS_TYPE(*_FIS_ARR_OP)(FIS_TYPE, FIS_TYPE);
typedef FIS_TYPE(*_FIS_ARR)(FIS_TYPE*, int, _FIS_ARR_OP);

// Number of inputs to the fuzzy inference system
const int fis_gcI = 3;
// Number of outputs to the fuzzy inference system
const int fis_gcO = 1;
// Number of rules to the fuzzy inference system
const int fis_gcR = 40;

FIS_TYPE g_fisInput[fis_gcI];
FIS_TYPE g_fisOutput[fis_gcO];

// Setup routine runs once when you press reset:
void setup()
{
    //Output to Serial Monitor
    Serial.begin(9600);

    // initialize the Analog pins for input.
    // Pin mode for Input: Wrequired
    //pinMode(0 , INPUT);
    // Pin mode for Input: tparking
    //pinMode(1 , INPUT);
    // Pin mode for Input: Scharge
    //pinMode(2 , INPUT);

    // initialize the Analog pins for output.
    // Pin mode for Output: Priority
    //pinMode(3 , OUTPUT);
```

```

}

// Loop routine runs over and over again forever:
void loop()
{
    // Read Input: Wrequired
    g_fisInput[0] = 12;//analogRead(0);
    // Read Input: tparking
    g_fisInput[1] = 100;//analogRead(1);
    // Read Input: Scharge
    g_fisInput[2] = 7;//analogRead(2);

    //g_fisOutput[0] = 0;

    fis_evaluate();

    //Output to Serial Monitor
    Serial.println(g_fisOutput[0]);
    // Set output vlaue: Priority
    //analogWrite(3 , g_fisOutput[0]);
}

//*****
// Support functions for Fuzzy Inference System
//*****
// Trapezoidal Member Function
FIS_TYPE fis_trapmf(FIS_TYPE x, FIS_TYPE* p)
{
    FIS_TYPE a = p[0], b = p[1], c = p[2], d = p[3];
    FIS_TYPE t1 = ((x <= c) ? 1 : ((d < x) ? 0 : ((c != d) ? ((d - x) / (d - c)) : 0)));
    FIS_TYPE t2 = ((b <= x) ? 1 : ((x < a) ? 0 : ((a != b) ? ((x - a) / (b - a)) : 0)));
    return (FIS_TYPE) min(t1, t2);
}

// Triangular Member Function
FIS_TYPE fis_trimf(FIS_TYPE x, FIS_TYPE* p)
{
    FIS_TYPE a = p[0], b = p[1], c = p[2];
    FIS_TYPE t1 = (x - a) / (b - a);
    FIS_TYPE t2 = (c - x) / (c - b);
    if ((a == b) && (b == c)) return (FIS_TYPE) (x == a);
    if (a == b) return (FIS_TYPE) (t2*(b <= x)*(x <= c));

```

```

        if (b == c) return (FIS_TYPE) (t1*(a <= x)*(x <= b));
        t1 = min(t1, t2);
        return (FIS_TYPE) max(t1, 0);
    }

FIS_TYPE fis_min(FIS_TYPE a, FIS_TYPE b)
{
    return min(a, b);
}

FIS_TYPE fis_max(FIS_TYPE a, FIS_TYPE b)
{
    return max(a, b);
}

FIS_TYPE fis_array_operation(FIS_TYPE *array, int size, _FIS_ARR_OP pfnOp)
{
    int i;
    FIS_TYPE ret = 0;

    if (size == 0) return ret;
    if (size == 1) return array[0];

    ret = array[0];
    for (i = 1; i < size; i++)
    {
        ret = (*pfnOp)(ret, array[i]);
    }

    return ret;
}

//*****
// Data for Fuzzy Inference System
//*****
// Pointers to the implementations of member functions
_FIS_MF fis_gMF[] =
{
    fis_trapmf, fis_trimf
};

// Count of member function for each Input
int fis_gIMFCount[] = { 4, 5, 2 };

// Count of member function for each Output

```



```

int fis_gOMFCount[] = { 5 };

// Coefficients for the Input Member Functions
FIS_TYPE fis_gMFI0Coeff1[] = { 3, 5, 7.5, 10 };
FIS_TYPE fis_gMFI0Coeff2[] = { 7.5, 10, 13, 16 };
FIS_TYPE fis_gMFI0Coeff3[] = { 13, 16, 22, 22 };
FIS_TYPE fis_gMFI0Coeff4[] = { 0, 0, 3, 5 };
FIS_TYPE* fis_gMFI0Coeff[] = { fis_gMFI0Coeff1, fis_gMFI0Coeff2,
fis_gMFI0Coeff3, fis_gMFI0Coeff4 };
FIS_TYPE fis_gMFI1Coeff1[] = { 0, 0, 75, 122 };
FIS_TYPE fis_gMFI1Coeff2[] = { 60, 122, 180, 240 };
FIS_TYPE fis_gMFI1Coeff3[] = { 180, 240, 300, 360 };
FIS_TYPE fis_gMFI1Coeff4[] = { 300, 360, 420, 480 };
FIS_TYPE fis_gMFI1Coeff5[] = { 420, 460, 540, 540 };
FIS_TYPE* fis_gMFI1Coeff[] = { fis_gMFI1Coeff1, fis_gMFI1Coeff2,
fis_gMFI1Coeff3, fis_gMFI1Coeff4, fis_gMFI1Coeff5 };
FIS_TYPE fis_gMFI2Coeff1[] = { 0.45, 2.9, 3.6, 4.4 };
FIS_TYPE fis_gMFI2Coeff2[] = { 3.5, 6.5, 7.2, 7.4 };
FIS_TYPE* fis_gMFI2Coeff[] = { fis_gMFI2Coeff1, fis_gMFI2Coeff2 };
FIS_TYPE** fis_gMFICoeff[] = { fis_gMFI0Coeff, fis_gMFI1Coeff,
fis_gMFI2Coeff };

// Coefficients for the Output Member Functions
FIS_TYPE fis_gMFO0Coeff1[] = { 0.1, 0.25, 0.5 };
FIS_TYPE fis_gMFO0Coeff2[] = { 0.25, 0.5, 0.75 };
FIS_TYPE fis_gMFO0Coeff3[] = { 0.5, 0.75, 0.9 };
FIS_TYPE fis_gMFO0Coeff4[] = { 0.75, 1, 1 };
FIS_TYPE fis_gMFO0Coeff5[] = { 0, 0, 0.25 };
FIS_TYPE* fis_gMFO0Coeff[] = { fis_gMFO0Coeff1, fis_gMFO0Coeff2,
fis_gMFO0Coeff3, fis_gMFO0Coeff4, fis_gMFO0Coeff5 };
FIS_TYPE** fis_gMFOCoeff[] = { fis_gMFO0Coeff };

// Input membership function set
int fis_gMFI0[] = { 0, 0, 0, 0 };
int fis_gMFI1[] = { 0, 0, 0, 0, 0 };
int fis_gMFI2[] = { 0, 0 };
int* fis_gMFI[] = { fis_gMFI0, fis_gMFI1, fis_gMFI2};

// Output membership function set
int fis_gMFO0[] = { 1, 1, 1, 1, 1 };
int* fis_gMFO[] = { fis_gMFO0};

// Rule Weights
FIS_TYPE fis_gRWeight[] = { 0.6, 0.9, 0.5, 0.6, 0.5, 0.8, 0.6, 0.5, 0.7, 1,
0.8, 0.8, 0.9, 0.7, 0.5, 1, 0.9, 0.7, 0.5, 0.4, 1, 0.7, 0.6, 0.5, 0.9, 0.7,
0.9, 1, 0.6, 0.5, 0.9, 0.7, 0.4, 0.5, 0.3, 0.9, 0.6, 0.7, 0.6, 0.4 };

```

```

// Rule Type
int fis_gRType[] = { 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1,
1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1 };

// Rule Inputs
int fis_gRI0[] = { 1, 1, 1 };
int fis_gRI1[] = { 1, 2, 1 };
int fis_gRI2[] = { 1, 3, 1 };
int fis_gRI3[] = { 1, 4, 1 };
int fis_gRI4[] = { 2, 1, 1 };
int fis_gRI5[] = { 2, 2, 1 };
int fis_gRI6[] = { 2, 3, 1 };
int fis_gRI7[] = { 2, 4, 1 };
int fis_gRI8[] = { 2, 5, 1 };
int fis_gRI9[] = { 3, 1, 1 };
int fis_gRI10[] = { 3, 2, 1 };
int fis_gRI11[] = { 3, 3, 1 };
int fis_gRI12[] = { 3, 4, 1 };
int fis_gRI13[] = { 3, 5, 1 };
int fis_gRI14[] = { 1, 1, 2 };
int fis_gRI15[] = { 1, 2, 2 };
int fis_gRI16[] = { 1, 3, 2 };
int fis_gRI17[] = { 1, 4, 2 };
int fis_gRI18[] = { 1, 5, 2 };
int fis_gRI19[] = { 2, 1, 2 };
int fis_gRI20[] = { 2, 2, 2 };
int fis_gRI21[] = { 2, 3, 2 };
int fis_gRI22[] = { 2, 4, 2 };
int fis_gRI23[] = { 2, 5, 2 };
int fis_gRI24[] = { 3, 1, 2 };
int fis_gRI25[] = { 3, 2, 2 };
int fis_gRI26[] = { 3, 3, 2 };
int fis_gRI27[] = { 3, 4, 2 };
int fis_gRI28[] = { 3, 5, 2 };
int fis_gRI29[] = { 1, 5, 1 };
int fis_gRI30[] = { 4, 1, 1 };
int fis_gRI31[] = { 4, 2, 1 };
int fis_gRI32[] = { 4, 3, 1 };
int fis_gRI33[] = { 4, 4, 1 };
int fis_gRI34[] = { 4, 5, 1 };
int fis_gRI35[] = { 4, 1, 2 };
int fis_gRI36[] = { 4, 2, 2 };
int fis_gRI37[] = { 4, 3, 2 };
int fis_gRI38[] = { 4, 4, 2 };

```

```

int fis_gRI39[] = { 4, 5, 2 };
int* fis_gRI[] = { fis_gRI0, fis_gRI1, fis_gRI2, fis_gRI3, fis_gRI4,
fis_gRI5, fis_gRI6, fis_gRI7, fis_gRI8, fis_gRI9, fis_gRI10, fis_gRI11,
fis_gRI12, fis_gRI13, fis_gRI14, fis_gRI15, fis_gRI16, fis_gRI17,
fis_gRI18, fis_gRI19, fis_gRI20, fis_gRI21, fis_gRI22, fis_gRI23,
fis_gRI24, fis_gRI25, fis_gRI26, fis_gRI27, fis_gRI28, fis_gRI29,
fis_gRI30, fis_gRI31, fis_gRI32, fis_gRI33, fis_gRI34, fis_gRI35,
fis_gRI36, fis_gRI37, fis_gRI38, fis_gRI39 };

// Rule Outputs
int fis_gR00[] = { 3 };
int fis_gR01[] = { 2 };
int fis_gR02[] = { 2 };
int fis_gR03[] = { 2 };
int fis_gR04[] = { 4 };
int fis_gR05[] = { 3 };
int fis_gR06[] = { 3 };
int fis_gR07[] = { 2 };
int fis_gR08[] = { 1 };
int fis_gR09[] = { 4 };
int fis_gR010[] = { 4 };
int fis_gR011[] = { 3 };
int fis_gR012[] = { 2 };
int fis_gR013[] = { 2 };
int fis_gR014[] = { 3 };
int fis_gR015[] = { 3 };
int fis_gR016[] = { 2 };
int fis_gR017[] = { 2 };
int fis_gR018[] = { 5 };
int fis_gR019[] = { 4 };
int fis_gR020[] = { 3 };
int fis_gR021[] = { 3 };
int fis_gR022[] = { 2 };
int fis_gR023[] = { 1 };
int fis_gR024[] = { 4 };
int fis_gR025[] = { 4 };
int fis_gR026[] = { 3 };
int fis_gR027[] = { 2 };
int fis_gR028[] = { 3 };
int fis_gR029[] = { 5 };
int fis_gR030[] = { 2 };
int fis_gR031[] = { 2 };
int fis_gR032[] = { 1 };
int fis_gR033[] = { 5 };
int fis_gR034[] = { 5 };
int fis_gR035[] = { 2 };

```

```

int fis_gR036[] = { 2 };
int fis_gR037[] = { 1 };
int fis_gR038[] = { 5 };
int fis_gR039[] = { 5 };
int* fis_gR0[] = { fis_gR00, fis_gR01, fis_gR02, fis_gR03, fis_gR04,
fis_gR05, fis_gR06, fis_gR07, fis_gR08, fis_gR09, fis_gR010, fis_gR011,
fis_gR012, fis_gR013, fis_gR014, fis_gR015, fis_gR016, fis_gR017,
fis_gR018, fis_gR019, fis_gR020, fis_gR021, fis_gR022, fis_gR023,
fis_gR024, fis_gR025, fis_gR026, fis_gR027, fis_gR028, fis_gR029,
fis_gR030, fis_gR031, fis_gR032, fis_gR033, fis_gR034, fis_gR035,
fis_gR036, fis_gR037, fis_gR038, fis_gR039 };

// Input range Min
FIS_TYPE fis_gIMin[] = { 0, 0, 0.45 };

// Input range Max
FIS_TYPE fis_gIMax[] = { 22, 540, 7.4 };

// Output range Min
FIS_TYPE fis_gOMin[] = { 0 };

// Output range Max
FIS_TYPE fis_gOMax[] = { 1 };

//*****
// Data dependent support functions for Fuzzy Inference System
//*****
FIS_TYPE fis_MF_out(FIS_TYPE** fuzzyRuleSet, FIS_TYPE x, int o)
{
    FIS_TYPE mfOut;
    int r;

    for (r = 0; r < fis_gcR; ++r)
    {
        int index = fis_gR0[r][o];
        if (index > 0)
        {
            index = index - 1;
            mfOut = (fis_gMF[fis_gMFO[o][index]])(x,
fis_gMFOCoeff[o][index]);
        }
        else if (index < 0)
        {
            index = -index - 1;
            mfOut = 1 - (fis_gMF[fis_gMFO[o][index]])(x,
fis_gMFOCoeff[o][index]);
        }
    }
}

```

```

    }
    else
    {
        mfOut = 0;
    }

    fuzzyRuleSet[0][r] = fis_min(mfOut, fuzzyRuleSet[1][r]);
}
return fis_array_operation(fuzzyRuleSet[0], fis_gcR, fis_max);
}

FIS_TYPE fis_defuzz_centroid(FIS_TYPE** fuzzyRuleSet, int o)
{
    FIS_TYPE step = (fis_gOMax[o] - fis_gOMin[o]) / (FIS_RESOLUTION - 1);
    FIS_TYPE area = 0;
    FIS_TYPE momentum = 0;
    FIS_TYPE dist, slice;
    int i;

    // calculate the area under the curve formed by the MF outputs
    for (i = 0; i < FIS_RESOLUTION; ++i){
        dist = fis_gOMin[o] + (step * i);
        slice = step * fis_MF_out(fuzzyRuleSet, dist, o);
        area += slice;
        momentum += slice*dist;
    }

    return ((area == 0) ? ((fis_gOMax[o] + fis_gOMin[o]) / 2) : (momentum /
area));
}

//*****
// Fuzzy Inference System
//*****
void fis_evaluate()
{
    FIS_TYPE fuzzyInput0[] = { 0, 0, 0, 0 };
    FIS_TYPE fuzzyInput1[] = { 0, 0, 0, 0, 0 };
    FIS_TYPE fuzzyInput2[] = { 0, 0 };
    FIS_TYPE* fuzzyInput[fis_gcI] = { fuzzyInput0, fuzzyInput1,
fuzzyInput2, };
    FIS_TYPE fuzzyOutput0[] = { 0, 0, 0, 0, 0 };
    FIS_TYPE* fuzzyOutput[fis_gcO] = { fuzzyOutput0, };
    FIS_TYPE fuzzyRules[fis_gcR] = { 0 };
    FIS_TYPE fuzzyFires[fis_gcR] = { 0 };

```

```

FIS_TYPE* fuzzyRuleSet[] = { fuzzyRules, fuzzyFires };
FIS_TYPE sW = 0;

// Transforming input to fuzzy Input
int i, j, r, o;
for (i = 0; i < fis_gcI; ++i)
{
    for (j = 0; j < fis_gIMFCount[i]; ++j)
    {
        fuzzyInput[i][j] =
            (fis_gMF[fis_gMFI[i][j]])(g_fisInput[i],
fis_gMFIcoeff[i][j]);
    }
}

int index = 0;
for (r = 0; r < fis_gcR; ++r)
{
    if (fis_gRType[r] == 1)
    {
        fuzzyFires[r] = FIS_MAX;
        for (i = 0; i < fis_gcI; ++i)
        {
            index = fis_gRI[r][i];
            if (index > 0)
                fuzzyFires[r] = fis_min(fuzzyFires[r],
fuzzyInput[i][index - 1]);
            else if (index < 0)
                fuzzyFires[r] = fis_min(fuzzyFires[r], 1 -
fuzzyInput[i][-index - 1]);
            else
                fuzzyFires[r] = fis_min(fuzzyFires[r], 1);
        }
    }
    else
    {
        fuzzyFires[r] = FIS_MIN;
        for (i = 0; i < fis_gcI; ++i)
        {
            index = fis_gRI[r][i];
            if (index > 0)
                fuzzyFires[r] = fis_max(fuzzyFires[r],
fuzzyInput[i][index - 1]);
            else if (index < 0)

```

```

        fuzzyFires[r] = fis_max(fuzzyFires[r], 1 -
fuzzyInput[i][-index - 1]);
        else
            fuzzyFires[r] = fis_max(fuzzyFires[r], 0);
    }
}

fuzzyFires[r] = fis_gRWeight[r] * fuzzyFires[r];
sW += fuzzyFires[r];
}

if (sW == 0)
{
    for (o = 0; o < fis_gc0; ++o)
    {
        g_fisOutput[o] = ((fis_gOMax[o] + fis_gOMin[o]) / 2);
    }
}
else
{
    for (o = 0; o < fis_gc0; ++o)
    {
        g_fisOutput[o] = fis_defuzz_centroid(fuzzyRuleSet, o);
    }
}
}

//*****
//    END of FuzzyExpSysFinal.fis
//
//
//*****

void calculations_before_decision ()
{
    //Calculations before Fuzzy system and constraints

    SOCin2=zeros[1,n]; //subsidiary initial SOC vector
    Schargeev2=zeros[1,n]; //subsidiary Scharge for each EV
    CS2=zeros(n,3); //subsidiary matrix with Qreq, ParkTm, Crate for 5 EVs
    Schargeall2=zeros[144,1]; //subsidiary Scharge for ALL EVs (vector)
    for (g=1:n)
        // dont changed after decision
        timeEV(g,3)=timeEV(g,3)-10; //next time step
        if timeEV(g,3)<=0

```

```

        timeEV(g,3)=0 ;
    end

    CS2(g,2)=(timeEV(g,3))*plug(g); % t park
    //calculating required capacity Q and Charging rate
    if SOCin(g)>0
        CS2(g,1)=((SOCreq(g)-SOCin(g))*Qb/100)*plug(g); //required capacity
Q kWh
        Schargeev2(g)=((SOCs(SOCin(g),1))/(Crate(g)))*plug(g); //S Charging
rate
        u(g)=Qb-((Schargeev2(g))/6000)*effi;
        SOCin2(g)= round(SOCin(g)+(100*(1-(u(g))/Qb)))*plug(g); //calc SOC
(6 because of 10mins intervals; 1000 in kWh)
        CS2(g,3)=(Schargeev2(g)/1000)*plug(g);
    end
end

Schargeall2(1:144)=sum(Schargeev2); //EVs' charging load for each 10mins
interval
}

```



## ДОДАТОК Г

### ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з навчальної роботи  
«КПІ ім. Ігоря Сікорського»

\_\_\_\_\_ А. А. Мельниченко

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 р.

### АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи  
Босака Андрія Васильовича «Оптимізація керування зарядними станціями  
електромобілів в реальному часі на основі нечіткої логіки в умовах обмеженого  
електропостачання»

Комісія у складі:

Голова: завідувач кафедри автоматизації електротехнічних та  
мехатронних комплексів НН ІЕЕ,  
професор Бойченко С. В.

Члени комісії: професор кафедри автоматизації електротехнічних та  
мехатронних комплексів НН ІЕЕ,  
Розен В. П.  
доцент кафедри автоматизації електротехнічних та  
мехатронних комплексів НН ІЕЕ,  
Босак А. В.  
старший викладач кафедри автоматизації  
електротехнічних та мехатронних комплексів НН ІЕЕ  
Поліщук В. О.

цим Актом засвідчує, що результати дисертаційної роботи Босака Андрія Васильовича «Оптимізація керування зарядними станціями електромобілів в реальному часі на основі нечіткої логіки в умовах обмеженого електропостачання» впроваджено в освітній процес кафедри Автоматизації електротехнічних та мехатронних комплексів та використовуються в освітніх компонентах освітньо-професійних програмах підготовки бакалаврів та магістрів «Інжиніринг інтелектуальних електротехнічних та мехатронних комплексів» за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» а саме: дисципліна

«Інжиніринг електротехнічних та мехатронних комплексів», «Автоматизований електропривод машин і установок».

У навчальний процес було впроваджено:

- 1) оптимізаційну модель керування зарядними станціями в реальному часі, що відрізняється від існуючих моделей тим, що дозволяє забезпечити більше енергії поставки до батарей електромобілів за однакових обмежень споживання в місці підключення електрозарядних станцій;
- 2) моделювання процесу керованої зарядки із розробленим методом для роботи в реальному часі в умовах обмеженого електропостачання в середовищі Matlab;
- 3) експертну систему видачі пріоритетності заряджання на основі нечіткої логіки реалізовану на мікроконтролері на платі Arduino Mega 2560.

Упровадження отриманих під час наукової роботи результатів дисертаційної роботи Босака Андрія Васильовича «Оптимізація керування зарядними станціями електромобілів в реальному часі на основі нечіткої логіки в умовах обмеженого електропостачання» в навчальний процес підвищує якість підготовки студентів за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, так як відображає та пропонує підхід до вирішення актуальних завдань енергетики в Україні, особливо, у післявоєнний період.

#### **Голова комісії**

Д.Т.Н., професор

(науковий ступінь, вчене звання)

Сергій БОЙЧЕНКО

(підпис)

(прізвище та ініціали)

#### **Члени комісії**

Д.Т.Н., професор

(науковий ступінь, вчене звання)

Віктор РОЗЕН

(підпис)

(прізвище та ініціали)

К.Т.Н., доцент

(науковий ступінь, вчене звання)

Алла БОСАК

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Валентина ПОЛІЩУК

(науковий ступінь, вчене звання)

(підпис)

(прізвище та ініціали)