

Харківський національний автомобільно-дорожній університет
Міністерство освіти і науки України

Харківський національний автомобільно-дорожній університет
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

БАГАЧ РУСЛАН ВОЛОДИМИРОВИЧ

УДК 621.314

ДИСЕРТАЦІЯ

Підвищення ефективності експлуатації автомобільного електротранспорту
з використанням зарядних станцій постійного струму

274 Автомобільний транспорт

27 Транспорт

Подається на здобуття наукового ступеня доктор філософії

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

_____ Р. В. Багач

Науковий консультант Гнатов Андрій Вікторович, доктор технічних наук,
професор

Харків – 2024

АНОТАЦІЯ

Багач Р.В. Підвищення ефективності експлуатації автомобільного електротранспорту з використанням зарядних станцій постійного струму. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 274 – «Автомобільний транспорт». Харківський національний автомобільно-дорожній університет Міністерства освіти і науки України, 2024.

Дисертація присвячена підвищенню енергетичних показників зарядних станцій електромобілів з батареями літій-іонного типу. Розглянуто вимоги міжнародних стандартів щодо класифікації зарядних станцій за потужністю. Виділено і класифіковано чотири типи зарядних станцій, з яких перший тип – описує процес заряду електромобіля безпосередньо від однофазної мережі живлення; другий тип відрізняється від першого наявністю електричного захисту; третій тип – заряд електромобіля трифазною напругою змінного струму; четвертий тип – заряд постійним струмом та великою потужністю, що дозволяє швидше проводити процес заряду. Проаналізовано вимоги вітчизняних та міжнародних стандартів щодо електромагнітної сумісності, а саме норми емісії вищих гармонік струмів, спожитих зарядними станціями. Проведено огляд технічних характеристик акумуляторних батарей, особливості алгоритму їх заряджання, що висувають вимогу автоматичного регулювання вихідної напруги та вихідного струму зарядної станції. Представлено класифікацію електромобілів і проведено огляд технічних характеристик акумуляторних батарей та їх систем заряду. Найбільш перспективними є літій-іонні акумулятори. Вони мають такі переваги: високий ККД в процесі заряду-розряду та високу щільність електричної енергії (кВт·год/кг). Проведено аналіз схем напівпровідникових перетворювачів зарядних станцій, який показав, що питання покращення енергоефективності зарядних станцій електромобілів є актуальним.

Як перетворювач зарядної станції запропонована схема трифазного активного чотириквadrантного випрямляча. Перевагами даного перетворювача є можливість заряду батареї в режимі CC-CV (постійний струм-постійна напруга), можливість роботи з коефіцієнтом потужності близьким до одиниці ($PF \geq 0.99$), низький рівень емісії вищих гармонік ($THDI \leq 5\%$), можливість двонаправленої передачі електроенергії та можливість компенсації реактивної потужності та вищих гармонік в електричній мережі. В дисертації проведено дослідження електромагнітних процесів в зарядному перетворювачі та літій-іонній батареї електромобіля, питання побудови системи автоматичного регулювання процесів заряду та розряду батареї, аналіз запасу стійкості синтезованої системи автоматичного регулювання, питання аналізу втрат потужності в перетворювачі та шляхів зниження власних втрат потужності. Розглянута дворівнева та трирівнева топологія зарядного перетворювача.

Актуальність дисертаційної роботи визначається необхідністю вирішення науково-практичного завдання з удосконалення методів підвищення екологічності, енергоефективності, безпеки та зручності експлуатації зарядних станцій електромобілів з батареями літій-іонного типу.

Електрифікація автомобільного транспорту в даний час є одним з основних трендів розвитку світової автомобільної галузі. Розробці електромобілів та зарядних станцій приділяється значна увага дослідниками та виробниками. Майже всі міжнародні автомобільні корпорації (BMW, Opel, Mercedes, Tesla, Nissan) інвестують суттєві кошти в розвиток електромобілебудування. У 2015 р. частка електромобілів в світовому автопарку складала лише 0,1 %, але за прогнозами до 2030 р. становитиме близько 10 %, а до 2040 р. – близько 50 %. Це пов'язано з тим, що практично у всьому світі електроенергія на сьогодні є найдешевшим енергоресурсом. Так, наприклад, електромобілі Tesla на 100 км в середньому споживають 17 кВт·год, в той час, як «бензинові» автомобілі в середньому споживають 7 літрів палива на 100 км. В Україні на 2024 р. електроенергія коштує 2,64 грн за

1 кВт·год, а паливо в середньому – 54,4 грн. за літр. Крім того, значною перевагою електромобілів є вища екологічність та економічність експлуатації.

Одним з ключових елементів, що визначає перспективи розвитку електромобілів, є тенденція зниження вартості акумуляторних батарей. Саме від техніко-економічних параметрів акумуляторної батареї в найбільшій мірі залежить, з одного боку, потенційна дальність пересування електромобілів на одній зарядці, з іншого боку – різниця в ціні з традиційними автомобілями з ДВЗ. До недавнього часу значним недоліком електромобілів була висока вартість літій-іонних батарей. Проте існує тенденція зменшення вартості літій-іонних батарей [46]. Так за прогнозами на 2030 р. вартість 1 кВт·год в літій-іонному накопичувачі знизиться на 35% і буде коштувати 62 \$.

З ростом кількості електромобілів важливим питанням є створення енерго-ефективних зарядних станцій та систем зарядних станцій електромобілів, до яких пред'являються вимоги високого ККД, коефіцієнта потужності близького до одиниці, вимоги до показників електромагнітної сумісності та низького рівня емісії вищих гармонік, а також можливість реалізації режиму швидкого заряду електромобілів. В існуючих зарядних пристроях електромобілів виникає ряд технічних питань: великі втрати потужності, високий рівень емісії вищих гармонік до живлячої мережі та проблеми з реалізацією режиму швидкого заряду. Тому є актуальним питанням покращення показників енергоефективності зарядних станцій, а саме зниження втрат потужності, зниження рівня емісії вищих гармонічних спожитого струму, забезпечення високого коефіцієнта потужності зарядної станції, а також можливості працювати в режимі регульованого джерела струму та регульованого джерела напруги для забезпечення швидкого режиму заряду.

Вивченню питань, пов'язаних з якістю електричної енергії та енергоефективності зарядних станцій для електромобілів, присвячені роботи українських науковців: Кудря С.О., Павлов В.Б., Каплун В.В., Войтко С.В., Васько П.Ф., Лежнюк П.Д., Новський В.О., а також закордонні науковці: Лі Вонг (Li Wong), Ньян Лін Аунг (Nyan Linn Aung) групи науковців на чолі з Д. Расоломамбіона (D.

Rasolomampionona), Дж. Р. Чандра Моулі (G. R. Chandra Mouli). Крім того, ряд як вітчизняних, так і закордонних науковців займались вивченням питань виробництва водню для заправки електромобілів на паливних елементах за допомогою відновлюваних джерел енергії: Ткаленко Д.А., Солонін Ю.М., Максвелл А. Мур (Maxwell A. Moore), Мануелем Гьотцем (Manuel Götz), Ф. З. Аулі (F.Z.Aouali), Ф. Дж. Піно Луцена (F.J. Pino Lucena)

Для поліпшення електромагнітної сумісності системи зарядної станції для електромобілів з суміжними електроустановками та підвищення якості енергії живлення зарядної станції для електромобілів можливе використання систем пасивної фільтрації. Однак такі системи забезпечують тільки подавлення гармонік з частотами вище основної частоти перетворювального агрегату і не дозволяють якісно вирішити проблему подавлення низькочастотних неканонічних гармонік. Крім того системи пасивної фільтрації не дозволяють забезпечити коефіцієнт потужності близький до одиниці.

Таким чином, в дисертаційних дослідженнях було обрано напрямок вирішення проблеми підвищення енергоефективності системи зарядної станції електромобілів шляхом використання активних випрямлячів з режимами активної корекції коефіцієнта потужності.

Дисертаційна робота виконана на кафедрі автомобільної електроніки Харківського національного автомобільно-дорожнього університету. Робота виконана відповідно Закону України № 3715-VI від 08.09.2011р. «Про пріоритетні напрями інноваційної діяльності в Україні», Розпорядженню від 30.05.2018р. № 430-р м. Київ «Про схвалення національної транспортної стратегії України на період до 2030 р.» і є складовою частиною науково-дослідної роботи кафедри автомобільної електроніки. Наукові положення, розробки, висновки і рекомендації сформульовані в дисертації, використані при виконанні держбюджетної роботи Міністерства освіти і науки України «Розробка комбінованої енергетичної установки на базі пневмодвигуна з використанням поновлювальних джерел енергії для міського автотранспорту» (2021-2022 р. Номер державної реєстрації: 0121U109611).

Наукова новизна отриманих результатів полягає у наступному:

Вперше встановлено:

– запропоновано структуру зарядних станцій для електромобілів на базі дворівневого активного чотириквadrантного випрямляча, яка дозволяє реалізувати заряд літєвих батарей в режимі «постійний струм-постійна напруга» (CC-CV), що на відміну від існуючих аналогів дозволить підвищити показники ККД системи зарядної станції та забезпечити вимоги електромагнітної сумісності згідно міжнародних стандартів IEEE-519, IEC 61000-3-2, IEC 61000-4-3, а також двонаправлену передачу електричної енергії;

– розроблено аналітичний метод, що описує зарядно-розрядні характеристики літій-іонних тягових акумуляторних батарей для електромобілів, який на відміну від існуючих, враховує залежність напруги, струму та температури батареї від величини її розряду.

Удосконалено:

– метод синтезу регуляторів вихідного струму та вихідної напруги зарядної станції електромобілів з активними чотириквadrантними випрямлячами, що на відміну від існуючих дозволяє підвищити швидкодію регулювання вихідної напруги та струму.

Набув подальшого розвитку:

– аналітичний метод визначення інтегрального значення ККД процесу передачі електроенергії при заряді батареї способом CC-CV, що на відміну існуючих дозволяє визначити ККД циклу заряду.

Дисертаційна робота має практичне значення, оскільки результати проведених наукових досліджень можуть бути використанні при розробці нових та модернізації існуючих зарядних станцій електромобілів з метою підвищення якості електричної енергії та ККД. До таких результатів можна віднести розроблені електричні схеми, алгоритми систем керування, аналітичні співвідношення, що визначають втрати потужності в силових транзисторах перетворювача зарядної станції та комп'ютерні імітаційні моделі зарядних станцій.

Практична значимість підтверджується підприємствами в які було впроваджено результати дисертаційної роботи:

- у навчальний процес ХНАДУ при підготовці бакалаврів та магістрів за освітньо-професійними програмами «Електромобілі та автомобільна електроніка» та «Електромобілі та енергозберігаючі технології»
- у підприємстві «Elcars» з метою створення нових силових перетворювачів для зарядних станцій електромобілів з підвищенням ККД.
- у офіційного дилера Volkswagen у Харкові ТОВ «АВТОДОМ ХАРКІВ», що дозволить провести побудову зарядних станцій для електромобілів на базі дворівневого активного чотириквadrантного випрямляча. Це забезпечить дотримання вимог електромагнітної сумісності згідно міжнародних стандартів і двонаправлену передачу електричної енергії в зарядній станції.
- у ТОВ «АКУТЕК» при розробці джерела безперебійного живлення ІБП60К, що містить літій-іонні накопичувачі та має систему автоматичного заряду.

Ключові слова: зарядні станції для електромобілів, літій-іонні акумулятори, літій-залізо-фосфатні акумулятори, активний випрямляч, випрямляч джерела напруги, випрямлячі джерела струму, ефективність, якість електроенергії, коефіцієнт корисної дії, широтно-імпульсна модуляція.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Panchenko, A., Smyrnov, O., Nechaus, A., Trunova, I., Borysenko, A., Sokhin, P., & Bagach, R. (2021). Establishing patterns in the compatible electromagnetic and electromechanical transition processes when the starter is powered by a supercapacitor. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(5), 19–25. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.232423> (Scopus, Quartiles – Q2);
2. Гнатов, А. В., Аргун, Щ. В., Багач, Р. В., Гнатова, Г. А., Тарасова, В. В., & Ручка, О. О. (2021). Аналіз найбільш поширених методів визначення стійкості енергетичних систем. *Автомобіль і електроніка. Сучасні технології: електронне наукове спеціалізоване видання*, (20), 17–26. <https://doi.org/10.30977/VEIT.2021.20.0.02>;
3. Нерубацький, В. П., Плахтій, О. А., Гордієнко, Д. А., Філіп'єва, М. В., & Багач, Р. В. (2023). Підвищення точності моделювання перехідних процесів і розрахунку втрат потужності напівпровідникових перетворювачів у програмному середовищі NI Multisim. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*, (2), 22–35. <https://doi.org/10.18664/ikszt.v28i2.283312>;
4. Багач, Р. (2023). Дослідження акумуляторних блоків електромобілів та зарядних станцій на основі активного трифазного випрямляча струму. *Автомобіль і електроніка. Сучасні технології*, (24), 62–71. <https://doi.org/10.30977/VEIT.2023.24.0.2>;
5. Багач, Р. (2024). Підвищення електромагнітної сумісності і енергоефективності зарядної станції електромобілів. *Автомобіль і електроніка. Сучасні технології*, (25), 53–62. <https://doi.org/10.30977/VEIT.2024.25.0.6>;
6. Багач Р. (2024). Синтез математичної моделі зарядної станції для електромобілів. *Стале виробництво та споживання у ланцюгах створення вартості : монографія. За заг. ред. А. В. Павличенка та Л. Л. Палєхової*. Дрезден, 2024.(с. 205-238).

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

7. Hnatov, A., Arhun, S., Hnatova, H., Bagach, R., Patlins, A., & Zabasta, A. (2021). Implementation of the double degree master's program on the example of the Erasmus project CybPhys. *Proceedings of the 2021 IEEE 62nd International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University* (pp. 277-282). Riga, Latvia: Riga Technical University; Piscataway: IEEE. ISBN 978-1-6654-3805-6, e-ISBN 978-1-6654-3804-9. doi:10.1109/RTUON53541.2021.9711716;
8. Plakhtii, O., Prokhorova, V., Bagach, R., Zhuchenko, O., Yermilova, N., & Perets, K. (2023). Research of Accumulator Blocks of Electric Vehicles and Charging Station Based on Current Source Rectifier. *2023 IEEE 4th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)* (pp. 1-6). IEEE. doi:10.1109/KhPIWeek61412.2023.10312968;
9. Багач, Р.В. (2020). Загальні питання стосовно опалення електромобіля. *Автомобіль і електроніка. Сучасні технології* [Збірка матеріалів VII Міжнародної науково-технічної Інтернет-конференції] (23-24 листопада 2020 р., м. Харків) ХНАДУ, 2020. 36–38;
10. Hnatova, A., Bagach, R., & Sokhin, P. (2021). Economic and environmental impact of electric vehicles. *Proceedings of the Fourth International Scientific and Practical Conference "Automotive Transport and Infrastructure"* (pp. 215-217). Kyiv;
11. Bagach, R. V. (2021). Community safety issues of modern Electric Vehicles in Ukraine. *KhNAHU. Студентство. Наука. Іноземна мова: Збірник наукових праць студентів, аспірантів та молодих науковців* (Vol. 13, No. 2, pp. 125-128). Харків: ХНАДУ;
12. Багач, Р.В. (2021). Перспективи подальшого вдосконалення акумуляторних батарей для електромобілів. Міжнародна науково-практична конференція присвячена 90-річчю Харківського автомобільно-дорожнього університету та 90-річчю автомобільного факультету "Новітні технології в автомобілебудуванні, транспорті та при підготовці фахівців" (pp. 346-349). Харків: ХНАДУ;

13. Багач, Р.В., & Гнатов, А.В. (2022). Енергозбереження у секторі міського електротранспорту. *Тринадцята Міжнародна науково-практична конференція "Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування СЕУТТОО-2022"* (с. 105–108). Херсон: ХДМА;

14. Багач, Р.В., Улянець, О.А., Stella Hadjistassou, Irina Ciornei, & Lenos Hadjidemetriou. (2022). Сучасні технології мобільних зарядних станцій для електромобілів. *Збірка матеріалів VIII Міжнародної науково-технічної Інтернет-конференції* (с. 56–59). ХНАДУ. https://dl2022.khadi-kh.com/pluginfile.php/416773/mod_resource/content/1/%D0%97%D0%B1;

15. Багач, Р.В. (2023). Використання зарядних станцій для електромобілів у Харківській області. *Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування: 14-а Міжнародна науково-практична конференція* (с. 323–327). Херсон: Херсонська державна морська академія;

16. Багач, Р.В. (2023). Загальні проблеми енергетичного забезпечення робототехнічних пристроїв. *XIX міжнародна наукова конференція Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба "Новітні технології – для захисту повітряного простору": тези доповідей, 12–13 квітня 2023 року* (с. 527–528). Харків: ХНУПС ім. І. Кожедуба;

17. Багач, Р.В., & Кальченко, О.О. (2023). Перспективи та розвиток літійових акумуляторів в Україні. *Світові тенденції ресурсозбереження на електричному транспорті: матеріали Всеукр. наук.-практ. конф., Харків, 25–27 жовт. 2023 р.* (с. 31–34). Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова;

18. Багач, Р.В., Гнатов, А.В., & Аргун, І.В. (2024). Використання трифазних активних випрямлячів напруги з функцією рекуперації енергії. *Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування: 15-а Міжнародна науково-практична конференція, 13–15 березня 2024 р.* (с. 128–132). Херсон: Херсонська державна морська академія;

19. Bahach, R. (2024). Study of the efficiency of a charging station for electric vehicles using an active rectifier in a micro-grid system. *A. Pavlychenko & L.*

Paliekhova (Eds.), Sustainable production and consumption in industry: Challenges and opportunities. Collection of scientific articles (с. 126–133). Dresden.

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

20. Hnatov, A., Arhun, Shch., Bagach, R., Nechaus, A., Tarasova, V., Ruchka, O., Don, A., & Patlins, A. (2021). Electrical power unit of the transformer oil centrifugal cleaning unit. *Автомобільний транспорт*, 48, 101-112. <https://doi.org/10.30977/AT.2219-8342.2021.48.0.101>;

21. Mygal, V., Arhun, S., Hnatov, A., Bagach, R., & Kunicina, N. (2022, October). Methods for Diagnosing Vehicles by an Operator-Diagnostician. *2022 IEEE 63th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON)* (pp. 1-6). IEEE DOI:10.1109/RTUCON56726.2022.9978906;

22. Латвинський, В.Д., & Багач, Р.В. (2024). Аналіз технологій безпілотного електромобільного транспорту. *Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування: 15-а Міжнародна науково-практична конференція, 13–15 березня 2024 р.* (с. 256–260). Херсон: Херсонська державна морська академія.

ABSTRACT

Bahach R.V. Increasing the efficiency of operation of automobile electric transport with the use of direct current charging stations. – Qualifying scientific work on manuscript rights.

Dissertation for obtaining the scientific degree of Doctor of Philosophy in specialty 274 - "Automotive transport". Kharkiv National Automobile and Road University of the Ministry of Education and Science of Ukraine, 2024.

The dissertation is devoted to increasing the energy performance of charging stations for electric vehicles with lithium-ion type batteries. The requirements of international standards regarding the classification of charging stations by capacity are considered. Four types of charging stations are identified and classified, of which the first type describes the process of charging an electric car directly from a single-phase power supply network; the second type differs from the first by the presence of electrical protection; the third type – electric car charging with three-phase AC voltage; the fourth type is charging with constant current and high power, which allows for a faster charging process.

The requirements of domestic and international standards regarding electromagnetic compatibility, namely the norms of emission of higher harmonics of currents consumed by charging stations, were analyzed. A review of the technical characteristics of storage batteries, the peculiarities of their charging algorithm, which require automatic regulation of the output voltage and output current of the charging station, is carried out. The classification of electric vehicles is presented and the technical characteristics of accumulator batteries and their charging systems are reviewed. Lithium-ion batteries are the most promising. They have the following advantages: high efficiency in the charge-discharge process and high density of electrical energy (kWh/kg). An analysis of the circuits of semiconductor converters of charging stations was carried out, which showed that the issue of improving the energy efficiency of electric car charging stations is relevant.

A scheme of a three-phase active four-quadrant rectifier is proposed as a charging station converter. The advantages of this converter are the ability to charge the battery in the CC-CV (constant current-constant voltage) mode, the ability to work with a power factor close to unity ($PF \geq 0.99$), a low level of higher harmonic emission ($THDI \leq 5\%$), the possibility of bidirectional power transmission and the possibility of compensation of reactive power and higher harmonics in the electrical network. In the dissertation, a study of electromagnetic processes in the charging converter and lithium-ion battery of an electric vehicle, the issue of building a system for automatic regulation of battery charge and discharge processes, an analysis of the stability margin of the synthesized automatic regulation system, the issue of analyzing power losses in the converter and ways to reduce own power losses were conducted. The two-level and three-level topology of the charging converter is considered.

The relevance of the dissertation work is determined by the need to solve the scientific and practical task of improving methods of improving environmental friendliness, energy efficiency, safety and ease of operation of charging stations for electric vehicles with lithium-ion batteries.

Electrification of road transport is currently one of the main trends in the development of the global automotive industry. The development of electric vehicles and charging stations is given considerable attention by researchers and manufacturers. Almost all international automobile corporations (BMW, Opel, Mercedes, Tesla, Nissan) invest substantial funds in the development of electric vehicles. In 2015, the share of electric cars in the world fleet was only 0.1%, but according to forecasts, it will be about 10% by 2030, and about 50% by 2040. This is due to the fact that electricity is currently the cheapest energy resource in almost the entire world. So, for example, Tesla electric cars consume an average of 17 kWh per 100 km, while "gasoline" cars consume an average of 7 liters of fuel per 100 km. In Ukraine, in 2024, electricity costs UAH 2.64 per 1 kWh, and fuel costs UAH 54.4 per liter on average. In addition, a significant advantage of electric cars is higher environmental friendliness and economic operation. One of the key elements that determines the prospects for the development of electric

vehicles is the tendency to decrease the cost of rechargeable batteries. On the one hand, the potential range of electric cars on a single charge largely depends on the technical and economic parameters of the battery, and on the other hand, the difference in price with traditional cars with internal combustion engines. Until recently, a significant disadvantage of electric cars was the high cost of lithium-ion batteries. However, there is a tendency to decrease the cost of lithium-ion batteries. Thus, according to forecasts for 2030, the cost of 1 kWh in a lithium-ion battery will decrease by 35% and will cost \$62.

With the increase in the number of electric vehicles, an important issue is the creation of energy-efficient charging stations and charging station systems for electric vehicles, which require high efficiency, a power factor close to unity, requirements for electromagnetic compatibility indicators and a low level of emission of higher harmonics, as well as the possibility of implementing mode of fast charging of electric vehicles. A number of technical issues arise in existing charging devices for electric vehicles: large power losses, a high level of emission of higher harmonics to the power grid, and problems with the implementation of the fast-charging mode. Therefore, it is an urgent issue to improve the energy efficiency indicators of charging stations, namely, reducing power losses, reducing the emission level of higher harmonics of the consumed current, ensuring a high power factor of the charging station, as well as the ability to work in the mode of regulated current source and regulated voltage source to ensure fast charging mode.

The works of Ukrainian scientists: S.O. Kudrya, V.B. Pavlov, V.V. Kaplun, S.V. Voitko, P.F. Vasko are devoted to the study of issues related to the quality of electric energy and the energy efficiency of charging stations for electric vehicles. ., P.D. Lezhniuk, V.O. Novsky, as well as foreign scientists: Li Wong, Nyan Linn Ayng, a group of scientists headed by D. Rasolomampionona, J. R. Chandra Mouli (G. R. Chandra Mouli). In addition, a number of both domestic and foreign scientists were engaged in the study of hydrogen production for refueling electric vehicles using fuel cells using renewable energy sources: D.A. Tkalenko, Yu.M. Solonin, Maxwell A. Moore , Manuel Götz, F.Z. Aouali, F.J. Pino Lucena.

Passive filtering systems can be used to improve the electromagnetic compatibility of the charging station system for electric vehicles with adjacent electrical installations and to improve the quality of the power supply of the charging station for electric vehicles. However, such systems provide only suppression of harmonics with frequencies above the fundamental frequency of the converting unit and do not allow to qualitatively solve the problem of suppression of low-frequency non-canonical harmonics. In addition, passive filtering systems do not allow providing a power factor close to unity.

Thus, the direction of solving the problem of increasing the energy efficiency of the electric car charging station system by using active rectifiers with modes of active correction of the power factor was chosen in the dissertation research.

The dissertation work was completed at the Department of Automotive Electronics of the Kharkiv National Automobile and Road University. The work was performed in accordance with the Law of Ukraine No. 3715VI dated September 8, 2011. "On priority areas of innovative activity in Ukraine", Order dated May 30, 2018. No. 430 of the city of Kyiv "On the approval of the national transport strategy of Ukraine for the period until 2030." and is an integral part of the research work of the Department of Automotive Electronics. Scientific provisions, developments, conclusions and recommendations are formulated in the dissertation, used in the implementation of the state budget work of the Ministry of Education and Science of Ukraine "Development of a combined power plant based on a pneumatic engine using renewable energy sources for city vehicles" (2021-2022. State registration number: 0121U109611).

The scientific novelty of the obtained results is as follows:

For the first time is established:

- a structure of charging stations for electric vehicles based on a two-level active four-quadrant rectifier is proposed, which allows charging of lithium batteries in the "constant current-constant voltage" (CC-CV) mode, which, unlike existing analogues, will increase the efficiency of the charging station system and ensure electromagnetic

compatibility requirements according to international standards IEEE-519, IEC 61000-3-2, IEC 61000-4-3, as well as bidirectional transmission of electrical energy;

- an analytical method was developed that describes the charge-discharge characteristics of lithium-ion traction storage batteries for electric vehicles, which, unlike the existing ones, takes into account the dependence of the voltage, current and temperature of the battery on the amount of its discharge.

It's improved:

- a method of synthesis of output current and output voltage regulators of an electric vehicle charging station with active four-quadrant rectifiers, which, unlike the existing ones, allows to increase the speed of output voltage and current regulation.

It's acquired further development:

- an analytical method of determining the integral value of the efficiency of the electricity transmission process when charging the battery by the CC-CV method, which, unlike the existing ones, allows you to determine the efficiency of the charge cycle.

The dissertation is of practical importance, as the results of the conducted scientific research can be used in the development of new and modernization of existing charging stations for electric vehicles in order to improve the quality of electric energy and efficiency. These results include developed electrical circuits, algorithms of control systems, analytical relationships that determine power losses in the power transistors of the charging station converter, and computer simulation models of charging stations.

The practical significance is confirmed by the enterprises in which the results of the dissertation were implemented:

- in the educational process of the National Academy of Sciences in the preparation of bachelors and masters under the educational and professional programs "Electric vehicles and automotive electronics" and "Electric vehicles and energy-saving technologies"

- at the "Elcars" enterprise with the aim of creating new power converters for electric vehicle charging stations with increased efficiency.

– at the official Volkswagen dealer in Kharkiv, "AVTODOM KHARKIV" LLC, which will allow the construction of charging stations for electric vehicles based on a two-level active four-quadrant rectifier. This will ensure compliance with the requirements of electromagnetic compatibility according to international standards and bidirectional transmission of electrical energy in the charging station.

– at " ACUTEK " LLC during the development of an uninterruptible power supply source UPS60K, which contains lithium-ion accumulators and has an automatic charging system.

Keywords: charging stations for electric vehicles, lithium-ion batteries, lithium-iron-phosphate batteries, active rectifier, voltage source rectifier, current source rectifiers, efficiency, power quality, efficiency, pulse width modulation.

LIST OF THE PUBLICATIONS OF THE ACQUIRER

Scientific works in which the main scientific results of the dissertation are published:

1. Panchenko, A., Smyrnov, O., Nechaus, A., Trunova, I., Borysenko, A., Sokhin, P., & Bagach, R. (2021). Establishing patterns in the compatible electromagnetic and electromechanical transition processes when the starter is powered by a supercapacitor. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(5), 19–25. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.232423> (Scopus, Quartiles – Q2);

2. Hnatov, A. V., Argun, Sh. V., Bagach, R. V., Hnatova, G. A., Tarasova, V. V., & Ruchka, O. O. (2021). Analysis of the most common methods of determining the stability of energy systems. *Car and electronics. Modern technologies: electronic scientific specialized edition*, (20), 17–26. <https://doi.org/10.30977/VEIT.2021.20.0.02>;

3. Nerubatskyi, V. P., Plakhtiy, O. A., Gordienko, D. A., Filip'eva, M. V., & Bagach, R. V. (2023). Increasing the accuracy of simulation of transient processes and calculation of power losses of semiconductor converters in the NI Multisim software environment. *Information and control systems in railway transport*, (2), 22–35. <https://doi.org/10.18664/iksz.v28i2.283312>;

4. Bahach, R. (2023). Research of battery units of electric vehicles and charging stations based on an active three-phase rectifier. *Car and electronics. Modern technologies*, (24), 62–71. <https://doi.org/10.30977/VEIT.2023.24.0.2>;

5. Bahach, R. (2024). Increasing the electromagnetic compatibility and energy efficiency of the electric vehicle charging station. *Car and electronics. Modern technologies*, (25), 53–62. <https://doi.org/10.30977/VEIT.2024.25.0.6>;

6. Bahach, R. (2024). Synthesis of a mathematical model of a charging station for electric vehicles. A. V. Pavlychenko and L. L. Palekhova (Eds.), *Sustainable production and consumption in value chains: A monograph* (pp. 205-238). Dresden;

Scientific works certifying the approval of the dissertation materials:

7. Hnatov, A., Arhun, S., Hnatova, H., Bagach, R., Patlins, A., & Zabasta, A. (2021). Implementation of the double degree master's program on the example of the Erasmus project CybPhys. *Proceedings of the 2021 IEEE 62nd International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University* (pp. 277-282). Riga, Latvia: Riga Technical University; Piscataway: IEEE. ISBN 978-1-6654-3805-6, e-ISBN 978-1-6654-3804-9. doi:10.1109/RTUCON53541.2021.9711716;
8. Plakhtii, O., Prokhorova, V., Bagach, R., Zhuchenko, O., Yermilova, N., & Perets, K. (2023). Research of Accumulator Blocks of Electric Vehicles and Charging Station Based on Current Source Rectifier. *2023 IEEE 4th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)* (pp. 1-6). IEEE. doi:10.1109/KhPIWeek61412.2023.10312968;
9. Bagach, R.V. (2020). General questions about electric car heating. *Car and electronics. Modern technologies* [Collection of materials of the VII International Scientific and Technical Internet Conference] (November 23-24, 2020, Kharkiv) KHNADU, 2020. 36–38;
10. Hnatova, A., Bagach, R., & Sokhin, P. (2021). Economic and environmental impact of electric vehicles. *Proceedings of the Fourth International Scientific and Practical Conference "Automotive Transport and Infrastructure"* (pp. 215-217). Kyiv;
11. Bagach, R. V. (2021). Community safety issues of modern Electric Vehicles in Ukraine. *KhNAHU. Studentship. Science. Foreign language: Collection of scientific works of students, postgraduates and young scientists* (Vol. 13, No. 2, pp. 125-128). Kharkiv: Khnadu;
12. Bagach, R.V. (2021). Prospects for further improvement of batteries for electric vehicles. The international scientific and practical conference dedicated to the 90th anniversary of the Kharkiv Automobile and Road University and the 90th anniversary of the automotive faculty "The latest technologies in automobile construction, transport and in the training of specialists" (pp. 346-349). Kharkiv: Khnadu;

13. Bagach, R.V., & Hnatov, A.V. (2022). Energy conservation in the urban electric transport sector. *The Thirteenth International Scientific and Practical Conference "Modern energy installations on transport and technologies and equipment for their maintenance SEUTTOO-2022"* (p. 105–108). Kherson: KhDMA;

14. Bagach, R.V., Ulyanets, O.A., Stella Hadjistassou, Irina Ciornei, & Lenos Hadjidemetriou. (2022). Modern technologies of mobile charging stations for electric cars. *Proceedings of the VIII International Scientific and Technical Internet Conference* (pp. 56–59). I'm looking for https://dl2022.khadi-kh.com/pluginfile.php/416773/mod_resource/content/1/%D0%97%D0%B1;

15. Bahach, R.V. (2023). Use of charging stations for electric vehicles in the Kharkiv region. *Modern energy installations on transport and technologies and equipment for their maintenance: 14th International Scientific and Practical Conference* (pp. 323–327). Kherson: Kherson State Maritime Academy;

16. Bahach, R.V. (2023). General problems of power supply of robotic devices. *11th international scientific conference of the Kharkiv National University of the Air Force named after Ivan Kozhedub "New technologies - for the protection of air space": abstracts of reports, April 12-13, 2023* (p. 527-528). Kharkiv: KhNUPS named after I. Kozheduba;

17. Bahach, R.V., & Kalchenko, O.O. (2023). Prospects and development of lithium batteries in Ukraine. *World trends of resource conservation in electric transport: materials of the All-Ukrainian. science and practice conference, Kharkiv, October 25–27. 2023* (pp. 31–34). Kharkiv: XNUMX named after O. M. Beketov;

18. Bahach, R.V., Hnatov, A.V., & Argun, Sh.V. (2024). Use of three-phase active voltage rectifiers with energy recovery function. *Modern energy installations on transport and technologies and equipment for their maintenance: 15th International Scientific and Practical Conference, March 13–15, 2024* (pp. 128–132). Kherson: Kherson State Maritime Academy;

19. Bahach, R. (2024). Study of the efficiency of a charging station for electric vehicles using an active rectifier in a micro-grid system. *A. Pavlychenko & L. Paliekhova (Eds.), Sustainable production and consumption in industry: Challenges and opportunities. Collection of scientific articles* (p. 126–133). Dresden.

Scientific works that additionally reflect the scientific results of the dissertation:

20. Hnatov, A., Arhun, Shch., Bagach, R., Nechaus, A., Tarasova, V., Ruchka, O., Don, A., & Patlins, A. (2021). *Electrical power unit of the transformer oil centrifugal cleaning unit. Motor transport*, 48, 101-112. <https://doi.org/10.30977/AT.2219-8342.2021.48.0.101>;

21. Mygal, V., Arhun, S., Hnatov, A., Bagach, R., & Kunicina, N. (2022, October). Methods for Diagnosing Vehicles by an Operator-Diagnostician. *2022 IEEE 63rd International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON)* (pp. 1-6). IEEE;

22. Latvynskyi, V.D., & Bahach, R.V. (2024). Analysis of unmanned electric vehicle technologies. *Modern energy installations on transport and technologies and equipment for their maintenance: 15th International Scientific and Practical Conference, March 13–15, 2024* (pp. 256–260). Kherson: Kherson State Maritime Academy.

ЗМІСТ

Перелік умовних позначень	25
Вступ.....	26
Розділ 1 Аналіз існуючих топологій зарядних станцій і міжнародних стандартів до них	35
1.1 Постановка завдання розділу	35
1.2 Вимоги до режимів заряду та зарядних портів згідно міжнародних стандартів зарядних станцій для електромобілів.....	38
1.3 Основні вимоги вітчизняних та міжнародних стандартів до ЕМС перетворювачів для зарядних станцій електромобілів.....	45
1.3.1 Аналіз вимог вітчизняних стандартів до якості електроенергії.....	46
1.3.2 Аналіз вимог міжнародних стандартів до якості електроенергії	49
1.4 Аналіз техніко-економічних характеристик накопичувачів енергії в електромобілях	52
1.5 Огляд існуючих топологій зарядних станцій для електромобілів та аналіз їх параметрів	56
Висновки до розділу 1	62
Розділ 2 Синтез математичних моделей зарядної станції та акумуляторного відсіку електромобілів	63
2.1 Запропонована схема перетворювальної системи заряду для електромобілів	63
2.2 Математична модель трифазного активного випрямляча напруги з широтно-імпульсною модуляцією	66
2.3 Дослідження математичних моделей літій-іонних накопичувачів.....	81
2.4 Синтез математичної моделі зарядно-розрядних характеристик літій-іонної батареї NCR-18650b	92
2.5 Фізичний дослід з визначення зарядно-розрядної характеристики батареї NCR-18650b для визначення збіжності точно математичних моделей	93
2.6 Параметри блоку акумуляторного відсіку електромобіля Tesla S.....	98

Висновки до розділу 2	99
Розділ 3 Дослідження ковзаючого регулятора вихідного струму та вихідної напруги при застосуванні спостерегачів.....	101
3.1 Математична модель об'єкту керування	101
3.2 Структурна схема системи автоматичного керування на базі ковзного режиму.....	103
3.3 Комп'ютерне моделювання регулятора вихідної напруги трифазного активного випрямляча з системою автоматичного керування на базі ковзного режиму.....	113
Висновки до розділу 3	120
Розділ 4 Дослідження енергетичних характеристик запропонованих систем зарядної станції в комп'ютерному моделюванні.....	122
4.1.Інтегральний метод аналізу ККД повного процесу заряду електромобіля в зарядної станції із застосуванням активного випрямляча	122
4.2 Метод визначення енергії втрат в силових транзисторах перетворювача зарядної станції.....	129
4.3 Енергія втрат потужності в ключах активного випрямляча визначається шляхом комп'ютерного моделювання в програмі Matlab/Simulink.....	132
4.4 Комп'ютерне моделювання енергетичних процесів роботи зарядної станції.....	139
4.4.1 Структура моделі зарядної станції	139
4.4.2 Модель розраховувача втрат потужності в ключах активного випрямляча зарядної станції	142
4.4.3 Модель розраховувача коефіцієнта потужності	146
4.4.4 Модель розраховувача енергії втрат в системі ЗС для ЕМ.....	148
4.4.5 Модель батарейного відсіку.....	148
4.5 Результати комп'ютерного моделювання зарядної станції з дворівневим активним випрямлячем	149
4.6 Підвищення енергетичних показників зарядної станції електромобілів на базі трирівневого активного випрямляча.....	154

Висновки до розділу 4	155
Висновки	157
Перелік посилань.....	160
Додаток А Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дослідження	173
Додаток Б Акти впровадження	177

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

AB – активний випрямляч;
CC - CV постійний струм - постійна напруга;
ККД – коефіцієнт корисної дії;
ДВЗ – двигун внутрішнього згорання;
EV – електромобілі;
HEV – гібридний електричний транспортний засіб;
BEV – електромобіль з акумуляторною батареєю;
PHEV – двигун внутрішнього згорання та електродвигуном з батареєю;
EMC – електромагнітна сумісність;
IEC – міжнародна електротехнічна комісія;
SAE – товариство автомобільних інженерів;
CCS – роз’єми;
AC – змінний струм
DC – постійний струм;
TDD – загальне спотворення попиту;
PEV – електричний автомобіль підключений до мережі живлення;
FCHEV – гібридні електромобілі на паливних елементах;
ITP – індуктивний перетворювач потужності;
IGBT – транзистор;
V2G – двонаправлені зарядки;
ШИМ – широтно-імпульсна модуляція;
EPC – електрорушійна сила;
SOC – стан заряду;
ЗС – зарядні станції;
ЕМ – електромобілі;
THD – коефіцієнт нелінійних спотворень.

ВСТУП

Електрифікація автомобільного транспорту є головним трендом у розвитку автомобільної галузі. Дослідники та виробники акцентують увагу на розробці електромобілів та зарядних станцій. Майже всі великі автомобільні корпорації (BMW, Opel, Mercedes, Tesla, Nissan) вкладають суттєві кошти у розвиток електромобілебудування, через його прогресивність [30]. У 2015 році частка електромобілів в світовому автопарку складала лише 0,1 %, але за прогнозами до 2030 р. становитиме близько 10 %, а до 2040 р. – близько 50 % [1-4]. Це пов'язано з тим, що електроенергія на сьогодні є найдешевшим енергоресурсом у світі. Наприклад, електромобілі Tesla в середньому споживають 17 кВт·год на 100 км, у той час як "бензинові" автомобілі в середньому - 7 літрів палива на 100 км. Україна є однією з країн, де електроенергія дешевша за паливо: на 2024 рік електроенергія коштує 2,64 грн за 1 кВт·год, паливо - у середньому 54,4 грн за літр. Крім того, значною перевагою електромобілів є вища економічність та екологічність експлуатації, на відміну від автомобілів з ДВЗ [8].

Одним з ключових елементів, що визначає перспективи розвитку електромобілів, є тенденція зниження вартості акумуляторних батарей. Саме від техніко-економічних параметрів акумуляторної батареї в найбільшій мірі залежить, з одного боку, потенційна дальність пересування електромобілів на одній зарядці, з іншого боку – різниця в ціні з традиційними автомобілями з ДВЗ. До недавнього часу значним недоліком електромобілів була висока вартість літій-іонних батарей. Проте існує тенденція зменшення вартості літій-іонних батарей. Так за прогнозами на 2030 рік вартість 1 кВт·год в літій-іонному накопичувачі знизиться на 35% і буде коштувати 62 \$.

Актуальність теми. Разом з ростом кількості електромобілів виникає питання про створення енергоефективних зарядних станцій та систем зарядних станцій електромобілів, що вимагає високого ККД, коефіцієнта потужності близького до одиниці, високих стандартів електромагнітної сумісності та можливості

швидкого заряду. Тому актуальним є покращення показників енергоефективності зарядних станцій, зокрема зниження втрат потужності та емісії вищих гармонік, забезпечення високого коефіцієнта потужності та можливість працювати в режимі регульованого джерела струму та напруги для швидкого заряду.

Вивченню питань, пов'язаних з якістю електричної енергії та енергоефективності зарядних станцій для електромобілів, присвячені роботи українських науковців: Кудря С.О., Павлов В.Б., Каплун В.В., Войтко С.В., Васько П.Ф., Лежнюк П.Д., Новський В.О., а також закордонні науковці: Лі Вонг (Li Wong), Ньян Лін Аунг (Nyan Linn Aung) групи науковців на чолі з Д. Расоломмпіонона (D. Rasolomampionona), Дж. Р. Чандра Моулі (G. R. Chandra Mouli) та ін. Крім того, ряд як вітчизняних, так і закордонних науковців займались вивченням питань виробництва водню для заправки електромобілів на паливних елементах за допомогою відновлюваних джерел енергії: Ткаленко Д.А., Солонін Ю.М., Максвел А. Мур (Maxwell A. Moore), Мануелем Гьотцем (Manuel Götz), Ф. З. Аулі (F.Z.Aouali), Ф. Дж. Піно Луцена (F.J. Pino Lucena)

Для поліпшення електромагнітної сумісності системи зарядної станції для електромобілів з суміжними електроустановками та підвищення якості енергії живлення зарядної станції для електромобілів можливе використання систем пасивної фільтрації. Однак такі системи забезпечують тільки подавлення гармонік з частотами вище основної частоти перетворювального агрегату і не дозволяють якісно вирішити проблему подавлення низькочастотних неканонічних гармонік. Крім того системи пасивної фільтрації не дозволяють забезпечити коефіцієнт потужності близький до одиниці.

Таким чином, в дисертаційному дослідженні було обрано напрямок вирішення проблеми підвищення енергоефективності системи зарядної станції електромобілів шляхом використання активних випрямлячів з режимами активної корекції коефіцієнта потужності.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана на кафедрі автомобільної електроніки Харківського націона-

льного автомобільно-дорожнього університету. Робота виконана відповідно Закону України № 3715-VI від 08.09.2011р. «Про пріоритетні напрями інноваційної діяльності в Україні», Розпорядженню від 30.05.2018р. № 430-р м. Київ «Про схвалення національної транспортної стратегії України на період до 2030 р.» і є складовою частиною науково-дослідної роботи кафедри автомобільної електроніки. Наукові положення, розробки, висновки і рекомендації сформульовані в дисертації, використані при виконанні держбюджетної роботи Міністерства освіти і науки України «Розробка комбінованої енергетичної установки на базі пневмодвигуна з використанням поновлювальних джерел енергії для міського автотранспорту» (2021-2022 р. Номер державної реєстрації: 0121U109611).

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є розробка методів підвищення енергетичних показників зарядних станцій для електротранспорту шляхом використання активних випрямлячів з корекцією коефіцієнта потужності, що дозволяє покращити характеристики електромагнітної сумісності перетворювачів зарядних станцій електромобілів з мережею електроживлення.

Для досягнення поставленої мети по підвищенню ефективності системи зарядних станцій необхідно вирішити наступні завдання:

- проаналізувати недоліки та шляхи покращення існуючих топологій зарядних станцій електромобілів, а також провести аналіз вимог вітчизняних та міжнародних стандартів в області електромагнітної сумісності перетворювачів зарядних станцій електромобілів;

- розробити електричну схему та математичну модель зарядної станції електромобілів на базі трифазного активного випрямляча напруги з широтно-імпульсною модуляцією, а також розробити уточнюючу математичну модель, яка описує зарядно-розрядні характеристики літій-іонних накопичувачів з урахуванням струму заряду та температури. Отримані вирази підтвердити фізичним дослідом;

- виконати синтез регулятора вихідної напруги та вихідного струму активного випрямляча зарядної станції, що працює в ковзаючому режимі;

– виконати розробку комп'ютерної моделі запропонованої топології активного випрямляча зарядної станції та провести дослідження енергоефективності та показників електромагнітної сумісності.

Об'єкт дослідження. Електромагнітні та енергетичні процеси в перетворювальному агрегаті зарядної станції для електромобілів.

Предмет дослідження. Підвищення ефективності експлуатації автомобільного електротранспорту з використанням зарядних станцій постійного струму.

Методи дослідження. При вирішенні поставлених завдань використовувалися наступні методи: класичної теорії електричних кіл і методи гармонійного аналізу при дослідженні електромагнітних процесів в перетворювальному агрегаті, працюючому в симетричному та несиметричних режимах; теорія автоматичного регулювання; ррґ-теорією миттєвої потужності; елементи цифрової обробки сигналів; метод найменших квадратів в поліноміальній апроксимації енергетичних характеристик літій-іонних накопичувачів; імітаційне моделювання для дослідження ефективності роботи паралельних силових активних фільтрів та активних випрямлячів в середовищі MATLAB.

Наукова новизна отриманих результатів. Основні наукові результати, які виносяться на захист.

Вперше встановлено:

– запропоновано структуру зарядних станцій для електромобілів на базі дворівневого активного чотириквadrантного випрямляча, яка дозволяє реалізувати заряд літєвих батарей в режимі «постійний струм-постійна напруга» (CC-CV), що на відміну від існуючих аналогів дозволить підвищити показники ККД системи зарядної станції та забезпечити вимоги електромагнітної сумісності згідно міжнародних стандартів IEEE-519, IEC 61000-3-2, IEC 61000-4-3, і двонаправлену передачу електричної енергії;

– розроблено аналітичний метод, що описує зарядно-розрядні характеристики літій-іонних тягових акумуляторних батарей для електромобілів, який на ві-

дміну від існуючих, враховує залежність напруги, струму та температури батареї від величини її розряду.

Удосконалено:

- метод синтезу регуляторів вихідної та вихідної напруги зарядної станції електромобілів з активними чотириквADRантними випрямлячами, що на відміну від існуючих дозволяє підвищити швидкодію регулювання вихідної напруги та струму.

Набув подальшого розвитку:

- аналітичний метод визначення інтегрального значення ККД процесу передачі електроенергії при заряді батареї способом CC-CV, що на відміну існуючих дозволяє визначити ККД циклу заряду.

Практичне значення отриманих результатів. Результати дисертаційної роботи, (аналітичні співвідношення та комп'ютерні моделі) рекомендуються для практичного використання при модернізації та розробці нових перетворювальних агрегатів зарядних станцій електромобілів з метою підвищення якості електричної енергії та ККД.

Основні наукові положення дисертаційної роботи використані:

- у навчальному процесі ХНАДУ при підготовці бакалаврів та магістрів за освітньо-професійними програмами «Електромобілі та автомобільна електроніка» та «Електромобілі та енергозберігаючі технології»;

- у діяльність компанії «Elcars» використовуються науково-практичні методи підвищення ефективності експлуатації автомобільного електротранспорту в міських умовах експлуатації та застосування енергоефективних технологій на електричному автомобільному транспорті та його зарядній інфраструктурі. Апробація і впровадження зазначених результатів дисертаційних досліджень дозволяє створювати нові силові перетворювачі для зарядних станцій електромобілів з підвищеним ККД ;

- у ТОВ «АВТОДОМ ХАРКІВ» впровадження результатів дисертаційних досліджень дозволяють провести побудову зарядних станцій для електромобілів

на базі дворівневого активного чотириквadrантного випрямляча. Це забезпечить дотримання вимог електромагнітної сумісності згідно міжнародних стандартів і двонаправлену передачу електричної енергії в зарядній станції.

– у компанії ТОВ «АКУТЕК» результати роботи впроваджені при розробці джерела безперебійного живлення ІБП60К, що містить літій-іонні накопичувачі та має систему автоматичного заряду.

Перелік актів про впровадження результатів дослідження наведено у додатку Б.

Особистий внесок здобувача. Результати, які виносяться на захист, отримані автором самостійно та викладено в роботах [1–19]. У роботах, опублікованих у співавторстві, авторові належать: Серед них: встановлення закономірностей у сумісних електромагнітних і електромеханічних перехідних процесах [1]; аналіз найбільш поширених методів визначення стійкості енергетичних систем [2]; підвищення точності моделювання перехідних процесів і розрахунку втрат потужності напівпровідникових перетворювачів у програмному середовищі NI Multisim [3]; розглядається можливість розробки та впровадження спільної освітньої програми подвійних дипломів у навчальний процес ВНЗ. Як приклад обрано магістерську програму подвійного диплому «Електромобілі та енергозберігаючі технології» в яку впроваджено результати дисертаційних досліджень [7]; дослідження акумуляторних блоків електромобілів і зарядної станції на основі випрямляча джерела струму [8]; економічний та екологічний вплив електромобілів [10]; проведений аналіз енергозбереження у секторі міського електротранспорту [13]; визначені сучасні технології мобільних зарядних станцій для електромобілів [14]; проаналізовані перспективи та розвиток літєвих акумуляторів в Україні [17]; використання трифазних активних випрямлячів напруги з функцією рекуперації енергії [18]; дослідження параметрів енергоефективності зовнішньої зарядної станції EV постійного струму з використанням активного випрямляча [19].

Апробація результатів дисертації. Дисертаційна робота обговорена на міжкафедральному семінарі, який було проведено на кафедрі автомобільної елект-

роніки ХНАДУ. Основні положення і результати теоретичних та експериментальних досліджень доповідалися, обговорювалися і отримали позитивну оцінку на наступних науково-технічних конференціях:

- 62 Міжнародна наукова конференція з енергетики та електротехніки. (Ризького технічного університету RTUCON, Латвія, Рига, 16 листопада 2021 р., форма участі - заочна);

- 63 Міжнародна наукова конференція з енергетики та електротехніки. (Ризького технічного університету RTUCON, Латвія, Рига, 10-12 жовтня 2022 р., форма участі - заочна);

- VII Міжнародної науково-технічної Інтернет-конференції «Автомобіль і електроніка. Сучасні технології» (м. Харків, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Україна, 23 – 24 листопада 2020 р., форма участі - очна);

- Всеукраїнська науково-практична конференція «Стан та перспективи розвитку міського електричного транспорту». (Харків, Україна 14-16 квітня 2021 р.) Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, 2021., форма участі - очна);

- IV Міжнародна науково-практична конференція «Автомобільний транспорт та інфраструктура» , (м. Київ, Україна, 21–23 квітня 2021 року ., форма участі - заочна);

- Міжнародна науково-практична Інтернет-конференції магістрів, аспірантів і молодих вчених вищих технічних навчальних закладів. Внесок молодих учених в науку майбутнього. «Проблеми громадської безпеки сучасних електромобілів в Україні» Іноземна мова. (м. Харків, Харківський національний автомобільно-дорожній університет ХНАДУ, 11-12 березня 2021 р., форма участі - очна);

- Міжнародна науково-практична конференція присвячена 90-річчю Харківського автомобільно-дорожнього університету та 90-річчю автомобільного факультету «Новітні технології в автомобілебудуванні, транспорті та при підготовці фахівців» (Харків, ХНАДУ, 27-29 жовтня 2021 р., форма участі - очна);

– XIII Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування СЕУТ-ТОО. (м. Херсон, Херсонська державна морська академія, Україна: 07 - 09 вересня 2022 р., форма участі - заочна);

– 63-я Міжнародна наукова конференція з енергетики та електротехніки Ризького технічного університету RTU CON. (жовтень 2022., форма участі - заочна);

– VIII Міжнародної науково-технічної Інтернет-конференції. «Автомобіль і електроніка. Сучасні технології» (м. Харків, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Україна, 21 – 22 листопада 2022 р., форма участі - очна);

– XIV Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування» СЕУТТОО. (м. Херсон, Херсонська державна морська академія, Україна: 16 - 18 березня 2023 р., форма участі - заочна)

– XIX міжнародна наукова конференція Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба “Новітні технології – для захисту повітряного простору” (м. Харків, Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Україна, 12 – 13 квітня 2023р., форма участі - заочна);

– Всеукраїнська науково-практична конференція «Світові тенденції ресурсозбереження на електричному транспорті» (Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова. Харків, 25–27 жовтня 2023 р., форма участі - очна);

– XV Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування» СЕУТТОО. (м. Херсон, Херсонська державна морська академія, Україна: 13 - 15 березня 2024 р., форма участі - заочна)

Публікації. Основні положення дисертаційної роботи опубліковані у 19 наукових роботах, у тому числі: 1 монографія ; 5 статей у наукових фахових виданнях України та інших держав (з них 1 – у виданнях, що включені до наукометрич-

ної бази Scopus (Quartiles – Q2)); 13 тез доповідей у збірниках доповідей на наукових конференціях.

Структура і обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Повний обсяг дисертації складає 179 сторінок, у тому числі 2 додатків на 7 сторінках. Обсяг основного тексту дисертації становить 131 сторінок. Робота ілюстрована 78 рисунками та містить 16 таблиць. Список використаних джерел нараховує 95 найменувань на 13 сторінках.

Розділ 1

АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ТОПОЛОГІЙ ЗАРЯДНИХ СТАНЦІЙ І МІЖНАРОДНИХ СТАНДАРТІВ ДО НИХ

1.1 Постановка завдання розділу

В останні декілька десятиліть в транспорті спостерігається заміна двигунів внутрішнього згоряння на електродвигуни. Розширення використання електромобілів має позитивний вплив на зменшення забруднення атмосферного повітря транспортними засобами, особливо, у великих містах [28].

Протягом останніх років технології гібридного електричного транспортного засобу (HEV) та електричного транспортного засобу – електромобілі (EV) забезпечили ефективне рішення для економії палива з більш високою продуктивністю та більш низькими викидами в порівнянні зі звичайними транспортними засобами [22, 28, 32, 66]. Електромобілі - перспективний напрямок розвитку інфраструктури та транспорту, тому величезна кількість міжнародних автомобільних корпорацій інвестують суттєві кошти в розвиток електромобілебудування.

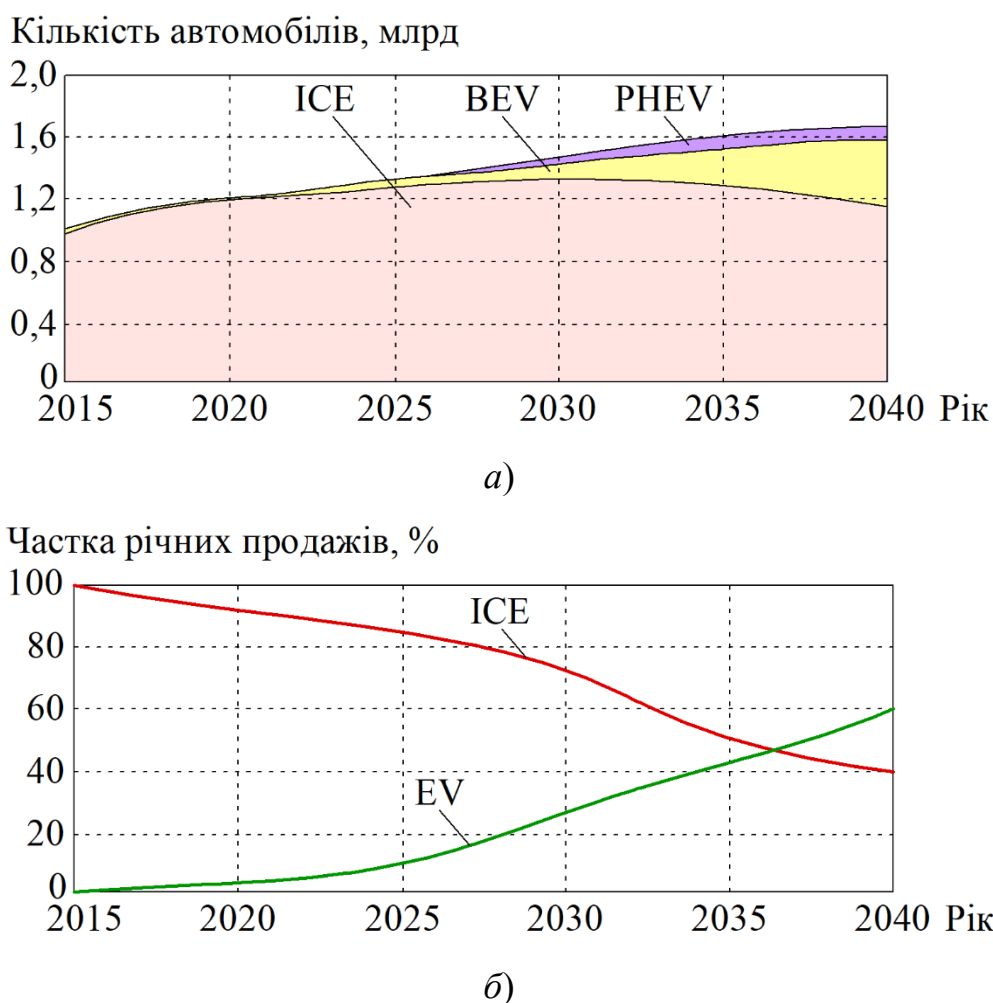
Електрифікація автомобільного транспорту на даний момент є одним з основних трендів розвитку світової автомобільної галузі [7, 8, 33, 34, 39]. За прогнозами Bloomberg світова частина продажів електромобілів у 2040 році складе близько 50 % (дивись рисунок 1.1).

В існуючих зарядних пристроях при значних значеннях струму заряду виникають великі втрати електроенергії, тому актуальним є питання розвитку власних технічних рішень щодо покращення технічних характеристик зарядних станцій електромобілів [47, 48, 49, 70].

Також, перевагою використання електромобілів є значне зменшення витрат на енергоресурси, а також можливе зменшення вартості ремонту і технічного обслуговування у порівнянні зі звичайними автомобілями [42, 43]. Практично у

всьому світі електроенергія наразі - найдешевший енергоресурс, що застосовується для транспортних засобів [9, 10].

Розвитку електромобілів приділяється значна увага виробників і дослідників [11, 12]. При цьому важливим питанням є створення енергоефективних зарядних станцій з найбільш високими параметрами ККД, коефіцієнта потужності та інших параметрів системи, яка буде задовольняти мережу живлення і не впливати на неї негативно [26, 27].



а – кількості електромобілів; б – частки продажу електромобілів

Рисунок 1.1 – Динаміка зростання

На рисунку 1.1 приведені наступні позначення:

ICE – англ. InternalCombustionEngine, машина с ДВЗ;

BEV – англ. BatteryElectricVehicle, електромобіль з акумуляторною батареєю;

PHEV – англ. Plug-inHybridElectricVehicle, машина оснащена ДВЗ та електродвигуном з акумуляторною батареєю.

Порівняльний аналіз вартості проїзду на 100 км електромобілем та автомобілем з ДВЗ приведено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Порівняння вартості енергоресурсів на 100 км ходу для електромобіля та авто з ДВЗ

Тип авто	Тип заряду	Витрати енергоресурсів на 100 км ходу	Вартість заряду кВт·год, грн	Вартість повного заряду на 100 км ходу, грн
EV	Домашня 1-фазна зарядка змінним струмом (230 В, 16 А)	20 кВт·год	2,64	52,8
	Домашня 3-фазна зарядка змінним струмом (380 В, 16 А)	20 кВт·год	2,64	52,8
	Комерційна зарядна станція постійним струмом (до 40 кВт·год)	20 кВт·год	11	220
З ДВЗ	Автомобільна заправна станція	7 л	–	$54,4 \text{ грн/л} \cdot 7 = 380,8$

*дата розрахунку – квітень 2024 року.

Таким чином з таблиці 1.1 видно, що електромобілі мають значно меншу питому вартість проїзду, що зумовлює їх актуальність.

При умові стійкого зростання кількості електромобілів досить актуальним є питання створення енергоефективних систем зарядних станцій електромобілів. При розробці зарядної станції, важливими є не тільки кількісні показники втрат потужності в перетворювальному агрегаті зарядної станції, а й реалізовані показники електромагнітної сумісності (ЕМС) з живлячою мережею [68]. Таким чином важливим є розуміння вимог, які пред'являються міжнародними та вітчизняними стандартами щодо емісії вищих гармонік.

Крім того міжнародними стандартами регламентуються базові вимоги щодо режимів заряду, параметрів вихідної напруги та потужності бортових та зовнішніх зарядних станцій.

1.2 Вимоги до режимів заряду та зарядних портів згідно міжнародних стандартів зарядних станцій для електромобілів

У міжнародних стандартах ІЕС-62196, ІЕС-61851 та інших, які є чинними в Європі, виділено 4 основні режими заряду електромобілів та один безпроводний [23,]. Останній тип заряду не можна класифікувати на рівні з іншими типами – це індуктивний безпроводний заряд. Перший – четвертий типи можна класифікувати на такі:

- за кількістю фаз (однофазна чи трифазна);
- за величиною напруги заряду;
- за типом струму (постійний чи змінний);
- за величиною струму заряду;
- за розміщенням зарядної станції (бортова чи зовнішня);
- за локацією зарядної станції (домашня, приватна або публічна).

Технічні вимоги щодо величини вихідного струму зарядних станцій згідно класифікації ІЕС-62196 наведено в табл. 1.2.

Таблиця 1.2 – Типи зарядів електромобілів згідно з міжнародним стандартом IEC-63196

Тип	Кількість фаз	Напруга заряду, В	Тип струму	Струм заряду, А	Розміщення зарядної станції	Локація зарядної станції	
Mode 1	1	До 250	АС	До 16	Бортова	Домашня	
	3	До 480					
Mode 2	1	До 250		До 32			Приватна /Публічна
	3	До 480					
Mode 3	1	До 250		До 32			
	1	До 250		До 70			
	3	До 480		До 63			
Mode 4	3	До 1000	DC	До 500	Зовнішня	Публічна	

Mode 1 – пряме пасивне підключення до електромережі змінного струму (дивись рисунок 1.2). Підключення не вимагає додаткових керуючих пристроїв. Це домашній заряд від стандартної розетки з простим подовжувачем, без будь-яких заходів безпеки. Заряд здійснюється змінним однофазним струмом 16 А і напругою до 250 В з піковою потужністю до 4 кВт або трифазним струмом 16 А і напругою до 480 В з піковою потужністю 13 кВт.

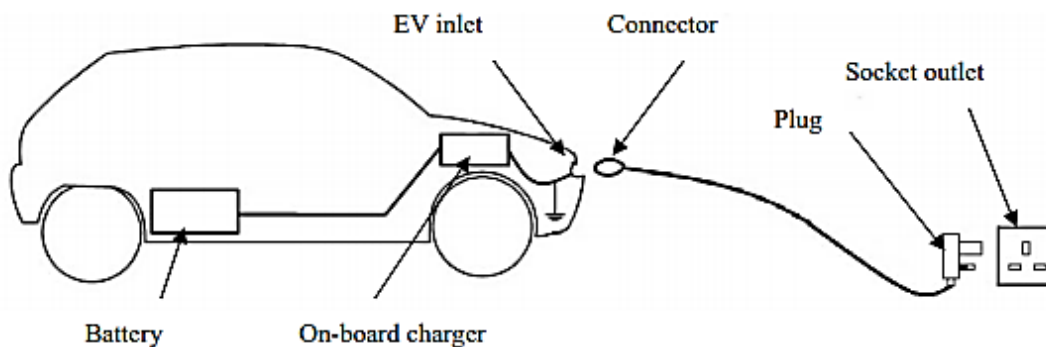


Рисунок 1.2 – Підключення ЕМ для заряду за типом Mode 1

Режим Mode 2 - це пряме підключення електромобіля до домашньої мережі змінного струму через звичайну розетку за допомогою спеціального адаптера, який йде у комплекті з автомобілем (дивись рисунок 1.3). Цей адаптер має заземлення, захист від різких перепадів напруги та температурний захист. Адаптери Mode 2 забезпечують середній рівень безпеки і є мінімальною вимогою для зарядки автомобіля. Заряд здійснюється змінним однофазним струмом до 32 А і напругою до 250 В з піковою потужністю до 8 кВт або трифазним струмом до 32 А і напругою до 480 В з піковою потужністю до 26 кВт.

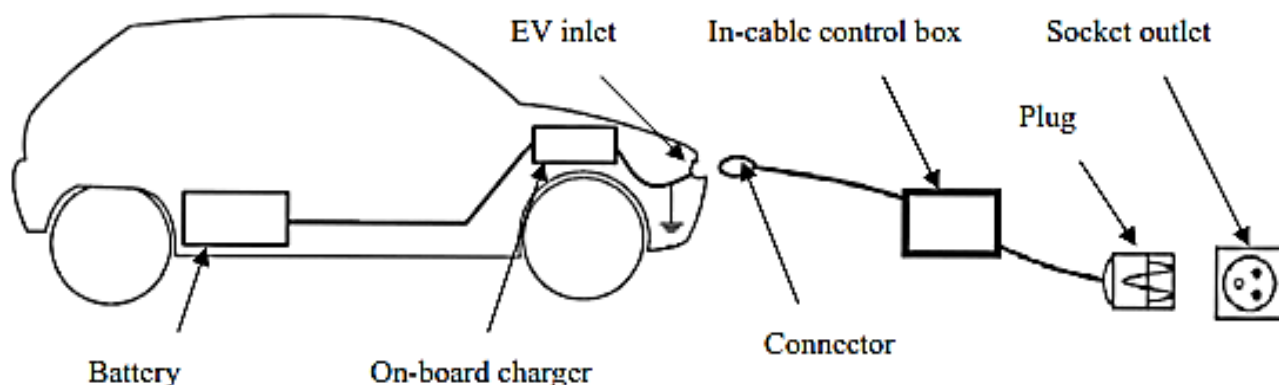


Рисунок 1.3 – Підключення ЕМ для заряду за типом Mode 2

Mode 3 – активне підключення електромобіля до дротової зарядної станції змінного струму із заземленням і приладами керування, а також адаптером з додатковими струмопровідними жилами (дивись рисунок 1.4). Зазвичай це приватна або публічна зарядна станція. Заряд здійснюється змінним однофазним струмом до 32 А, напругою 250 В, з піковою потужністю до 8 кВт або однофазним струмом до 70 А, напругою до 250 В, з піковою потужністю до 18 кВт або трифазним струмом до 63 А, напругою живлення до 480 В, з піковою потужністю до 52 кВт.

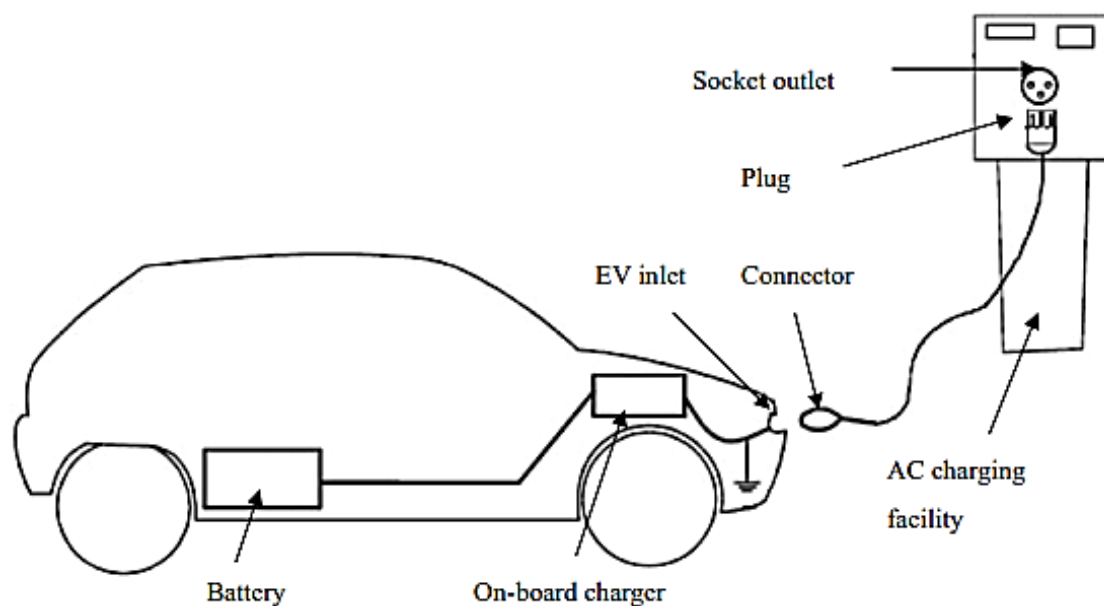


Рисунок 1.4 – Підключення ЕМ для заряду за типом Mode 3

Mode 4 – підключення електромобіля до публічної дротової станції постійного струму (дивись рисунок 1.5). Обладнання для заряду електромобілів виступає посередником між джерелом живлення та зарядним портом транспортного засобу. Його основне призначення - надавати безпечне та швидке заряджання автомобіля постійним струмом. У зарядних станціях постійного струму зарядний пристрій зазвичай вбудований у саму станцію, а не в автомобіль. Швидкий заряд постійним струмом допускає зарядний струм до 1000 А напругою до 500 В з максимальною піковою потужністю до 500 кВт.

Деякі автомобілі обладнані як бортовим зарядним перетворювачем електроенергії, який дозволяє заряджати блок батареї зарядами типу 1, 2, 3, так і зовнішнім зарядним пристроєм, що дозволяє заряджати батарею зарядами типу 4.

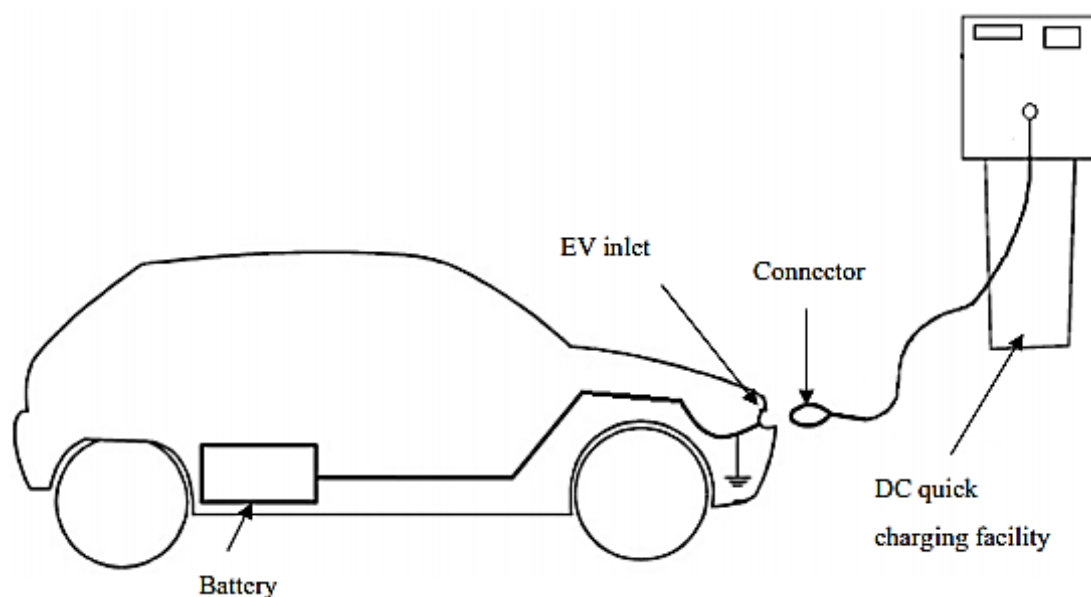


Рисунок 1.5 – Підключення ЕМ для заряду за типом Mode 4

Порівняння вартості заряду електромобіля з різними типами заряду з автомобілем з ДВЗ в Україні наведено в таблиці 1.1.

При цьому не враховувався багатотарифний варіант та втрати при перетворенні енергії.

З таблиці 1.1. видно, що при заряді від домашньої розетки на 100 км вартість заряду електромобіля майже у 6 разів менше, ніж заправка авто з ДВЗ. Але час заряду буде значно більший. При заряді від комерційної зарядної станції постійним струмом вартість значно більша, але й набагато швидша. В Україні існують зарядні станції з швидкістю заряду 10, 20 та 40 кВт·год.

Вдосконалення технологій EV та поширення електрифікованих перевезень спричинили виникнення потреби в стандартних портах для заряду. Так само, як водій транспортного засобу з двигуном внутрішнього згоряння може заправлятися на будь-якій заправці, водій електромобілю повинен мати змогу заряджатися на будь-якій зарядній станції [18]. Навіть сьогодні відсутність стандартизації зарядного порту є основною перешкодою, яка стримує прийняття EV, оскільки різні виробники EV як і раніше використовують різні конфігурації зарядних портів.

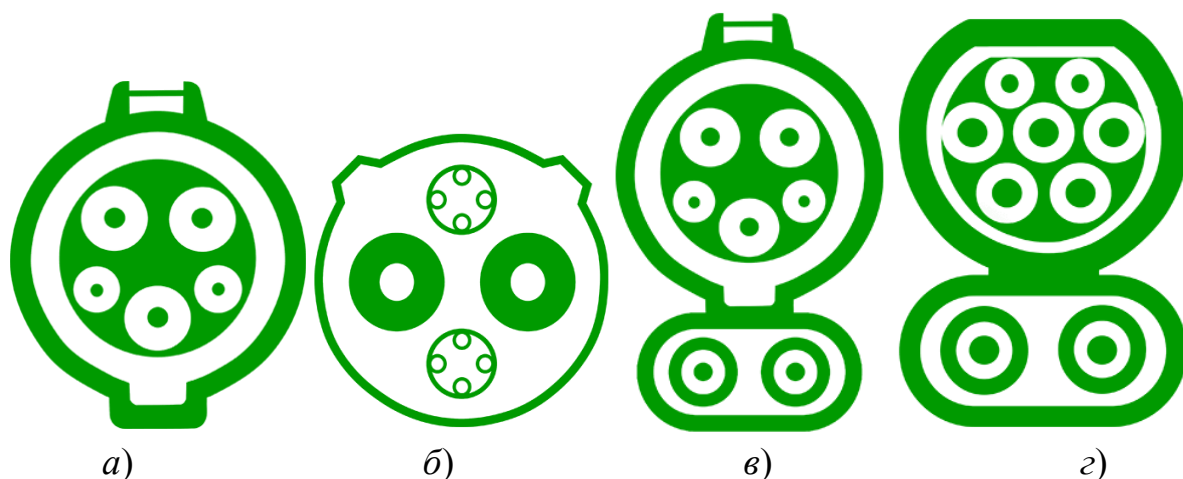
Ідея повинна полягати в тому, що виробники будуть об'єднуватися в один порт для підключення.

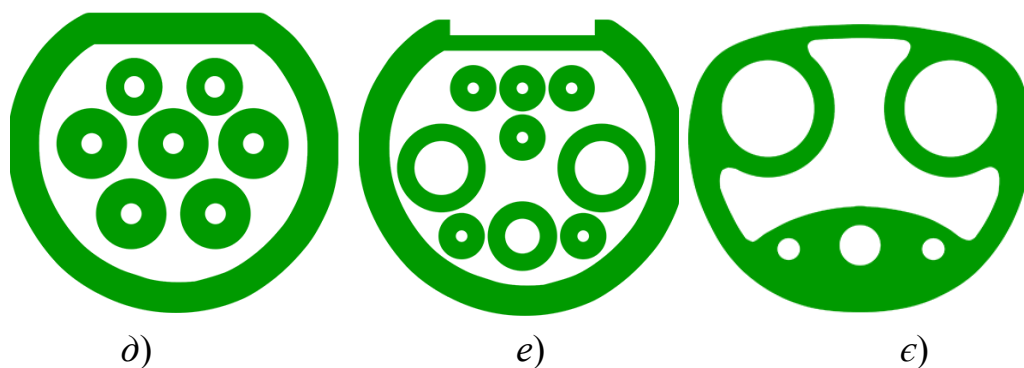
Міжнародна електротехнічна комісія (IEC), товариство автомобільних інженерів (SAE) Сполучених Штатів та GuoBiao (GB) Китаю є трьома найпоширенішими стандартами провідних зарядів для електромобілів [19, 20].

Крім того, CHAdeMO – це стандарт швидкої зарядки постійного струму, розроблений в Японії. Стандарт IEC прийнятий більшістю європейських виробників електропередач, а SAE – Сполученими Штатами Америки та Японією. GB – це національний стандарт, прийнятий виробниками материкових електростанцій. Окремо треба відзначити стандарт Tesla.

Чотирма основними зарядними роз'ємами, що з'являються на ринку є Type 1 (J1772), Type 2 (Mennekes), CCS Combo (Type 1 / Type 2), CHAdeMO, GB та TeslaSuperCharger (дивись рисунок 1.6) [21, 22].

Type 1 – це 5-контактний стандартний роз'єм електромобільного конектора, характерний для більшості електромобілів американського і азіатського виробництва. Роз'єм Type 1 застосовується для підзарядки електромобіля від зарядних комплексів, які працюють за стандартами Mode 2, Mode 3.





а – Type 1 (J1772); б – CHAdeMO; в – Type 1 (CCS Combo 1); г – Type 2 (CCS Combo 2); д – GB/T (AC); е – GB/T (DC); є – TeslaSuperCharger

Рисунок 1.6 – Найбільш актуальні типи штекерів для заряду електромобілів

У роз'ємі Type 1 підзарядка відбувається за допомогою однофазної мережі змінного струму з максимальною напругою 230 В, силою струму 32 А і граничною потужністю 7,4 кВт.

Type 2 (Mennekes) – це 7-контактний роз'єм, характерний в основному для європейських електромобілів, а також для ряду китайських авто. Особливість роз'єму полягає в можливості використовувати однофазну і трифазну мережу, з максимальною напругою 400 В, силою струму 63 А і потужністю 43 кВт. Зазвичай 400 В, 32 А і 22 кВт при трифазному підключенні та 230 В, 32 А і 7,4 кВт при однофазному підключенні. Роз'єм допускає використання зарядних станцій з режимами роботи Mode 2, Mode 3.

CHAdeMO – це 2-контактний конектор постійного струму, розроблений при співпраці найбільших японських автовиробників. Може використовуватися для зарядки більшості японських, американських і ряду європейських електромобілів. Розрахований для використання на потужних зарядних станціях, що працюють від постійного струму в режимі Mode 4. Розрахований на максимальну напругу 500 В і силу струму 125 А з потужністю до 62,5 кВт, але в розробці нова версія стандарту CHAdeMO, який буде розрахований на максимальну напругу 800 В і силу струму 600 А з потужністю до 500 кВт.

CSS Combo (Type 1 / Type 2) – це комбінований тип конектора, який дозволяє використовувати як повільні, так і швидкі зарядні станції. Роз'єми CCS Combo не однакові для Європи, США і Японії: для Європи пропонують роз'єм Combo 2 сумісний з Mennekes, а для США і Японії Combo 1, який пов'язаний з J1772. Зарядка за допомогою CSS Combo розрахована на 200-500 В при 200 А і потужністю 100 кВт. CSS Combo 2 на даний момент найбільш поширений тип роз'єму на швидких зарядних станціях в Європі разом з CHAdeMO.

Tesla Supercharger – тип конектора Mode 4, який забезпечує високу зарядну потужність 135 кВт постійного струму (DC), розрахований на напругу до 410 В та струм заряду 300 А. Конектори станції в залежності від регіону використання відрізняються за формою конектора, в США вони мають три роз'єми, в Європі п'ять, що ускладнює експлуатацію імпортованих з Америки в європейські країни електромобілів.

Виробники автомобілів в даний час розділені між стандартами CHAdeMO (азіатські) та CCS (більшість європейських і американських), а Tesla використовує свій власний зарядний з'єднувач, популярність якого в останній час зросла. Відсутність глобального стандарту викликало у споживачів більшу плутанину, й поряд з високими цінами саме спосіб заряду акумуляторів та відсутність загальноприйнятого стандарту не дозволило широко розповсюдити електромобілі. Тому, з подальшим розвитком технологій та стандартів зарядних пристроїв призведе до поширення електромобілів у світі.

1.3 Основні вимоги вітчизняних та міжнародних стандартів до ЕМС перетворювачів для зарядних станцій електромобілів

Станція заряду електромобілів виглядає як навантаження постійного струму для електричної розподільної системи, і характер процесу перетворення змінного струму в постійний за допомогою випрямлення може представляти небажані гармоніки струму в розподільчій системі мережі, що призводить до негативного

впливу на якість електроенергії мережі [57]. Дослідження стосовно виникнення гармонік струму детально розглянуті у [82, 89].

1.3.1 Аналіз вимог вітчизняних стандартів до якості електроенергії

В даний час слід відзначити тенденцію підвищення вимог вітчизняних стандартів до якості електроенергії та електромагнітної сумісності [13, 14].

Норми якості електроенергії в системах електропостачання загального призначення регламентуються стандартом ДСТУ ГОСТ 13109-97. Даний стандарт регламентує показники якості напруги в системах електропостачання загального призначення, однак не пред'являє вимог до гармонічного складу струму, споживаного технічними засобами. У ньому визначаються вимоги до параметрів якості напруги живлення.

Несинусоїдальність напруги живлення характеризується коефіцієнтом гармонічних спотворень напруги і коефіцієнтом k -ої гармонічної складової.

Коефіцієнт гармонічних спотворень визначається відношенням суми середньоквадратичних значень вищих гармонік до першої гармоніки. Коефіцієнт гармонічних спотворень напруги $KГC_U$ обчислюється за виразом:

$$KГC_U = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{40} U_n^2}}{U_1} \cdot 100 \%, \quad (1.1)$$

де U_n – діюче значення напруги n -ої гармоніки;

U_1 – діюче значення фазної або міжфазної напруги.

Коефіцієнт n -ої гармонічної складової напруги у відсотках допускається обчислювати за виразом:

$$K_{U(n)} = \frac{U_n}{U_{ном}} \cdot 100 \%, \quad (1.2)$$

Допустимі значення коефіцієнта спотворення синусоїдальності кривої напруги наведено в таблиці 1.3. Допустимі значення коефіцієнта n -ої гармонічної складової напруги наведено в таблиці 1.4.

Таблиця 1.3 – Значення коефіцієнта спотворення синусоїдальності кривої напруги

Параметр	Нормально допустимі значення				Гранично допустимі значення			
$U_{ном}$, кВ	0,38	6-20	35	110-330	0,38	6-20	35	110-330
k_U , %	8	5	4	2	12	8	6	3

Таблиця 1.4 – Допустимі значення коефіцієнта n -ої гармонічної складової напруги (у %)

Непарні гармоніки, що не кратні 3, при $U_{ном}$, кВ					Непарні гармоніки, кратні 3, при $U_{ном}$, кВ					Парні гармоніки при $U_{ном}$, кВ				
n	0,38	6-20	35	110-330	n	0,38	6-20	35	110-330	n	0,38	6-20	35	110-330
5	6	4	3	1,5	3	2,5	1,5	1,5	0,75	2	2	1,5	1	0,5
7	5	3	2,5	1	9	0,75	0,5	0,5	0,2	4	1	0,7	0,5	0,3
11	3,5	2	2	1	15	0,15	0,15	0,15	0,1	6	0,5	0,3	0,3	0,2
13	3,5	2	1,5	0,7	21	0,1	0,1	0,1	0,1	8	0,5	0,3	0,3	0,2
17	2	1,5	1	0,5	>21	0,1	0,1	0,1	0,1	10	0,5	0,3	0,3	0,2
23	1,5	1	1	0,4	—	—	—	—	—	>12	0,2	0,2	0,2	0,2
25	1,5	1	1	0,4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
>25	0,2+	0,2+	0,2+	0,2+	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	+1,3x	+0,8x	+0,6x	+0,2x	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	$\times 25/n$	$\times 25/n$	$\times 25/n$	$\times 25/n$	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Вітчизняний стандарт ДСТУ ІЕС 61000-3-12:2017 «Електромагнітна сумісність. Частина 3-12. Норми. Норми на гармоніки струму, створені обладнанням із

номінальним вхідним струмом силою понад 16 А та до 75 А включно на фазу, підключеним до низьковольтних електропостачальних систем загальної призначеності» (копія міжнародного стандарту IEC 61000-3-12:2004, IDT) описує наступні показники якості спожитого струму та вимоги щодо їх допустимих значень.

Частковий зважений коефіцієнт гармонійних складових:

$$ЧВКГС = \sqrt{\sum_{h=14}^{40} h \cdot \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2} \quad (1.3)$$

Сумарний коефіцієнт гармонійних складових:

$$СКГС = \sqrt{\sum_{h=2}^{40} \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2} \quad (1.4)$$

Норми емісії гармонічних складових току для симетричних трифазних електричних споживачів представлені в таблиці 1.5

Таблиця 1.5 – Норми емісії гармонічних складових току для симетричних трифазних електричних споживачів

Мінімальне значення R_{sce}	Максимально допустимі відносні значення гармонійних складових струму I_n/I_1				Допустимі значення коефіцієнтів гармонійних складових	
	I_5	I_7	I_{11}	I_{13}	СКГС	ЧВКГС
33	10,7	7,2	3,1	2	13	22
66	14	9	5	3	16	25
120	19	12	7	4	22	28
250	31	20	12	7	37	38
>350	40	25	15	10	48	46

де R_{sce} – еквівалентний опір електричної мережі при короткому замиканні;
 I_n – діюче значення струму n -ої гармонічної складової;
 I_1 – діюче значення першої гармоніки струму.

Таким чином, вітчизняні стандарти електромагнітної сумісності висувають вимоги щодо емісії вищих гармонік спожитим струмам лише для зарядних станцій середньої потужності з спожитим струмом в одній фазі до 75А (тобто до 50кВт), тобто зарядних станцій типу Mode1, Mode2, Mode 3. А до станцій швидкого заряду типу Mode 4 дія ДСТУ ІЕС 61000-3-12:2009 не розповсюджується.

1.3.2 Аналіз вимог міжнародних стандартів до якості електроенергії

Обмеження вмісту вищих гармонічних складових споживаних технічними пристроями приведено в наступних міжнародних стандартах: ІЕЕЕ-519, ІЕС 61000-3-2, ІЕС-61000-4-3 [16]. Проблема забезпечення якості електричної енергії пов'язана з завданням енергозбереження, так як показники якості пов'язані з коефіцієнтом потужності. В системах живлення, побудованих на базі випрямних установок, існує проблема, пов'язана з підвищенням коефіцієнта потужності за рахунок зменшення несинусоїдальності споживаного струму. У таких системах вплив коефіцієнта спотворень можна порівняти, а іноді і перевищує вплив $\cos(\varphi)$ на величину коефіцієнта потужності.

Так, стандарт ІЕЕЕ 519-1992 висуває вимоги до величин гармонічних складових споживаного струму до 49 гармоніки. В даний час зберігається тенденція до посилення вимог до стандартів на якість електричної енергії. При цьому одним з основних факторів оцінки якості електричної енергії є інтегральним показником гармонічного складу струму.

$$I_{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{h=1}^{49} I_h^2}}{I_1}, \quad (1.5)$$

де I_h – діюче значення вищої гармоніки струму;

h – порядок гармоніки.

Допустима величина інтегрального показника гармонічного складу струму залежить від співвідношень вищих гармонік і першої гармоніки споживаного струму. Міжнародний стандарт IEEE-519 висуває вимоги до емісії гармонік струму навантажень, що живляться від високовольтних мереж від 120 В до 160 кВ. Вимоги даного стандарту поширюються також на емісію вищих гармонік струмів тягових підстанцій. Допустимі величини вищих гармонік струму, споживаного технічними пристроями, і результуючого коефіцієнта нелінійних спотворень струму, споживаного від мереж з напругою від 120 В до 69 кВ наведені в таблиці 1.6).

У таблиці 1.6 I_{sc} – максимальне значення струму короткого замикання в точці загального з'єднання; I_L – номінальний струм навантаження в точці з'єднання; h – порядок вищих гармонік; TDD – (англ. «total demand distortion»), аналогом даного показника є коефіцієнт нелінійних спотворень. Коефіцієнт нелінійних спотворень, позначений в стандарті IEEE-519 як TDD , визначається за виразом:

Таблиця 1.6 – Вимоги до емісії непарних гармонік споживаних струмів в мережах з напругою від 120 В до 69 кВ згідно стандарту IEEE-519

Максимально допустиме значення рівня вищих гармонік струму в процентному співвідношенні від першої гармоніки						
I_{sc} / I_L	$h < 11$	$11 < h < 17$	$17 < h < 23$	$23 < h < 35$	$35 < h$	TDD
< 20	4 %	2 %	1,5 %	0,6 %	0,3 %	5
20-50	7 %	3,5 %	2,5 %	1 %	0,5 %	8
50-100	10 %	4,5 %	4 %	1,5 %	0,7 %	12
100-1000	12 %	5,5 %	5 %	2 %	1 %	15
> 1000	15 %	7 %	6 %	2,5 %	1,4 %	20

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{40} I_n^2}}{I_L} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{40} I_n^2}}{\sqrt{\sum_{n=1}^{40} I_n^2}} \cdot 100 \% , \quad (1.6)$$

Вимоги до емісії вищих гармонік споживаного струму в мережах від 69 кВ до 161 кВ стандарту IEEE-519 наведено в таблиці 1.7.

Таблиця 1.7 – Вимоги до емісії непарних гармонік споживаних струмів в мережах з напругою від 69 кВ до 161 кВ

Максимально допустиме значення рівня вищих гармонік струму в процентному співвідношенні від першої гармоніки						
I_{sc} / I_L	$h < 11$	$11 < h < 17$	$17 < h < 23$	$23 < h < 35$	$35 < h$	TDD
< 20	2 %	1 %	0,75 %	0,3 %	0,15 %	2,5
20-50	3,5 %	1,75 %	1,25 %	0,5 %	0,25 %	4
50-100	5 %	2,25 %	2 %	0,75 %	0,35 %	6
100-1000	6 %	2,75 %	2,5 %	1 %	0,5 %	7,5
> 1000	7,5 %	3,5 %	3 %	1,25 %	0,7 %	10

Таким чином, можна зробити висновок, що струм, спожитий зарядною станцією має відповідати вимогам стандарту IEEE-519 за рівнем емісії вищих гармонік струму. На підставі аналізу вітчизняних і міжнародних стандартів, а також діючих вимог якості електроенергії на сучасні проєктовані зарядні станції постійного струму власне підстанції повинні відповідати таким вимогам:

- реалізовувати коефіцієнт гармонічних спотворень спожитого струму менше 5 %;
- забезпечувати коефіцієнт потужності зарядних станцій не нижче 96 %

1.4 Аналіз техніко-економічних характеристик накопичувачів енергії в електромобілях

До недавнього часу значним недоліком електромобілів була висока вартість літій-іонних батарей [59]. Проте існує тенденція зменшення вартості літій-іонних батарей (дивись рисунок 1.7). Так за прогнозами на 2030 рік вартість 1 кВт·год в літій-іонному накопичувачі буде коштувати 62 \$.

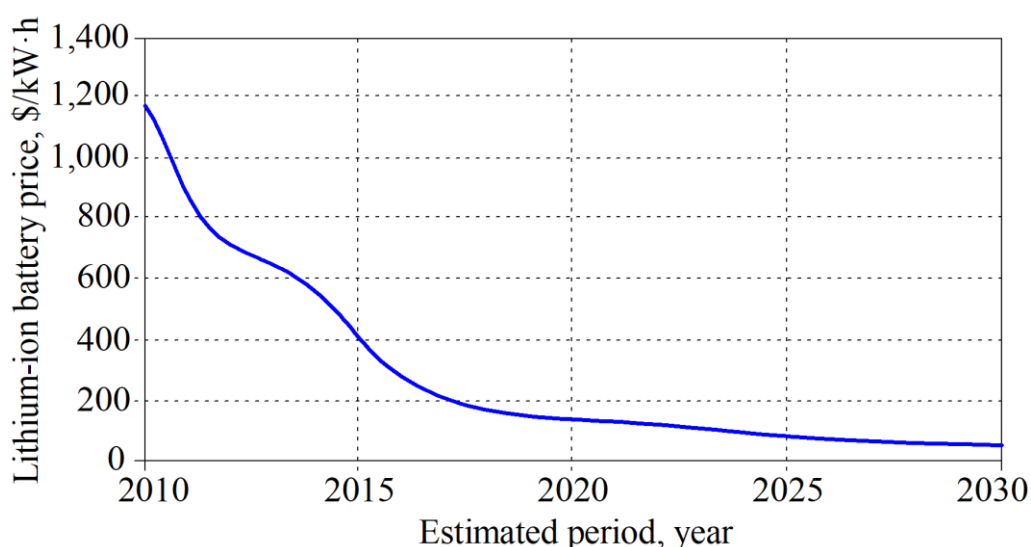


Рисунок 1.7 – Існуюча тенденція і прогноз зниження вартості літій-іонних батарей

Електромобілі, які мають можливість заряджатися від зовнішніх джерел живлення називають PEV (plug-in electric vehicle). Вони поділяються на такі типи:

- оснащені виключно електричними двигунами (одним чи декількома), що живляться лише від електричних акумуляторів та потребують заряду від зовнішнього зарядного обладнання (battery electric vehicles) – BEVs;

- з гібридними енергетичними установками, оснащені як електричними силовими установками (електродвигунами), так і силовими установками на іншому виді палива (наприклад, бензиновими або дизельними двигунами) з різними формами взаємодії силових установок, які мають можливість заряджатися від зовнішніх джерел живлення (plug-in-hybrid electric vehicles) – PHEVs [23, 24, 79].

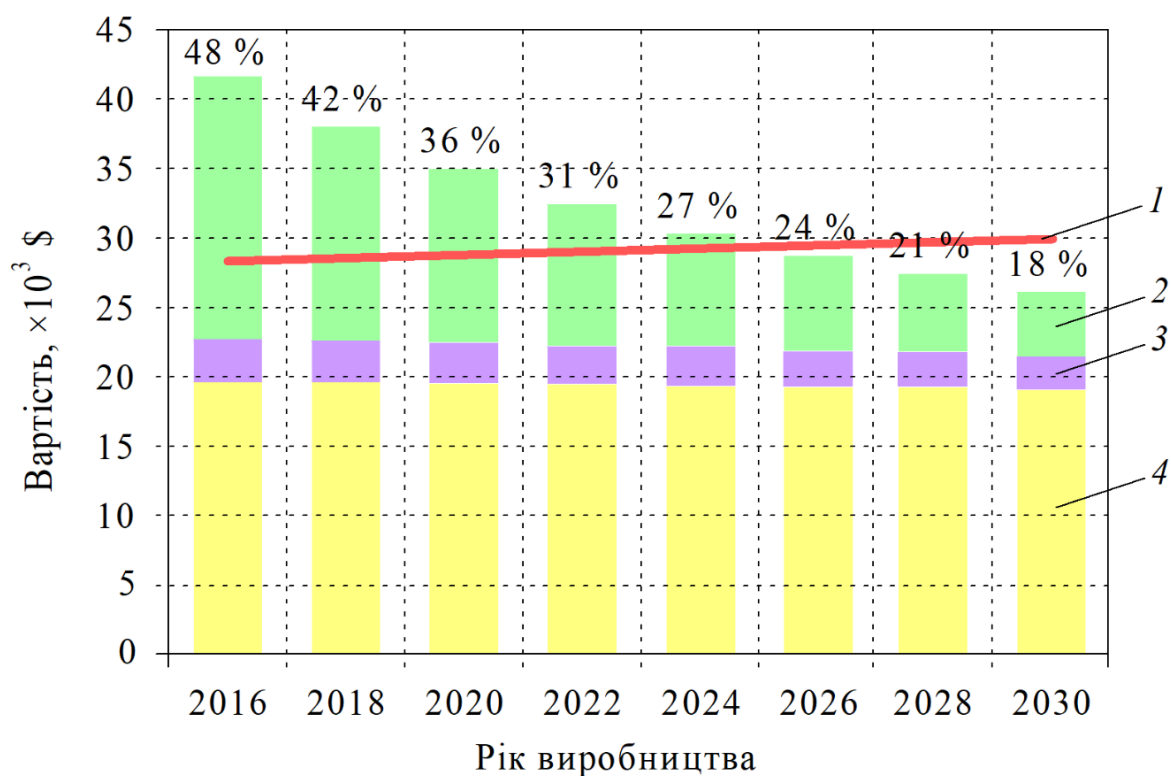
Крім PEV існують ЕМ з гібридними енергетичними установками, які не мають можливості заряджатися від зовнішніх джерел живлення, а тільки від бортового зарядного обладнання (hybrid electric vehicles) – HEVs, а також ЕМ з гібридними енергетичними установками, що працюють на паливних елементах і теж не можуть заряджатися від зовнішніх джерел живлення (fuel cell hybrid electric vehicles) – FCHEVs [28, 29].

Ключовим фактором, який визначає перспективи розвитку електромобілів, є акумуляторна батарея. Від неї, з одного боку, залежить потенційна дальність поїздки електромобілів на одному заряді, а з іншого - різниця в ціні порівняно з традиційними автомобілями з двигунами внутрішнього згорання.

Як джерело накопичення енергії, батарея є ключем до розвитку електромобілів. Літій-іонна батарея відома як найбільш багатообіцяюча екологічна батарея [37, 53], яка користується популярністю у більшості автомобілів з новою енергією завдяки своїм перевагам, таким як висока щільність енергії, швидка зарядка і розрядка, безпека і т. п. [31, 35, 36, 56, 58, 75].

У зв'язку з розширенням досліджень в області динамічного моделювання електромобілів, стратегії розподілу енергії та управління потужністю, а також оцінки стану заряду акумуляторів (*SoC*) і стану здоров'я (*SoH*), в даний час підвищується точність зарядки і розрядки. Модель силових акумуляторів, особливо літій-іонних акумуляторів, є основною метою досліджень [60-62].

Найпоширенішим типом батарей для PHEV і BEV в даний час є літій-іонні батареї. Основна причина дорогої ціни ЕМ – вартість (дивись рисунок 1.8).



1 – вартість автомобіля з ДВЗ; 2 – вартість батареї; 3 – вартість трансмісії;
4 – вартість комплектуючих для електромобіля

Рисунок 1.8 – Залежність вартості автомобілів та комплектуючих за роками

Існує тенденція зменшення вартості Li-ion батарей. За існуючими прогнозами в 2030 році вартість електромобіля буде меншою, ніж вартість автомобіля з ДВЗ.

У таблиці 1.8 наведено порівняння характеристик акумуляторних батарей різних типів.

Для сучасних електромобілів існує безліч виробництв літій-іонних акумуляторів, багато з яких знаходяться в стадії розробки. Дослідники можуть вибрати електроліт, позитивний і негативний електроди, щоб оптимізувати продуктивність, безпеку та довговічність батареї [73, 74]. Порівняння літій-іонних акумуляторів, що використовуються в сучасних джерелах електроенергії приведено на рисунку 1.9.

Таблиця 1.8 – Порівняння характеристик акумуляторних батарей різних типів

Технологія зберігання	Переваги	Недоліки	Кількість циклів	Ефективність, %
Lead-Acid Batteries (свинцево-кислотні батареї)	Висока продуктивність, низька об'ємна щільність енергії, низькі капітальні витрати, тривалий термін служби	Низький ККД, несприятливий вплив на навколишнє середовище	200-300	75
Sodium-Sulfur Batteries (натрій-сірка NaS)	Дуже висока енергетична потужність, висока енергетична щільність, тривалий термін служби	Витрати на виробництво, проблеми безпеки	2000-3000	89
Metal-Air batteries	Дуже висока щільність енергії	Мало доступних акумуляторних батарей	100-200	50
Li-Ion batteries	Дуже високий ККД і щільність енергії	Низька кількість життєвих циклів	300-500	95
Flow battery	Дуже висока енергоємність і потужність, тривалий термін служби	Низька щільність енергії, низький ККД	1500-2500	75-85
Super-capacitors (супер-конденсатори)	Високий ККД	Низька енергетична щільність, мало енергетичних систем	10^4 - 10^5	93-98
Flywheel energystorage (FES)	Висока потужність, короткий час доступу, тривалий термін служби, низькі зусилля технічного обслуговування, високий ККД, малі екологічні наслідки	Низька щільність енергії	10^5 - 10^7	90

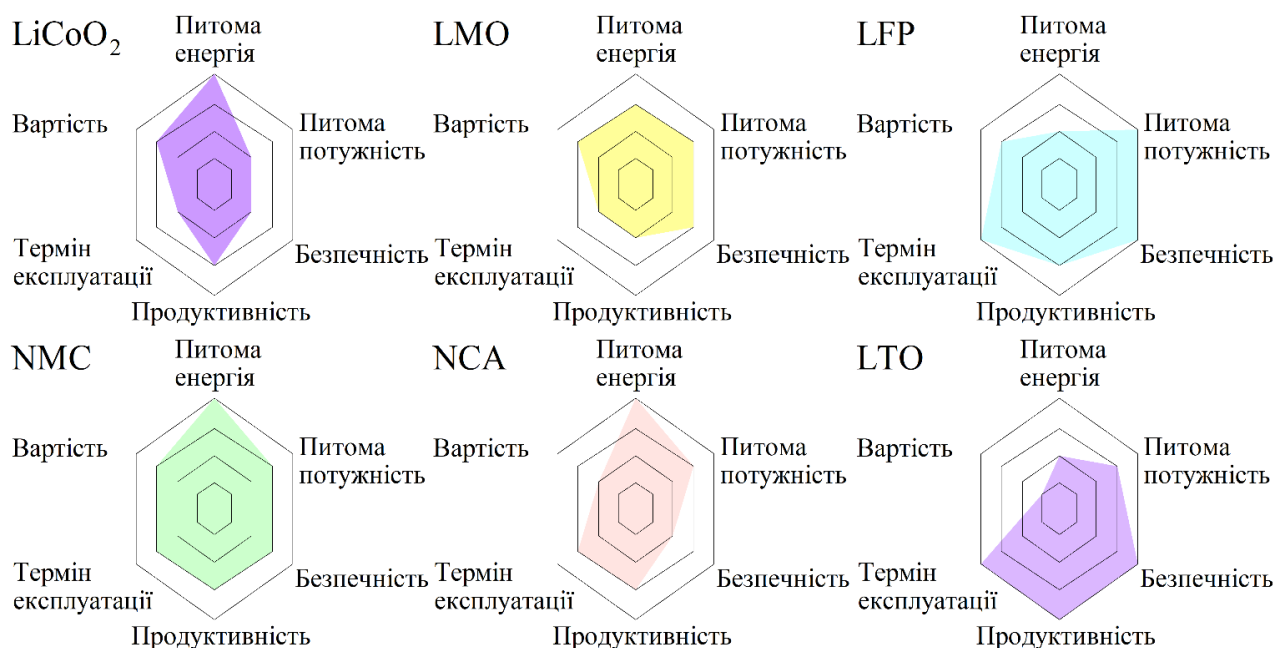


Рисунок 1.9 – Порівняння літій-іонних акумуляторів, що використовуються в сучасних джерелах електроенергії

З наведеного огляду літєвих акумуляторних батарей можна зробити висновок, що найбільш перспективними топологіями акумуляторів електромобілів є LFP батареї.

1.5 Огляд існуючих топологій зарядних станцій для електромобілів та аналіз їх параметрів

Традиційні зарядні станції для заряду електромобілів, що містять дві стадії перетворення електроенергії, які складаються з вхідного AC/DC випрямляча і вихідного DC/DC перетворювача постійного струму, наведено на рисунку 1.10.

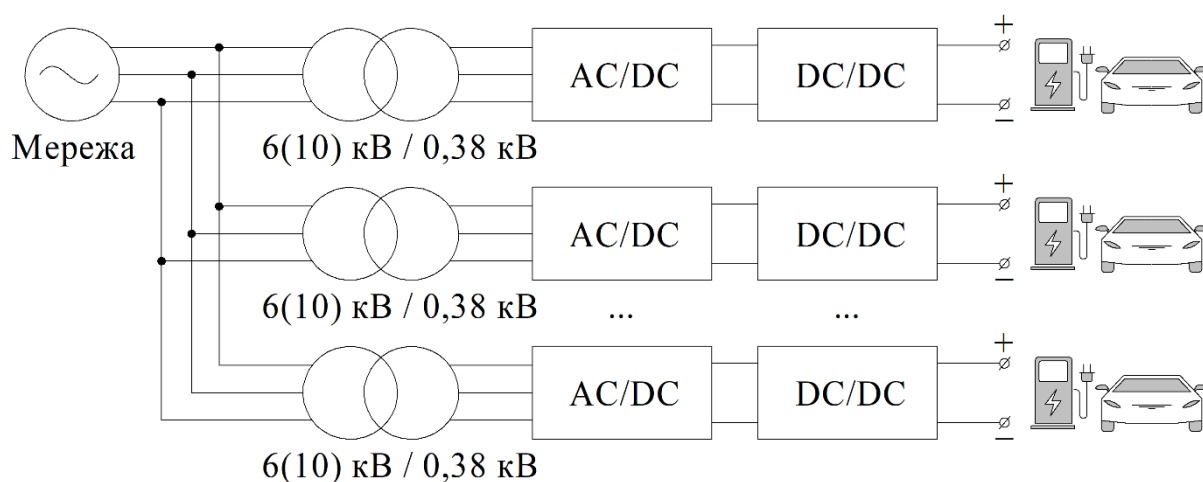


Рисунок 1.10 – Структурна схема традиційної зарядної станції для електромобілів

У даній топології вхідні випрямлячі застосовуються для створення кола постійної напруги. DC/DC-перетворювач регулює напругу і струм заряду кожного електромобіля в заданому діапазоні. У деяких випадках він також використовується для гальванічної розв'язки електромобіля з мережею [70, 74]. Загальним недоліком розглянутих систем є концепція багатоетапного перетворення енергії, що характеризується втратами потужності в двох перетворювачах і, відповідно, зниженням ККД зарядної станції. Кожне з представлених технічних рішень має свої недоліки та не може вважатись повним рішенням існуючої технічної проблеми.

У роботі [73] запропоновано перетворювач для зарядної станції електромобілів, з максимальним значенням ККД 91 %, що є недоліком. Крім того, приведений в роботі перетворювач потребує електромеханічного розчеплення фаз на дев'ятифазну систему живлення, що значно здорожує систему і збільшує її масо-габаритні показники.

У роботі [74] приведено дослідження ККД зарядної станції ЕМ на базі перетворювача типу ІТР (Inductive power transfer converter). Топологію даного перетворювача наведено на рисунку 1.11.

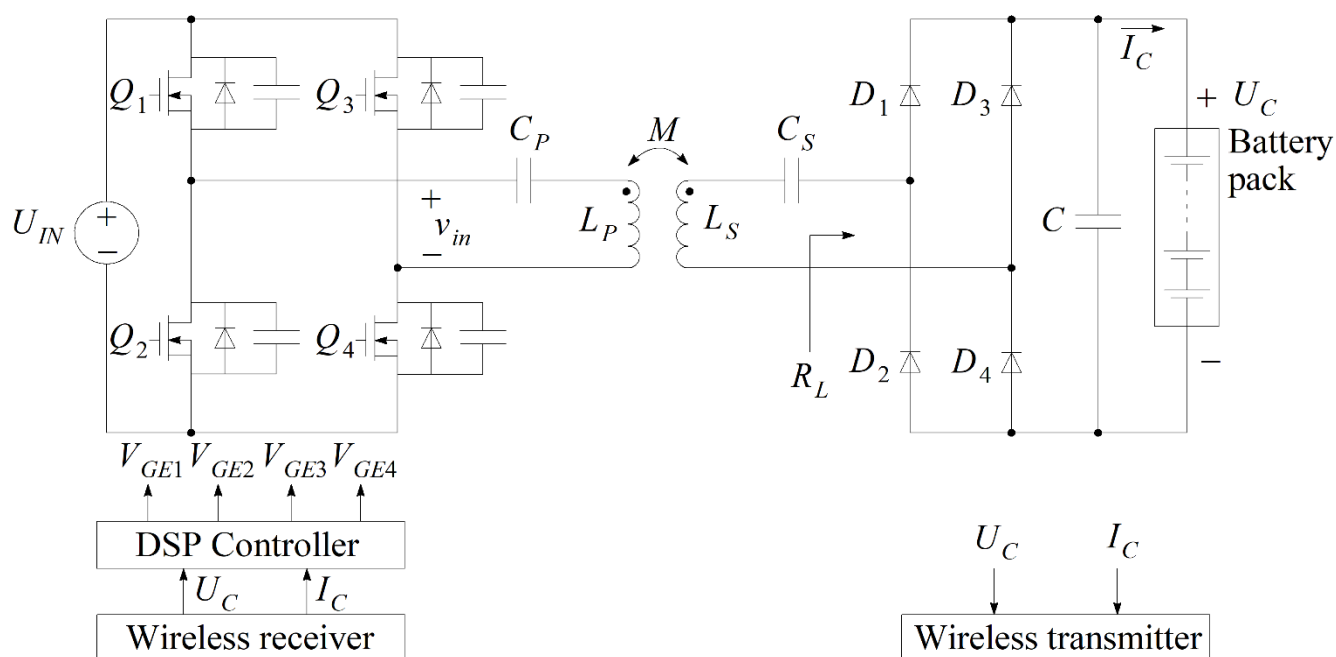


Рисунок 1.11 – Індуктивний перетворювач потужності

Згідно дослідження ККД перетворювача залежить від великої кількості факторів та на певних інтервалах роботи досягають доволі низьких показників від 45 до 50%. Крім цього, в роботі відсутні дані щодо інтегрального значення ККД повного процесу заряду батареї електромобіля.

У роботах [75, 76] приведено дослідження перетворювача типу ІТР, який відрізняється від перетворювача [38] повністю керованими силовими транзисторами замість діодного моста. Згідно з дослідженням, ККД перетворювача при використанні силових транзисторів на базі карбіду кремнія (SiC) та арсеніду галія (GaN) знаходиться в діапазоні від 83 до 98 % їх детальне порівняння наведено у [76]. Варто зазначити, що транзистори на базі SiC та GaN значно дорожче класичних MOSFET, або IGBT-транзисторів. В роботі відсутні дані інтегрального значення ККД повного процесу заряду.

У роботах [77, 78] приведено дослідження напівмостового ІТР-перетворювача (дивись рисунок 1.12). Згідно з дослідженнями, ККД перетворювача визначалось на експериментальному зразку потужністю 900 Вт і досягало від 92 % до 95,6 %, що є досить високим показником. Проте процес заряду електро-

мобіля потужністю 900 Вт може тривати занадто довго, а даних щодо ККД даного перетворювача при реалізації більшої потужності відсутні.

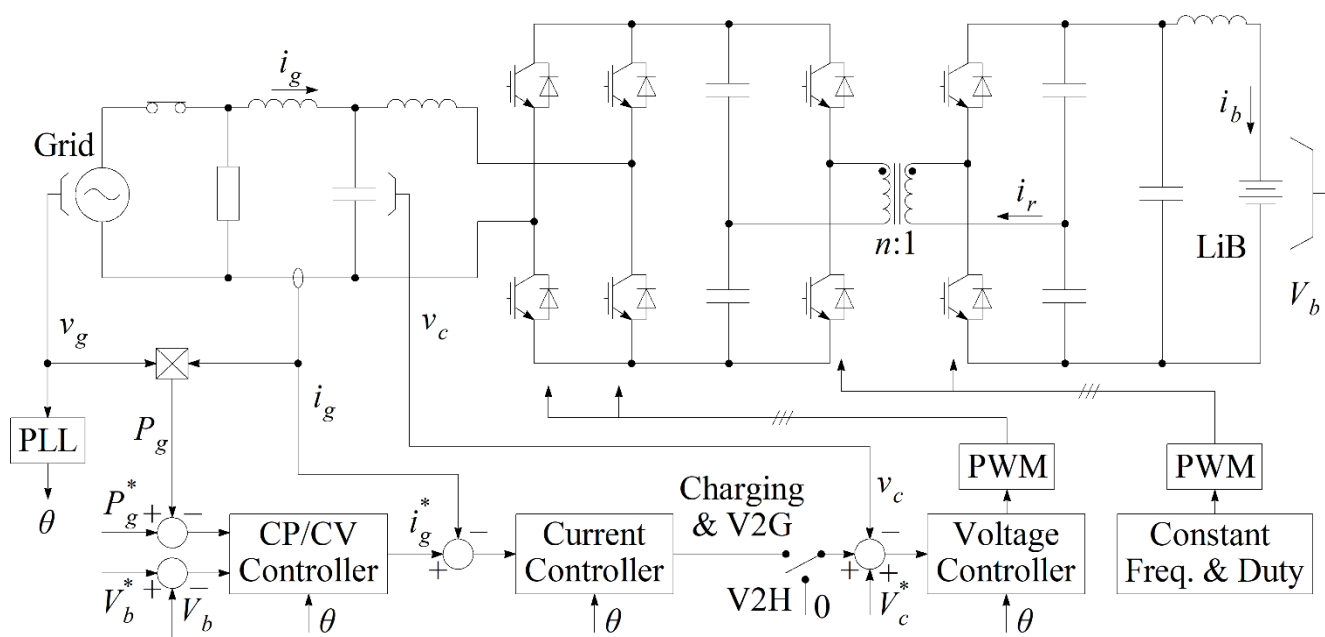


Рисунок 1.12 – Зарядна станція електромобіля на базі напівмостового ІТР-перетворювача

У роботі [81] приведено дослідження ККД зарядної станції електромобілів на базі перетворювача, що складається з випрямляча та паралельного триканального buck-boost перетворювача (дивись рисунок 1.13). Недоліком цієї топології є відсутність гальванічної розв'язки джерела живлення з навантаженням. Крім цього, згідно дослідження, пікове значення ККД перетворювача досить низьке (менше 92 %). В роботі також відсутні дані щодо інтегрального значення ККД повного процесу заряду батареї ЕМ.

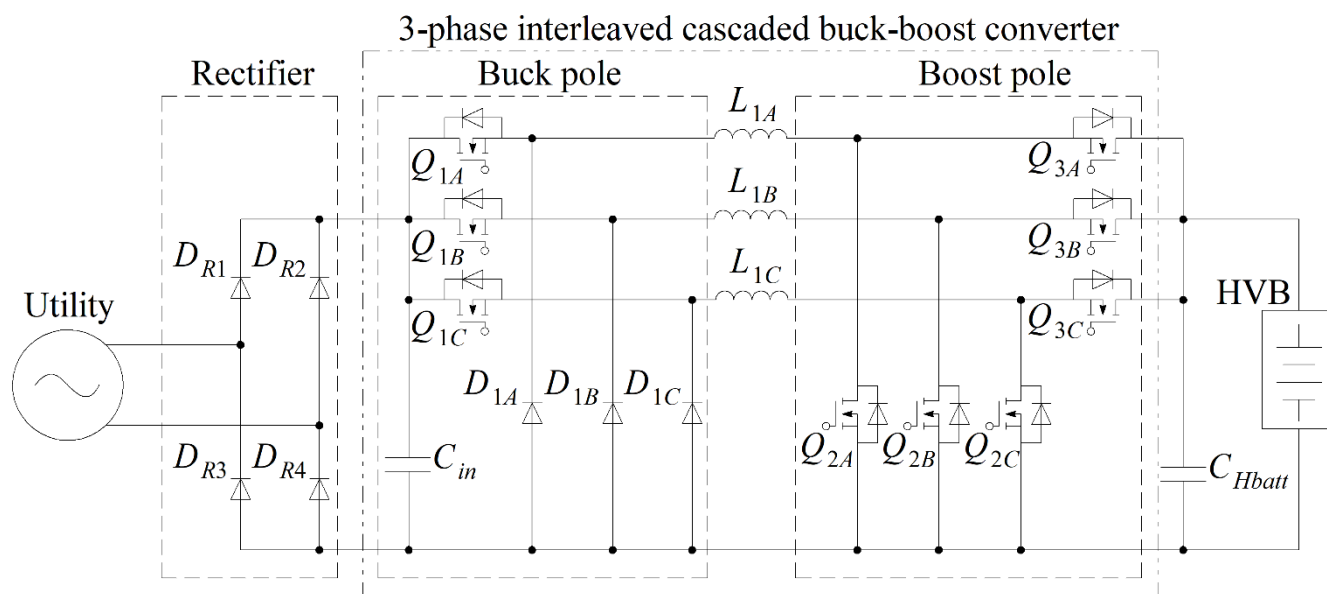


Рисунок 1.13 – Триканальний buck-boost перетворювач для заряду електромобіля

У таблиці 1.9 наведено характеристики деяких доступних у продажу швидких зарядних пристроїв. Переважна більшість наявних у продажу агрегатів оцінюються в 50 кВт потужності і живляться від трифазної розподільної мережі.

Багатоканальні зарядні пристрої, як правило, складаються з однакових блоків перетворювачів, потужність яких поєднується для задоволення необхідних потреб в електроенергії. У всіх випадках процес зарядки дотримується послідовності подій, визначених протоколом зарядки. Послідовність процесу заряду зарядки зазвичай починається з передачі сигналу, перевірки стану заряду батареї та обміну максимальних параметрів зарядки між автомобілем та зарядним пристроєм [67, 85].

Якщо всі необхідні критерії виконані, автомобіль закриває контактор і заряджання починається. Під час процесу зарядки транспортний засіб та зарядний пристрій обмінюються інформацією про бажаний опір струму та напруги. Крім того, система керування акумулятором автомобіля оновлює зарядний пристрій на стан заряду акумулятора (*SoC*) та інші системні параметри, які можуть відображатися в інтерфейсі людина-машина (human-machine interface – HMI). Коли акумулятор досягає певної заданої *SoC*, автомобіль подає сигнал зарядному пристрою

припинити зарядку, зменшивши струм зарядки до нуля. Потім автомобіль відключається від зарядного пристрою, відкриваючи контактор постійного струму.

Таблиця 1.9 – Характеристики зовнішніх зарядних станцій

Виробник та модель	ABB Terra 53	TritiumVeefil-RT	TeslaSuper-charger	EVTEC espresso&charge	ABB Terra HP
Номінальна потужність, кВт	50	50	135	150	350
Стандарт заряду	CCS Type 1 CHAdeMO	CCS Types 1 and 2 CHAdeMO	Super-charger	SAE Combo 1 CHAdeMO	SAE Combo 1 CHAdeMO 1.2
Напруга живлення	480 VAC	380-480 VAC 600-900 VDC	200-480 VAC	50-400 VAC	400 VAC
Вихідна напруга постійного струму, В	200-500 50-500	200-500 50-500	50-410	170-940	150-920
Вихідний постійний струм, А	125	125	330	400	375
Коефіцієнт потужності	>0.96	>0.99	-	>0.99	0.97
ККД, %	94	92	92	93	95

З таблиці видно, що ККД зарядних станцій не перевищує 95 %. Окрім загальних недоліків в розглянутих роботах, слід зазначити, що ККД оцінювався при сталому значенні струму заряду, а інтегральне значення реалізованого ККД зарядною системою під час повного інтервалу заряду взагалі не оцінювалося.

Висновки до розділу 1

1. Розглянуто вимоги міжнародних стандартів, щодо класифікації зарядних станцій за потужністю. Виділено і класифіковано чотири типи зарядних станцій, з яких перший тип описує процес заряду електромобіля, безпосередньо, від однофазної мережі живлення; другий тип відрізняється від першого наявністю електричного захисту; третій тип – заряд електромобіля трифазною напругою змінного струму; четвертий тип – заряд постійним струмом та великою потужністю, що дозволяє швидше проводити процес заряду

2. Проаналізовано вимоги вітчизняних та міжнародних стандартів щодо електромагнітної сумісності, а саме норми емісії вищих гармонік струмів, спожитих зарядними станціями.

3. Проведено огляд технічних характеристик акумуляторних батарей, особливості алгоритму їх заряджання, що висувують вимогу автоматичного регулювання вихідної напруги та вихідного струму зарядної станції.

Представлено класифікацію електромобілів і проведено огляд технічних характеристик акумуляторних батарей та їх систем заряду. Найбільш перспективними є літій-іонні акумулятори. Можна виділити такі переваги: високі ККД в процесі заряду-розряду та щільність електричної енергії (кВт·год/кг).

4. Проведено аналіз схем напівпровідникових перетворювачів зарядних станцій, який показав, що питання покращення енергоефективності зарядних станцій електромобілів є актуальним і потребує подальшого вдосконалення.

Розділ 2

СИНТЕЗ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ЗАРЯДНОЇ СТАНЦІЇ ТА АКУМУЛЯТОРНОГО ВІДСІКУ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ

2.1 Запропонована схема перетворювальної системи заряду для електромобілів

Досліджуваний зарядний пристрій використовується при режимі зарядки електромобіля по типу Mode 4 і застосовується для швидкої зарядки постійним струмом [8, 18, 71]. Бортові зарядні пристрої є зручними для водіїв електромобілів, тому що дозволяють заряджати акумулятори від загальнопромислової мережі. Однак, вони збільшують об'єм та вагу електромобіля і споживають більше електроенергії при русі. Для підтримки ефективності роботи електромобіля потрібний компактний зарядний пристрій з високою питомою потужністю [66, 67].

Традиційна зарядна станція швидкої зарядки, як правило, складається з двох стадій, а саме перетворювача АС / DC і вихідного перетворювача DC / DC (дивись рисунок 1.10). Що говорить про те, що є змога регулювати вихідну напругу відповідно до широкого діапазону акумулятора (280-400 В) для різних ЕМ.

У комерційних швидких зарядних пристроях вихідний перетворювач постійного струму призначений для використання в якості перетворювача з гальванічною розв'язкою, де для ізоляції необхідний високочастотний трансформатор. Однак ефективність такої зарядної станції менше за рахунок присутності ланки DC / DC [68, 69].

Запропонований зовнішній зарядний пристрій електромобіля базується на використанні активного трифазного чотирикватратного випрямляча. Даний тип перетворювачів було розглянуто в роботах [63, 72, 84, 94, 95], проте при реалізації зарядної станції його робота зумовлює ряд особливостей, які були досліджені в подальших розділах.

Запропонована одноступенева структура АС / DC замінює двоступеневу структуру з більш низькою вартістю і більшою ефективністю (дивись рисунок 2.1).

В якості АС / DC-перетворювача зарядної станції пропонується активний трифазний чотириквADRантний випрямляч з корекцією коефіцієнта потужності. При цьому активний випрямляч (АВ) може бути побудований за дворівневою схемою. Передбачається, що одноступенева структура має на 2 % вищий ККД порівняно з традиційною двоступеневою структурою [70, 71].

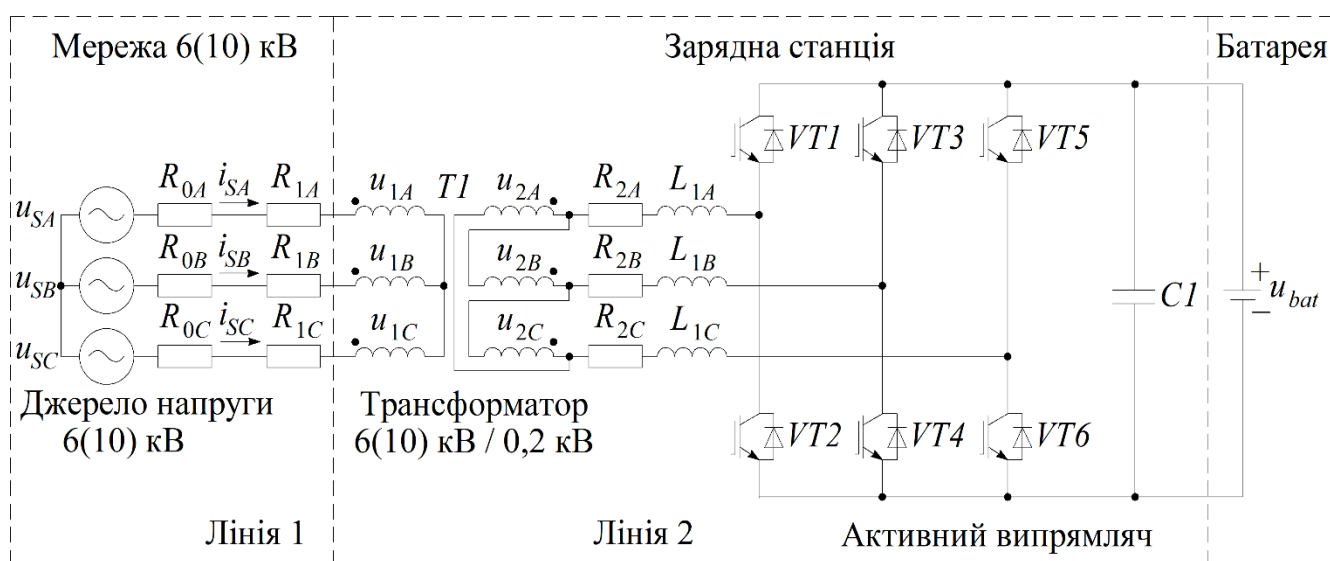


Рисунок 2.1 –Запропонована топологія зарядної станції

Переваги запропонованої зарядної станції з активним випрямлячем:

- високий коефіцієнт потужності, близький до одиниці;
- низький коефіцієнт гармонічних спотворень споживаного струму ($\text{THD} < 5\%$);
- вищий ККД відносно двоступеневих зарядних станцій типу АС / DC – DC / DC;
- можливість забезпечення двосторонньої передачі енергії.

Крім цього, на відміну від раніше розглянутих топологій запропонована зарядна станція не містить додаткової ланки перетворення енергії – DC / DC-

перетворювача, що призводить до меншої кількості стадій перетворення енергії і кращих показників ефективності.

Американський науково-дослідний інститут електроенергії (EPRI) займається розробкою технічних рішень, що дозволять виконати інтеграцію акумуляторних батарей електромобілів до електричних розподільних мереж в якості інтелектуальних накопичувачів. Глобально така концепція двосторонньої передачі електроенергії від електромобіля до електричної мережі отримала назву «Vehicle-to-Grid» або абревіатура V2G [77] (дивись рисунок 2.2).

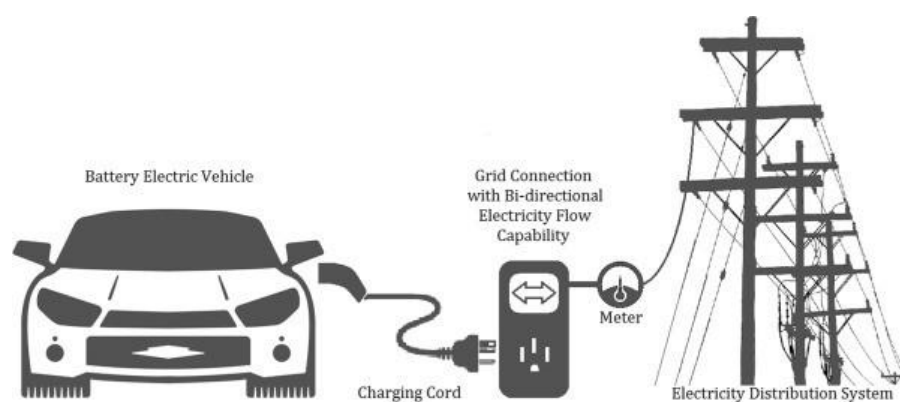


Рисунок 2.2 – Реалізація технічного рішення V2G

Vehicle-to-Grid (V2G) – це концепція, яка дозволяє електромобілям вводити енергію в мережу, може також сприяти стабілізації незбалансованих потужностей в мережі у години пік або навіть забезпечувати електричну енергію для аварійного резервування під час відключення електроенергії. Електромобілі підключені до однієї електричної мережі налаштовуються таким чином, щоб стати розподіленим енергетичним ресурсом, тобто енергетичним буфером. Електромобілі та зарядні станції для них – це новий напрям у широкій системі розподілення енергетичними ресурсами, який є актуальним для систем з імпульсною (змінною) генерацією електроенергії, таких як сонячних фотоелектричних систем, малопотужних вітрових турбін, газових мікротурбін та інших розподільних генерацій [64, 92]. Таким чином, електромобіль може бути сховищем та підвищувати рівень енергії в системі електрозабезпечення [33, 34].

Найбільш вагомим бар'єром на шляху до реалізації внеску програм V2G є відсутність інфраструктури, яка б стимулювала посилення прийняття електромобílів і деякого опору комунальних підприємств використовувати електромобílі, так як вони не володіють ними.

Отже, здатність двонаправленого потоку енергії призводить до ефективного розподілу як генерованої, так і споживаної електричної енергії. Швидка зарядка постійного струму є кращою для впровадження архітектури V2G в мікромережу через швидку передачу електроенергії, необхідну при використанні електроживлення для накопичення енергії. Також, шина постійного струму може використовуватися для інтеграції відновлюваних джерел генерації в систему [51, 64], а також реалізації інтелектуальний систем електропостачання Smart Grid [40, 41, 54].

2.2 Математична модель трифазного активного випрямляча напруги з широтно-імпульсною модуляцією

Для розробки відповідного перетворювача для будь-якої установки важливим є проведення математичного опису електромагнітних процесів, що протікають в ньому. Подання об'єкта в математичній формі призводить до зручності аналізу і проектування перетворювача. У цьому розділі представлено математичну модель трифазного ШІМ-перетворювача джерела напруги змінного струму в постійний для несиметричних робочих умов.

Щоб точно описати поведінку ШІМ-випрямляча при несиметричній напрузі живлення, важливо мати справу з вхідними напругами прямої послідовності і вхідними напругами зворотної послідовності окремо.

Порівнюючи з традиційними підходами до моделювання ШІМ-випрямляча в [44, 45], в цьому розділі пропонується нова математична модель в позитивних і негативних обертових синхронних координатах. Актуальним є дослідження гармонік парного порядку при напрузі проміжного контуру і гармонік непарного порядку на стороні лінії струмів в незбалансованих режимах роботи.

Оскільки більшість схем керування, пропонованих для усунення гармонік в напрузі кола постійного струму, засновані на регулюванні миттєвого потоку потужності перетворювача активного випрямляча, необхідно мати чітке уявлення про миттєву потужність при несиметричній напрузі живлення [46, 47]. Досліди, щодо покращення гармонійного складу вихідної напруги можна побачити у [79, 86, 87, 91, 93]. В цьому розділі досліджується прямий взаємозв'язок між миттєвою вихідною потужністю і пульсаціями напруги кола постійного струму. Крім того, аналітичне дослідження миттєвого потоку потужності дає пояснення виникнення гармонік непарного порядку в струмах на стороні мережі трифазного випрямляча з ШІМ в незбалансованих робочих умовах.

На рисунку 2.3 наведено конфігурацію силового кола трифазного перетворювача напруги змінного струму в постійний з ШІМ.

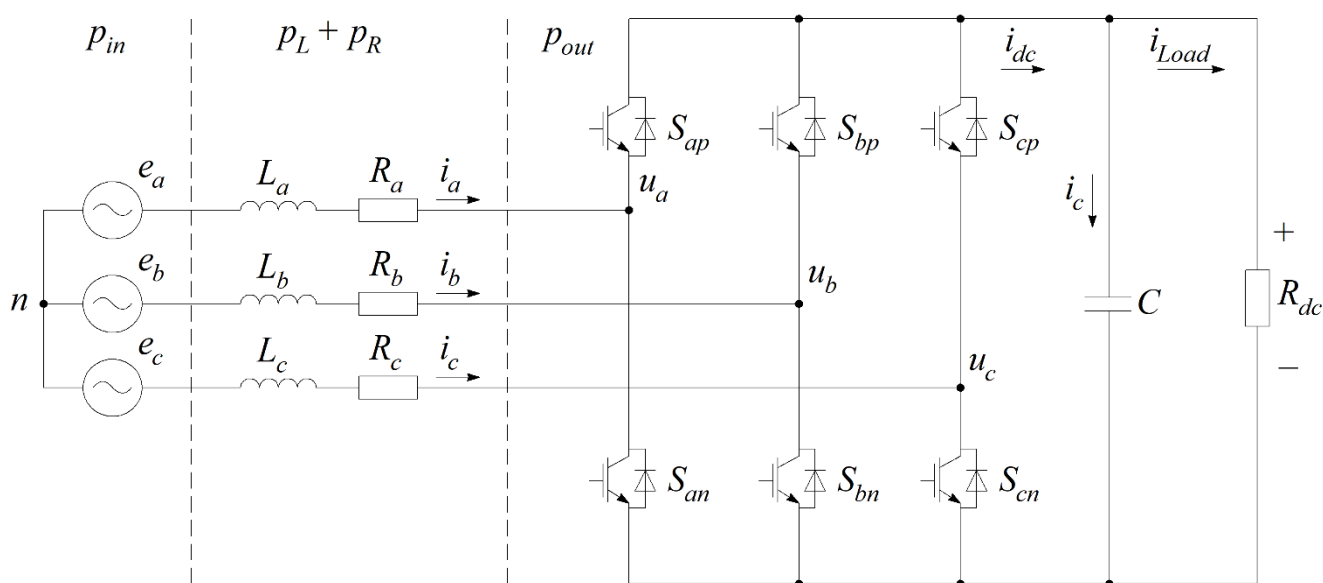


Рисунок 2.3 – Схема перетворювача трифазного джерела напруги AC-DC

Передбачається, що перетворювач живить резистивне навантаження. Диференціальні рівняння для фазних напруг на стороні мережі змінного струму можуть бути виражені як

$$e_a = L \frac{di_a}{dt} + R \cdot i_a + u_{an}; \quad (2.1)$$

$$e_b = L \frac{di_b}{dt} + R \cdot i_b + u_{bn}; \quad (2.2)$$

$$e_c = L \frac{di_c}{dt} + R \cdot i_c + u_{cn}. \quad (2.3)$$

З огляду на те, що сума фазних струмів у трифазній системі дорівнює нулю, $i_a + i_b + i_c = 0$, група рівнянь (2.1-2.3) може бути спрощена до дворядкових рівнянь напруги:

$$e_{ab} = e_a - e_b = L \frac{di_a}{dt} - L \frac{di_b}{dt} + R \cdot i_a - R \cdot i_b + u_{an} - u_{bn}; \quad (2.4)$$

$$e_{bc} = e_b - e_c = L \frac{di_b}{dt} - L \frac{di_c}{dt} + R \cdot i_b - R \cdot i_c + u_{bn} - u_{cn}. \quad (2.5)$$

Відповідно до принципів перетворювача джерела напруги співвідношення між напругами на клеммах і середніми сигналами перемикавання може бути виражено як:

$$u_{an} = S_a \cdot u_{dc}; \quad (2.6)$$

$$u_{bn} = S_b \cdot u_{dc}; \quad (2.7)$$

$$u_{cn} = S_c \cdot u_{dc}. \quad (2.8)$$

Отже, рівняння (2.4) та (2.5) можуть бути зведені в матричний формат:

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & 0 \\ 0 & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \cdot x + \begin{bmatrix} \frac{2}{3L} & \frac{1}{3L} \\ -\frac{1}{3L} & \frac{1}{3L} \end{bmatrix} \cdot e + \begin{bmatrix} -\frac{u_{dc}}{L} & 0 \\ 0 & -\frac{u_{dc}}{L} \end{bmatrix} \cdot u, \quad (2.9)$$

де

$$x = [i_a \quad i_b]^T;$$

$$e = [e_{ab} \quad e_{bc}]^T;$$

$$u = [S_a \quad S_b]^T.$$

Лінійні напруги e_{ab} , e_{bc} , вхідні струми i_a , i_b і середні функції перемикавання S_a , S_b можуть бути замінені на e_α , e_β , i_α , i_β і S_α , S_β відповідно з використанням відповідних форм перетворення Парка.

Дана модель може бути представлена в стаціонарній нерухомій α - β системі координат, як:

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & 0 \\ 0 & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \cdot x + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L} \end{bmatrix} \cdot e + \begin{bmatrix} -\frac{u_{dc}}{L} & 0 \\ 0 & -\frac{u_{dc}}{L} \end{bmatrix} \cdot u, \quad (2.10)$$

де

$$x = [i_\alpha \quad i_\beta]^T;$$

$$e = [e_\alpha \quad e_\beta]^T;$$

$$u = \begin{bmatrix} S_\alpha & S_\beta \end{bmatrix}^T.$$

Незбалансована змінна трифазної системи може бути розділена на три змінні в трифазних збалансованих системах, а саме, складову прямої послідовності, складову зворотної послідовності і складову нульової послідовності.

Оскільки нейтральна точка на рисунку 2.1 не підключена до негативного боку шини постійного струму, компонент нульової послідовності відсутній. Таким чином, просторовий вектор неврівноважених трифазних змінних в стаціонарній системі $\alpha\beta$ може бути представлений як сума просторових векторів компонентів позитивної послідовності $x_{\alpha\beta}^p$ і негативної $x_{\alpha\beta}^n$, компонентів послідовності $x_{\alpha\beta}$, як наведено на рисунку 2.4.

Отже, модель трифазного випрямляча з ШІМ може складатися з однієї частини в позитивній системі координат $\alpha\beta$, а іншої – в негативній системі координат $\alpha\beta$:

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_\alpha^p \\ \dot{i}_\beta^p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & 0 \\ 0 & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_\alpha^p \\ i_\beta^p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} e_\alpha^p \\ e_\beta^p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{u_{dc}}{L} & 0 \\ 0 & -\frac{u_{dc}}{L} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_\alpha^p \\ S_\beta^p \end{bmatrix}; \quad (2.11)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_\alpha^n \\ \dot{i}_\beta^n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & 0 \\ 0 & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_\alpha^n \\ i_\beta^n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} e_\alpha^n \\ e_\beta^n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{u_{dc}}{L} & 0 \\ 0 & -\frac{u_{dc}}{L} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_\alpha^n \\ S_\beta^n \end{bmatrix}. \quad (2.12)$$

Перетворення системи координат bs в dq може бути виконано за допомогою виразу:

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \\ u_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\omega t) & -\sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

Діаграма незбалансованих трифазних змінних в dq - системі координат представлено на рисунку 2.4.

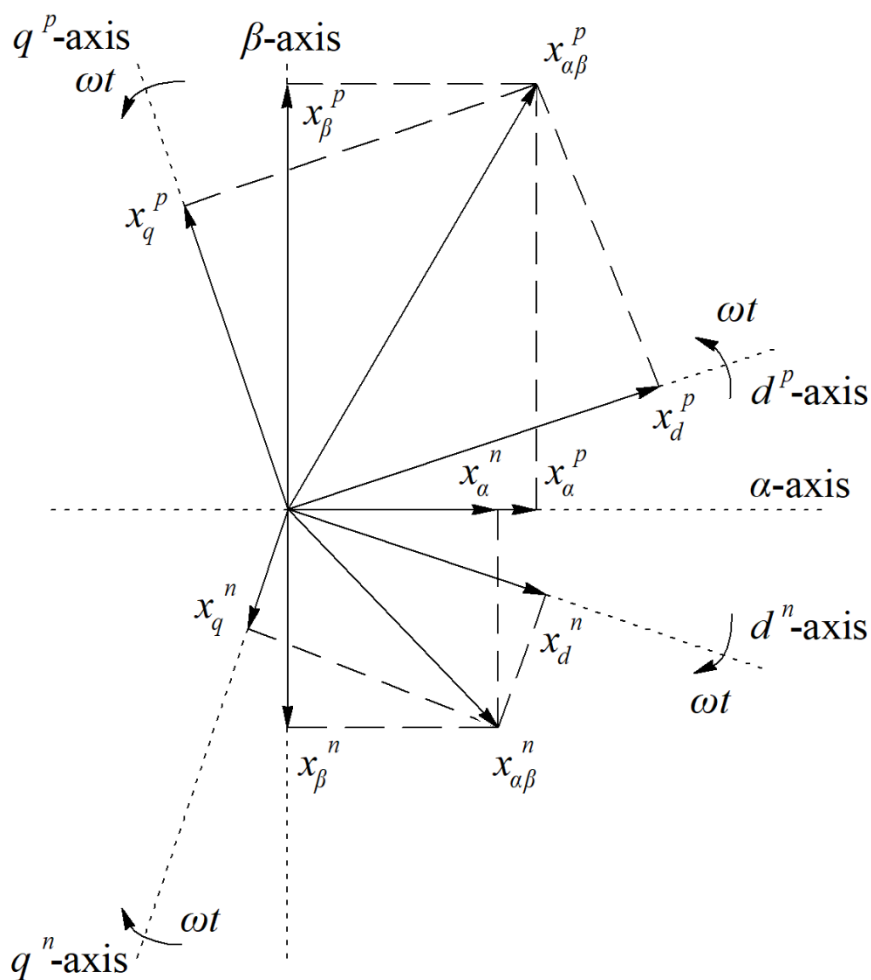


Рисунок 2.4 – Діаграма незбалансованих трифазних змінних

Оскільки рівняння прямої і зворотної послідовності в підвищувальних випрямлячах з ШІМ складають ортогональну систему рівнянь, ці дві системи рів-

нянь можуть виконувати перетворення окремо. Як показано на рисунку 2.5, просторові вектори $x_{\alpha\beta}^p$ і $x_{\alpha\beta}^n$ можуть бути перетворені в систему координат d - q позитивного і негативного синхронного обертання. Отже, модель прямої послідовності в просторі станів для трифазного ШІМ-випрямляча в синхронній системі d - q обертання з позитивним обертанням може бути отримана з виразу (2.10):

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_d^p \\ \dot{i}_q^p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & 0 \\ 0 & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_d^p \\ i_q^p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} e_d^p \\ e_q^p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{u_{dc}}{L} & 0 \\ 0 & -\frac{u_{dc}}{L} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_d^p \\ S_q^p \end{bmatrix}. \quad (2.14)$$

Точно так рівняння зворотної послідовності можуть бути отримані в синхронній системі координат d - q з негативним обертанням:

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_d^n \\ \dot{i}_q^n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & 0 \\ 0 & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_d^n \\ i_q^n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} e_d^n \\ e_q^n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{u_{dc}}{L} & 0 \\ 0 & -\frac{u_{dc}}{L} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_d^n \\ S_q^n \end{bmatrix}. \quad (2.15)$$

З рисунку 2.4 можна отримати рівняння стану на стороні кола постійного струму і записати його в такий спосіб:

$$C \frac{du_{dc}}{dt} = i_{dc} - i_{Load} = i_{dc} - \frac{u_{dc}}{R_{dc}}. \quad (2.16)$$

Струм кола постійного струму i_{dc} може бути виражений через вхідні фазні струми i_a, i_b, i_c і середні функції перемикування S_a, S_b, S_c як:

$$i_{dc} = S_a \cdot i_a + S_b \cdot i_b + S_c \cdot i_c. \quad (2.17)$$

Після застосування перетворення Кларка струм кола постійного струму може бути виражений в нерухомій системі координат α - β як:

$$i_{dc} = S_{\alpha} \cdot i_{\alpha} + S_{\beta} \cdot i_{\beta}. \quad (2.18)$$

Спираючись на векторну діаграму на рисунку 2.5, можна виразити струм $\vec{i}_s$ в форматі просторового вектора, потім перетворити його в обертальну синхронну систему координат d - q , і визначити θ як ωt :

$$\begin{aligned} \vec{i}_s &= i_{\alpha} + j \cdot i_{\beta} = (i_{\alpha}^p + j \cdot i_{\beta}^p) + (i_{\alpha}^n + j \cdot i_{\beta}^n) = e^{j\theta} \cdot (i_d^p + j \cdot i_q^p) + e^{-j\theta} \cdot (i_d^n + j \cdot i_q^n) = \\ &= (\cos \theta \cdot i_d^p - \sin \theta \cdot i_q^p + \cos \theta \cdot i_d^n + \sin \theta \cdot i_q^n) + j \cdot (\sin \theta \cdot i_d^p + \cos \theta \cdot i_q^p - \sin \theta \cdot i_d^n + \cos \theta \cdot i_q^n) \end{aligned} \quad (2.19)$$

Таким же чином можна перетворити середні функції перемикавання S_{α} , S_{β} :

$$\begin{aligned} S_{\alpha} + j \cdot S_{\beta} &= e^{j\theta} \cdot (S_d^p + j \cdot S_q^p) + e^{-j\theta} \cdot (S_d^n + j \cdot S_q^n) = \\ &= (\cos \theta \cdot S_d^p - \sin \theta \cdot S_q^p + \cos \theta \cdot S_d^n + \sin \theta \cdot S_q^n) + \\ &+ j \cdot (\sin \theta \cdot S_d^p + \cos \theta \cdot S_q^p - \sin \theta \cdot S_d^n + \cos \theta \cdot S_q^n). \end{aligned} \quad (2.20)$$

Вирази для i_{α} , i_{β} , S_{α} і S_{β} можуть бути отримані з дійсної та уявної частин:

$$i_{\alpha} = \cos \theta \cdot i_d^p - \sin \theta \cdot i_q^p + \cos \theta \cdot i_d^n + \sin \theta \cdot i_q^n; \quad (2.21)$$

$$i_{\beta} = \sin \theta \cdot i_d^p + \cos \theta \cdot i_q^p - \sin \theta \cdot i_d^n + \cos \theta \cdot i_q^n; \quad (2.22)$$

$$S_{\alpha} = \cos \theta \cdot S_d^p - \sin \theta \cdot S_q^p + \cos \theta \cdot S_d^n + \sin \theta \cdot S_q^n; \quad (2.23)$$

$$S_\beta = \sin \theta \cdot S_d^p + \cos \theta \cdot S_q^p - \sin \theta \cdot S_d^n + \cos \theta \cdot S_q^n. \quad (2.24)$$

Підставляючи вирази (2.21) та (2.24) в (2.18), струм i_{dc} на стороні кола постійного струму можна виразити як:

$$\begin{aligned} i_{dc} &= i_\alpha \cdot S_\alpha + i_\beta \cdot S_\beta = \\ &= (i_d^n \cdot \cos 2\theta + i_q^n \cdot \sin 2\theta + i_d^p) \cdot S_d^p + (i_q^n \cdot \cos 2\theta - i_d^n \cdot \sin 2\theta + i_q^p) \cdot S_q^p + \\ &+ (i_d^p \cdot \cos 2\theta - i_q^p \cdot \sin 2\theta + i_d^n) \cdot S_d^n + (i_q^p \cdot \sin 2\theta + i_d^p \cdot \cos 2\theta + i_q^n) \cdot S_q^n. \end{aligned} \quad (2.25)$$

Коли випрямляч з ШІМ працює в збалансованому стані, тобто всі змінні в зворотній послідовності дорівнюють нулю, можна записати:

$$\dot{i}_{dc} = -\frac{1}{C \cdot R_{dc}} \cdot u_{dc} + \frac{1}{C} \cdot (i_d^p \cdot S_d^p + i_q^p \cdot S_q^p). \quad (2.26)$$

Напругу в колі постійного струму можна представити як:

$$C \dot{i}_{dc} = -\frac{u_{dc}}{R_{dc}} + \begin{bmatrix} i_d^n \cdot \cos 2\theta + i_q^n \cdot \sin 2\theta + i_d^p \\ i_q^n \cdot \cos 2\theta - i_d^n \cdot \sin 2\theta + i_q^p \\ i_d^p \cdot \cos 2\theta - i_q^p \cdot \sin 2\theta + i_d^n \\ i_d^p \cdot \sin 2\theta + i_q^p \cdot \cos 2\theta + i_q^n \end{bmatrix}' \cdot \begin{bmatrix} S_d^p \\ S_q^p \\ S_d^n \\ S_q^n \end{bmatrix}. \quad (2.27)$$

У збалансованому стані i_d^p і i_q^p включають тільки постійні значення в стійкому стані. Тому вираз (2.26) вказує, що u_{dc} містить тільки величину постійного струму, і це рівняння відповідає звичайному рівнянню при збалансованих робочих умовах:

$$C \frac{du_{dc}}{dt} = (i_d^p \cdot S_d^p + i_q^p \cdot S_q^p) - i_{dc}. \quad (2.28)$$

Більш того, рівняння (2.27) дає більше деталей і більш ясну картину про модель випрямляча з ШІМ в незбалансованому робочому стані:

$$C \frac{du_{dc}}{dt} = (i_d^p \cdot S_d^p + i_q^p \cdot S_q^p + i_d^n \cdot S_d^n + i_q^n \cdot S_q^n) - \frac{u_{dc}}{R_{dc}}. \quad (2.29)$$

Рівняння (2.27) показує наявність гармонічної складової другого порядку на виході випрямляча через наявність складових зворотної послідовності як в струмі, так і в середній функції перемикавання $i_d^n, i_q^n, S_d^n, S_q^n$.

На практиці умови несиметричного живлення часто виникають в мережі, особливо в слабкій системі змінного струму. Це може бути викликано однофазними навантаженнями в системі, які нерівномірно розподілені між трьома фазами, або несиметричними опорами обмотки трансформатора або передачі, розімкнутої зіркою, розімкненим трикутником і т. п.

Незалежно від причин продуктивність трифазного випрямляча з ШІМ погіршується через появу напруги зворотної послідовності в умовах несиметричної вхідної напруги. Щоб зберегти всі переваги випрямляча з ШІМ в несиметричних робочих умовах, необхідно розуміти, яким чином компоненти зворотної послідовності напруги живлення генерують гармоніки другого порядку при напрузі постійного струму.

Як правило, напруги живлення e_a, e_b і e_c від мережі можуть бути розділені як складові прямої послідовності e_a^p, e_b^p, e_c^p і компоненти зворотної послідовності e_a^n, e_b^n, e_c^n . Компоненти зворотної послідовності як за струмом, так і за середньою функцією перемикавання $i_d^n, i_q^n, S_d^n, S_q^n$.

З огляду на що, середні функції перемикавання постійні $S_d^n, S_q^n, S_d^p, S_q^p$, струми зворотної послідовності і середня функція перемикавання викличуть гармонічну складову другого порядку при напрузі проміжного контуру. Відповідно, складові гармоніки другого порядку в напрузі проміжного контуру викличуть гармоніку другого порядку в струмах на стороні змінного струму $i_d^n, i_q^n, i_d^p, i_q^p$, що призводить до вищих гармонік парного порядку при постійній напрузі. Отже, бічні струми змінного струму в позитивній та негативній $i_d^n, i_q^n, i_d^p, i_q^p$ синхронних оберткових системах координат будуть включати всі гармоніки парного порядку, які можна записати як:

$$i_d^p(t) = I_{d0}^p + \sum_{h=2k, k=1} I_{dh}^p \cdot \sin(h \cdot \omega t + \phi_{dh}^p); \quad (2.30)$$

$$i_q^p(t) = I_{q0}^p + \sum_{h=2k, k=1} I_{qh}^p \cdot \sin(h \cdot \omega t + \phi_{qh}^p); \quad (2.31)$$

$$i_d^n(t) = I_{d0}^n + \sum_{h=2k, k=1} I_{dh}^n \cdot \sin(h \cdot \omega t + \phi_{dh}^n); \quad (2.32)$$

$$i_q^n(t) = I_{q0}^n + \sum_{h=2k, k=1} I_{qh}^n \cdot \sin(h \cdot \omega t + \phi_{qh}^n), \quad (2.33)$$

де $I_{d0}^p, I_{q0}^p, I_{d0}^n, I_{q0}^n$ – змінні, що представляють собою величину постійного струму на стороні змінного струму;

$\phi_{dh}^p, \phi_{qh}^p, \phi_{dh}^n, \phi_{qh}^n$ – фазові кути гармонічних складових h -го порядку бічних струмів прямої та зворотної послідовності в обертальній системі координат $d-q$ відповідно.

Отже, постійний струм i_{dc} може мати гармоніки парного порядку, які можна виразити як:

$$i_{dc}(t) = I_0 + \sum_{h=2k, k=1} I_{rh} \cdot \sin(h \cdot \omega t + \phi_{ih}), \quad (2.34)$$

де I_0 – величина постійного струму;

I_{rh} – амплітудні кути гармонічних складових h -го порядку в струмі проміжного кола;

ϕ_{ih} – фазові кути гармонічних складових h -го порядку в струмі проміжного кола.

Насправді, амплітуда вищих гармонічних складових змінного струму на стороні мережі буде зменшуватися зі збільшенням порядку гармоніки. Отже, щоб спростити процес проходження змінного струму $i_d^n, i_q^n, i_d^p, i_q^p$ враховуються тільки гармоніки другого порядку. Відповідно, постійний струм i_{dc} на стороні постійного струму буде включати гармоніку четвертого порядку:

$$i_{dc}(t) = I_0 + I_{r2\sin} \cdot \sin(2 \cdot \omega t) + I_{r2\cos} \cdot \cos(2 \cdot \omega t) + I_{r4\sin} \cdot \sin(4 \cdot \omega t) + I_{r4\cos} \cdot \cos(4 \cdot \omega t); \quad (2.35)$$

$$I_{r2\sin} = I_{r2} \cdot \cos \phi_{i2}; \quad (2.36)$$

$$I_{r2\cos} = I_{r2} \cdot \sin \phi_{i2}; \quad (2.37)$$

$$I_{r4\sin} = I_{r4} \cdot \cos \phi_{i4}; \quad (2.38)$$

$$I_{r4\cos} = I_{r4} \cdot \sin \phi_{i4}. \quad (2.39)$$

Величину постійного струму I_0 можна записати як:

$$I_0 = S_d^p \cdot I_{d0}^p + S_q^p \cdot I_{q0}^p + S_d^n \cdot I_{d0}^n + S_q^n \cdot I_{q0}^n +$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{1}{2} \cdot S_d^p \cdot (I_{d2}^n \cdot \sin \theta_{d2}^n + I_{q2}^n \cdot \cos \theta_{q2}^n) + \frac{1}{2} \cdot S_q^p \cdot (I_{q2}^n \cdot \sin \theta_{q2}^n - I_{d2}^n \cdot \cos \theta_{d2}^n) + \\
& + \frac{1}{2} \cdot S_d^n \cdot (I_{d2}^p \cdot \sin \theta_{d2}^p - I_{q2}^p \cdot \cos \theta_{q2}^p) + \frac{1}{2} \cdot S_q^n \cdot (I_{q2}^p \cdot \sin \theta_{q2}^p + I_{d2}^p \cdot \cos \theta_{d2}^p). \quad (2.40)
\end{aligned}$$

Амплітуди гармонічних складових другого і четвертого порядку для членів $\sin$ і $\cos$, $I_{r2\sin}$, $I_{r2\cos}$, $I_{r4\sin}$ і $I_{r4\cos}$ можуть бути представлені, відповідно, як:

$$\begin{aligned}
I_{r2\sin} = & S_d^p \cdot I_{q0}^n - S_q^p \cdot I_{d0}^n - S_d^n \cdot I_{q0}^p + S_q^n \cdot I_{d0}^p + \\
& + S_d^p \cdot I_{d2}^p \cdot \cos \phi_{d2}^p + S_q^p \cdot I_{q2}^p \cdot \cos \phi_{q2}^p + S_d^n \cdot I_{d2}^n \cdot \cos \phi_{d2}^n + S_q^n \cdot I_{q2}^n \cdot \cos \phi_{q2}^n; \quad (2.41)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
I_{r2\cos} = & S_d^p \cdot I_{q0}^n + S_q^p \cdot I_{d0}^n + S_d^n \cdot I_{q0}^p + S_q^n \cdot I_{d0}^p + \\
& + S_d^p \cdot I_{d2}^p \cdot \sin \phi_{d2}^p + S_q^p \cdot I_{q2}^p \cdot \sin \phi_{q2}^p + S_d^n \cdot I_{d2}^n \cdot \sin \phi_{d2}^n + S_q^n \cdot I_{q2}^n \cdot \sin \phi_{q2}^n; \quad (2.42)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
I_{r4\sin} = & \frac{1}{2} \cdot S_d^p \cdot (I_{d2}^n \cdot \cos \phi_{d2}^p + I_{q2}^n \cdot \sin \phi_{q2}^p) + \frac{1}{2} \cdot S_q^p \cdot (I_{q2}^n \cdot \cos \phi_{q2}^p - I_{d2}^n \cdot \sin \phi_{d2}^p) + \\
& + \frac{1}{2} \cdot S_d^n \cdot (I_{d2}^p \cdot \cos \phi_{d2}^p - I_{q2}^p \cdot \sin \phi_{q2}^p) + \frac{1}{2} \cdot S_q^n \cdot (I_{q2}^p \cdot \cos \phi_{q2}^p + I_{d2}^p \cdot \sin \phi_{d2}^p) \quad (2.43)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
I_{r4\cos} = & \frac{1}{2} \cdot S_d^p \cdot (I_{d2}^n \cdot \sin \phi_{d2}^n - I_{q2}^n \cdot \cos \phi_{q2}^n) + \frac{1}{2} \cdot S_q^p \cdot (I_{q2}^n \cdot \sin \phi_{q2}^n + I_{d2}^n \cdot \cos \phi_{d2}^n) + \\
& + \frac{1}{2} \cdot S_d^n \cdot (I_{d2}^p \cdot \sin \phi_{d2}^p + I_{q2}^p \cdot \cos \phi_{q2}^p) + \frac{1}{2} \cdot S_q^n \cdot (I_{q2}^p \cdot \sin \phi_{q2}^p - I_{d2}^p \cdot \cos \phi_{d2}^p) \quad (2.44)
\end{aligned}$$

В цьому випадку гармоніка четвертого порядку додається до напруги кола постійного струму.

Кінцевою метою керування є подавити напругу гармонік парного порядку для створення постійної вихідної напруги постійного струму. У сталому стані

змінні на стороні постійного струму можуть бути замінені сумою постійного сигналу постійного струму і сигналу пульсації змінного струму:

$$u_{dc} = \bar{u}_{dc} + \Delta u_{dc}; \quad (2.45)$$

$$i_{dc} = \bar{i}_{dc} + \Delta i_{dc}. \quad (2.46)$$

Оскільки сигнал постійного струму з'являється як періодичний сигнал, складова постійного струму $\bar{i}_{dc}$ може бути отримана з інтеграла від i_{dc} за один цикл, що аналогічно виразу (2.40):

$$\bar{i}_{dc} = \frac{\omega}{2\pi} \cdot \int_0^{\frac{2\pi}{\omega}} i_{dc} \cdot dt = I_0; \quad (2.47)$$

$$\begin{aligned} \Delta i_{dc} = & I_{r2\sin} \cdot \sin(2 \cdot \omega t) + I_{r2\cos} \cdot \cos(2 \cdot \omega t) + \\ & + I_{r4\sin} \cdot \sin(4 \cdot \omega t) + I_{r4\cos} \cdot \cos(4 \cdot \omega t). \end{aligned} \quad (2.48)$$

Оскільки навантаження резистивне, $\bar{u}_{dc}$ можна записати як:

$$\bar{u}_{dc} = R_{dc} \cdot \bar{i}_{dc} = R_{dc} \cdot I_0. \quad (2.49)$$

Підставляючи вирази (2.47) і (2.49) в (2.16) і скорочуючи постійні складові, можна записати як:

$$\Delta \dot{i}_{dc} = -\frac{1}{C \cdot R_{dc}} \cdot \Delta u_{dc} + \frac{1}{C} \cdot \Delta i_{dc}. \quad (2.50)$$

На основі виразу (2.48) можна вирішити диференціальне рівняння (2.50):

$$\Delta u_{dc} = K \cdot e^{-\frac{1}{C \cdot R_{dc}}} + \frac{R_{dc} \cdot \sqrt{I_{r2\sin}^2 + I_{r2\cos}^2}}{\sqrt{1 + 4 \cdot \omega^2 \cdot C^2 \cdot R_{dc}^2}} \cdot \sin(2 \cdot \omega t + \phi_{u2}) + \frac{R_{dc} \cdot \sqrt{I_{r4\sin}^2 + I_{r4\cos}^2}}{\sqrt{1 + 16 \cdot \omega^2 \cdot C^2 \cdot R_{dc}^2}} \cdot \sin(4 \cdot \omega t + \phi_{u4}), \quad (2.51)$$

де K – постійна стала.

Рівняння (2.51) може бути виражено у вигляді двох частин: перша частина є зменшувальною. Вона буде експоненціально затухати до нуля в стаціонарному стані. Коли значення конденсатора C малі, що означає, що система з невеликим конденсатором, реакція напруги кола постійного струму буде швидкою. І тільки друга частина існує в стаціонарному стані і проявляється як складові пульсації другого і четвертого порядку в напрузі кола постійного струму в умовах несиметричного живлення.

При виконанні умови $4 \cdot \omega^2 \cdot C^2 \cdot R_{dc}^2 \ll 1$ може бути додатково спрощено, як в сталому режимі:

$$\Delta u_{dc} = \frac{\sqrt{I_{r2\sin}^2 + I_{r2\cos}^2}}{2 \cdot \omega \cdot C} \cdot \sin(2 \cdot \omega t + \phi_{u2}) + \frac{\sqrt{I_{r4\sin}^2 + I_{r4\cos}^2}}{4 \cdot \omega \cdot C} \cdot \sin(4 \cdot \omega t + \phi_{u4}). \quad (2.52)$$

Для того, щоб мінімізувати гармоніки другого та четвертого порядку в напрузі кола постійного струму на малому конденсаторі, для отримання належних сигналів керування для приведених значень $I_{r2\sin}$, $I_{r2\cos}$, $I_{r4\sin}$ і $I_{r4\cos}$ стало критичним. З виразу (2.52) видно, що лише тоді, коли умови $I_{r2\sin} = 0$, $I_{r2\cos} = 0$, $I_{r4\sin} = 0$ і $I_{r4\cos} = 0$ задовольняються одночасно, пульсації постійної напруги Δu_{dc} можна зняти, так щоб можна було підтримувати постійну вихідну напругу постійного струму.

З вищезазначеного аналізу, мета фізичного керування напругою без пульсацій постійного струму представлена з точки зору математичного виразу, який мо-

жна зрозуміти більш детально, а отже, покращує розуміння появи гармонік на лінії змінного струму та напруги для трифазного перетворювача ШІМ при незбалансованих робочих умовах.

2.3 Дослідження математичних моделей літій-іонних накопичувачів

Літій-іонні батареї є одним з найбільш популярних джерел енергії для широкого класу автономних пристроїв – від мобільних телефонів до електромобілів. При цьому математичні моделі літій-іонних батарей є одними з ключових питань при моделюванні автономних пристроїв, так як вони визначають ємність та час роботи батарей, стабільність напруги під час розряду, а також швидкість заряду батареї [24, 25, 48, 49].

Як накопичувач енергії, батарея є одним з базових елементів від якого залежить розвиток електромобілів. Літій-іонна батарея відома завдяки своїм перевагам, таким як висока щільність енергії, висока швидкість заряду та розряду, безпека і т. п. [50, 51].

У зв'язку з розширенням досліджень в області імітаційного моделювання процесів в літій-іонних батареях електромобілів важливим є забезпечення високої точності моделювання процесів заряду та розряду [52, 53]. Швидкий заряд залежить від передачі енергії в акумулятор при дуже високих рівнях потужності. Це не тільки хімічний склад батареї, який визначає рівень потужності, при якому елемент може приймати заряд, але також і метод, який використовується для заряду батареї [54, 55]. Найбільш популярною процедурою заряду акумулятора є метод постійної напруги з постійним струмом (CC–CV) (дивись рисунок 2.5).

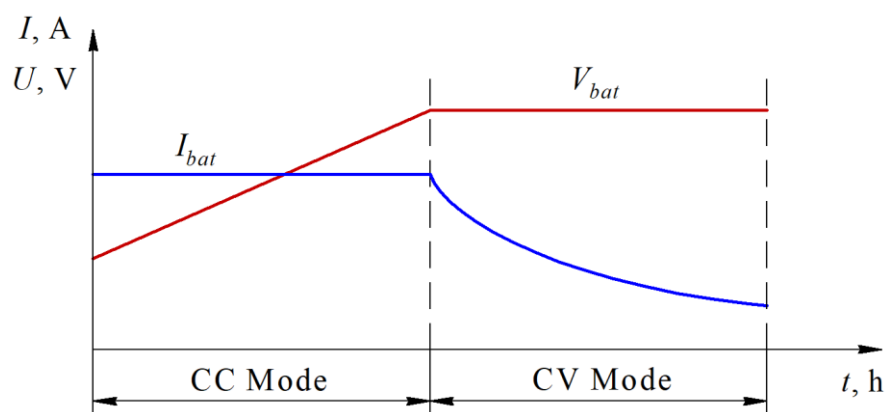


Рисунок 2.5 – Зарядні характеристики батареї

Існують різні математичні моделі та еквівалентні схеми, що описують процеси в літій-іонних батареях, такі як активно-резистивна модель батареї, динамічна резистивно-конденсаторна, модель Тевеніна першого і другого порядку і т. п. [56, 57]. Дані моделі дають різну точність опису зарядно-розрядних характеристик [58, 59].

На рисунку 2.6 наведено модель літій-іонної батареї, що враховує активний опір батареї (активно-резистивна модель).

Існують різні варіанти реалізації моделі, при яких значення внутрішнього опору батареї є або константою $R_{int} = \text{const}$, або залежить від відсотка заряду батареї $R_{int} = f(\text{SoC})$, де SoC – відсоток заряду батареї (stateofcharge). Аналогічно, в різних моделях внутрішня ЕРС батареї може бути константою $U_{oc} = \text{const}$, або ж залежати від відсотка заряду батареї $U_{oc} = f(\text{SoC})$.

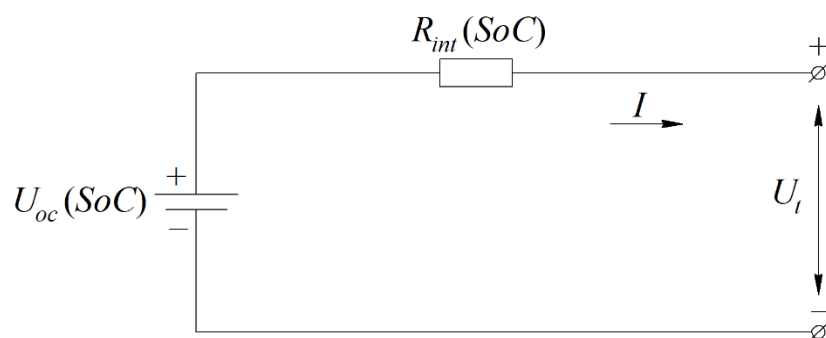


Рисунок 2.6 – Активно-резистивна модель батареї з урахуванням втрати потужності

У разі, коли напруга U_{oc} і опір залежать від відсотка заряду, вихідну напругу не клеммах батареї можна виразити як:

$$\begin{cases} U_t = U_{oc}(SoC) - R_{int}(SoC) \cdot I; \\ U_{oc}(SoC) = U_0 - k \cdot SoC; \\ R_{int}(SoC) = R_{int} - k_r \cdot SoC, \end{cases} \quad (2.53)$$

де I – струм батареї;

U_0 – напруга холостого ходу, коли батарея повністю заряджена;

k, k_r – емпірично отримані коефіцієнти.

Серед недоліків, модель не знижує пропускну здатність при збільшенні навантаження, тому вона не підходить для динамічних систем або перехідних станів.

На основі динамічних характеристик і принципів роботи батареї було розроблено резистивно-конденсаторну модель еквівалентної схеми з використанням резисторів, конденсаторів в якості джерел напруги (дивись рисунок 2.7).

Ця модель включає в себе конденсатор C_a , який представляє накопичену ємність, послідовний опір R_a , що представляє поляризаційний ефект, конденсатор C_p і залежний від струму опір R_p , що імітує ефекти поляризації і розсіювання потужності на внутрішній опір R_{int} . Значення C_p дуже мале, в той час як значення C_a зазвичай приймає дуже великі значення.

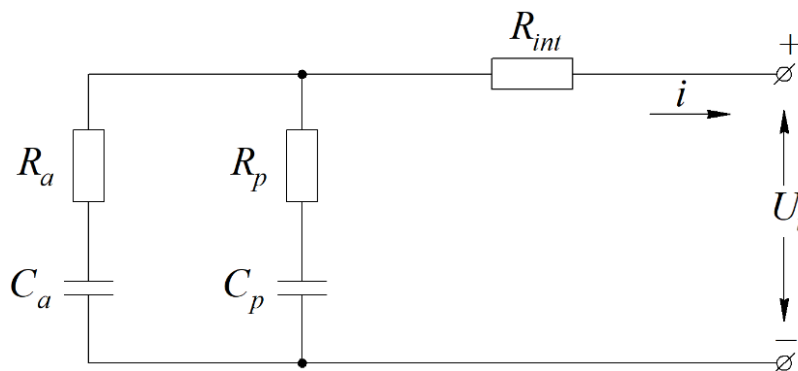


Рисунок 2.7 – Резистивно-конденсаторна модель батареї

Значення SoC представлено в зміні напруги через конденсатори C_a і C_p . Рівняння, які описують роботу батареї:

$$\begin{cases} U_t = U_{Cp} - I_{Cp} \cdot R_p - I \cdot R_{int}; \\ U_t = U_{Ca} - I_{Ca} \cdot R_a - I \cdot R_{int}; \\ I = I_{Cp} + I_{Ca}; \\ E_C = C \cdot U^2 / 2; \\ I_C = C \cdot dU / dt. \end{cases} \quad (2.54)$$

Недоліком даної моделі є те, що опис процесу розряду має досить великі похибки в зоні повного розряду. Зона SoC від 20 до 80 % описується цією моделлю досить точно.

Модель літій-іонних батарей Тевеніна першого порядку описує зарядні-розрядні характеристики, як активно-резистивну модель з додатковим RC -колом, що з'єднані паралельно. Параметри RC залежать від величин SoC , струму і температури.

Модель Тевеніна першого порядку наведено на рисунку 2.8.

Процеси заряду-розряду батареї визначаються за виразом:

$$\begin{cases} U_t = U_{oc} - U_p - I \cdot R_0; \\ U_p = \frac{I}{C_p} - \frac{U_p}{C_p \cdot R_p}; \\ U_{oc} = K_0 + K_1 \cdot \ln SoC + K_2 \cdot \ln(1 - SoC), \end{cases} \quad (2.55)$$

де R_0 – омічний опір;

R_p – поляризаційний опір;

C_p – ємність поляризації, що використовується для опису перехідного процесу під час заряду-розряду батареї.

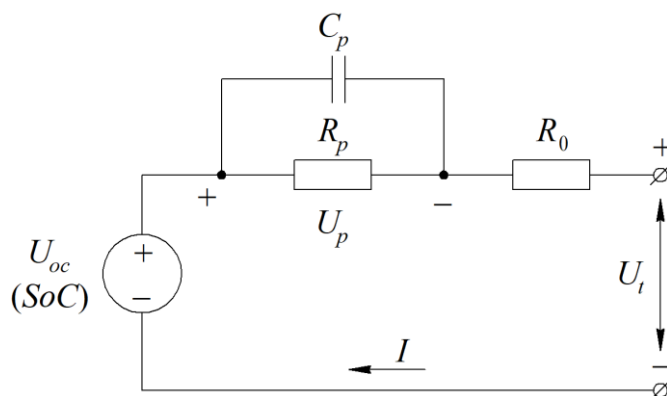


Рисунок 2.8 – Еквівалентна схема моделі Тевеніна першого порядку

Резистор R_0 забезпечує внутрішній опір елемента, на який впливають SoC , температура і ступінь старіння.

Для більш точного опису процесів заряду-розряду використовується модель Тевеніна другого порядку (дивись рисунок 2.9).

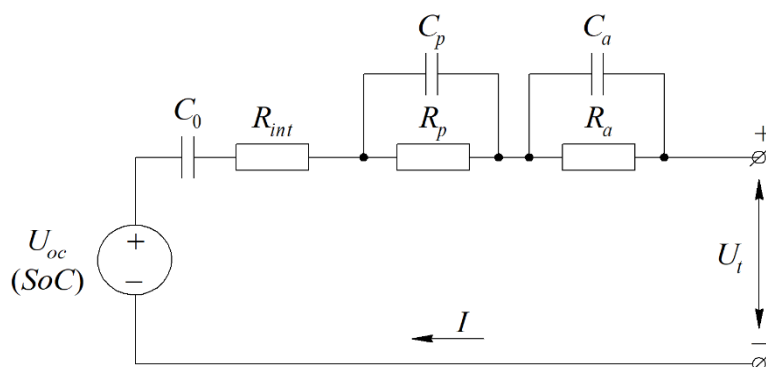


Рисунок 2.9 – Еквівалентна схема моделі Тевеніна другого порядку

Модель Тевеніна другого порядку має один додатковий компонент RC в порівнянні з моделлю першого порядку. З додатковим компонентом RC модель другого порядку може досягати більшої точності з точки зору опису перехідного поведінки осередки, але в той же час обчислювальна потужність збільшується. Перше RC -коло має низьку сталу часу для опису короткочасних перехідних ефектів. Ці перехідні ефекти пов'язані з електрохімічними ефектами і ефектами концентраційної поляризації, включаючи ефект переносу заряду, дифузію і інші фактори.

Рівняння, які описують роботу моделі Тевеніна другого порядку, мають вигляд:

$$\begin{cases} U_t = U_{oc} - I \cdot R_{int} - U_{C_1} - U_{C_2}; \\ U_{C_1} = -\frac{1}{C_1 \cdot R_1} \cdot U_{C_1} + \frac{1}{C_1} \cdot I; \\ U_{C_2} = -\frac{1}{C_2 \cdot R_2} \cdot U_{C_2} + \frac{1}{C_2} \cdot I; \\ U_{oc} = K_0 + K_1 \cdot \ln SoC + K_2 \cdot \ln(1 - SoC). \end{cases} \quad (2.56)$$

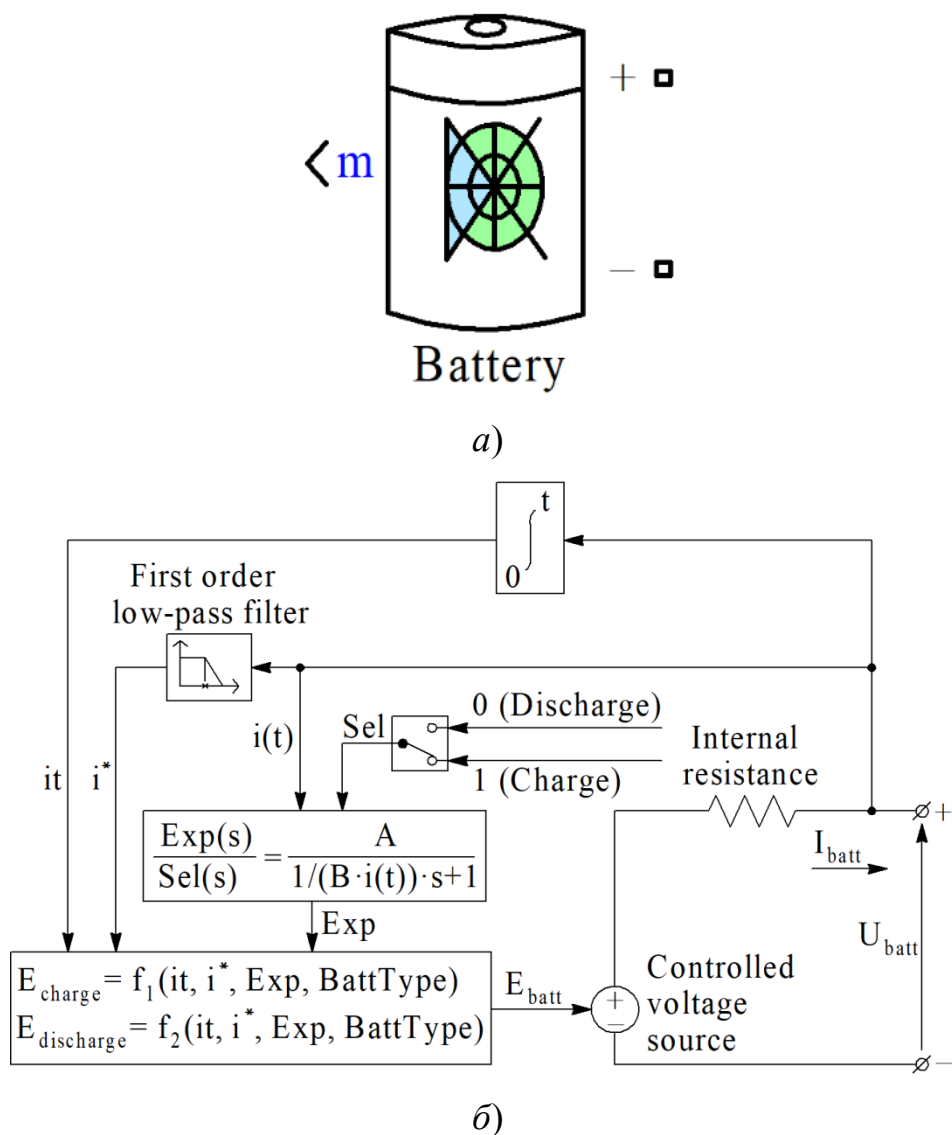
Таким чином, можна зробити висновок, що модель Тевеніна другого порядку є більш точною і в той же час досить простою.

Відповідно до вимоги щодо точності моделі кількість компонентів RC , доданих в модель, може бути збільшено навіть до нескінченності. Однак, як зазначено вище, складність моделі зростає зі збільшенням кількості компонентів RC . Модель завжди вибирається на основі компромісу між точністю і обчислювальною потужністю.

В Matlab / Simulink/ SimPowerSystems існує бібліотечний компонент літій-іонної батареї «Battery» (дивись рисунок 2.10, а). Структурну схему блоку «Battery» наведено на рисунку 2.10, б. Підсистема є еквівалентною схемою моделі батареї, в якій внутрішній опір не є змінним і не залежить від SoC.

На рисунку 2.10 введено такі позначення:

- E_{Batt} – нелінійна напруга, В;
- $Exp(s)$ – динамічна експонентна зона, В;
- $Sel(s)$ – режим роботи батареї ($Sel(s) = 0$ під час розряду, $Sel(s) = 1$ під час заряду).



а – зовнішній вигляд; б – внутрішня структура підсистеми

Рисунок 2.10 – Блок «Battery» в Matlab / Simulink

Зарядна та розрядна характеристики літій-іонної батареї, що наведено в Matlab, описується виразами:

$$f_1(i_t, i^*, i) = E_0 - \frac{K \cdot Q}{(Q - i_t) \cdot i^*} - \frac{K \cdot Q}{(Q - i_t) \cdot i_t} + A \cdot e^{(-B \cdot i_t)}; \quad (2.57)$$

$$f_2(i_t, i^*, i) = E_0 - \frac{K \cdot Q}{(i_t + 0,1 \cdot Q) \cdot i^*} - \frac{K \cdot Q}{(Q - i_t) \cdot i_t} + A \cdot e^{(-B \cdot i_t)}, \quad (2.58)$$

де i_t – величина витраченого заряду, А·год;

i^* – низькочастотна складова струму, А;

i – струм батареї, А;

E_0 – постійна напруга, В;

K – поляризаційна константа, В/А·год, вона ж і опір поляризації, Ом;

Q – максимальний заряд батареї, А·год;

A – експонентна напруга, В;

B – ємність в експонентній зоні, А·год⁻¹.

В програмному пакеті Matlab/Simulink виконано моделювання зарядно-розрядних характеристик літій-іонної батареї типу NCR-18650b, виробництва компанії Panasonic [60, 61]. Перевагою даної батареї є велика ємність та більша кількість циклів заряду-розряду в порівнянні з іншими батареями типорозміру 18650 [62, 63].

Основні технічні характеристики батареї типу NCR-18650b, заявлені в документації (Datasheet) наведені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1–Технічні характеристики батареї типу NCR-18650b

Характеристика		Значення
Номінальна ємність, мА·год		3200
Номінальна напруга, В		3,6
Час повного заряду, год		4
Вага, г		48,5
Температура, С°	заряду	від 0 до +45
	розряду	від -20 до +60
Щільність енергії, Вт/кг		243

При моделюванні було використано параметри, зазначені в документації для батареї типу NCR-18650b в таблиці 2.1.

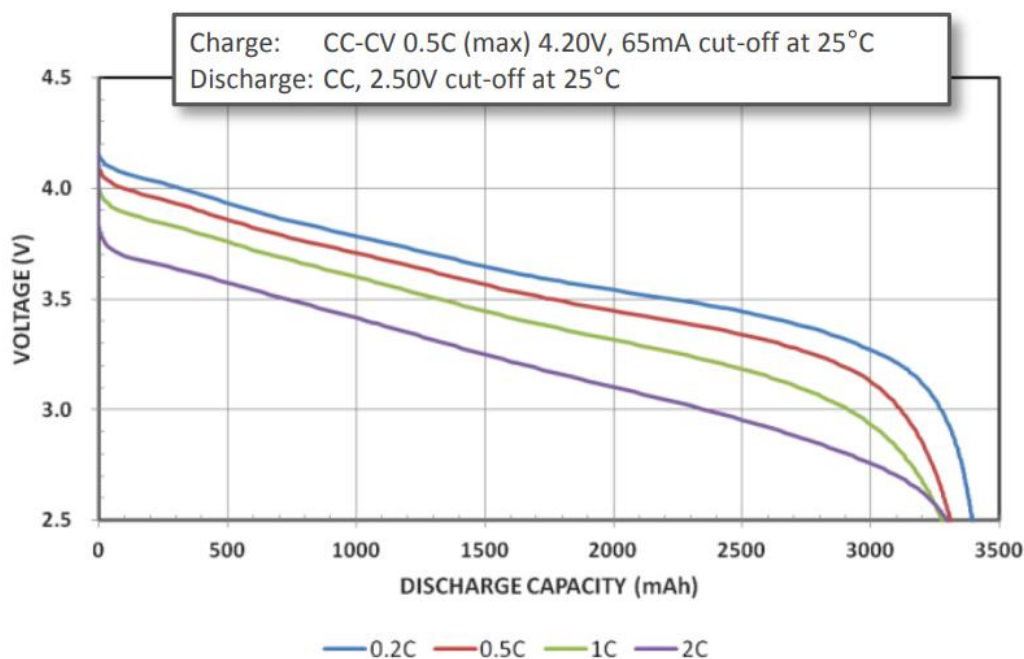


Рисунок 2.11 – Розрядні характеристики батареї NCR-18650b згідно її документації

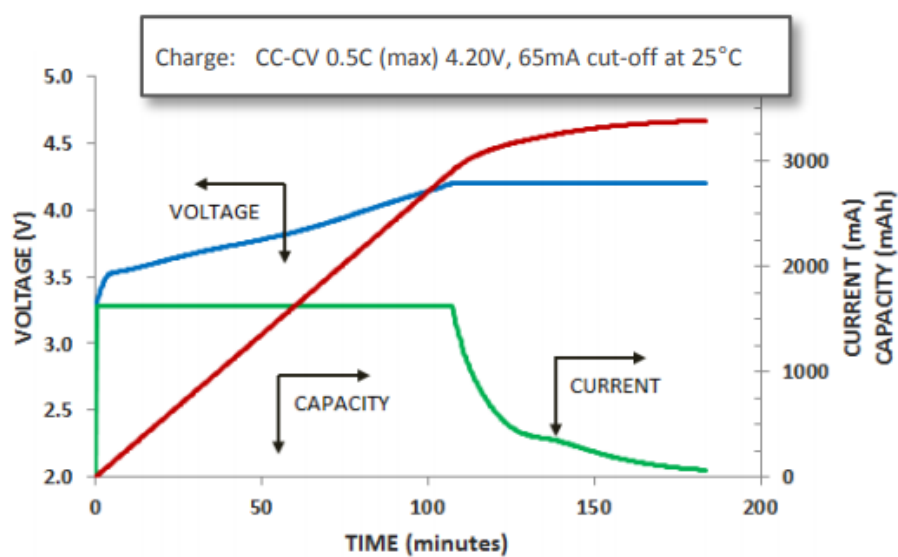


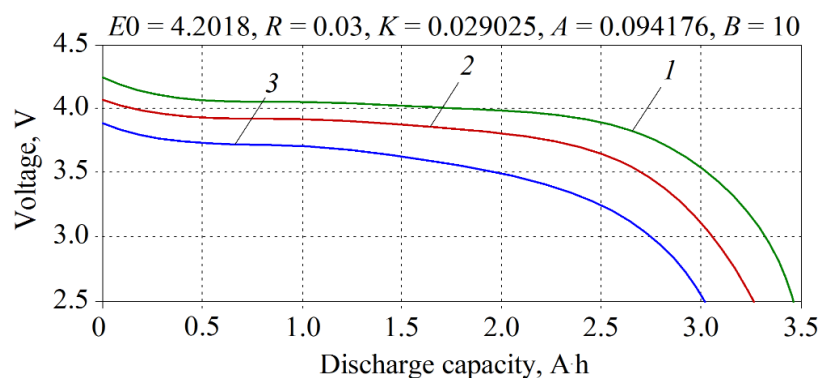
Рисунок 2.12 – Зарядно-розрядні характеристики батареї NCR-18650b згідно її документації

Основні параметри налаштування параметрів літій-іонної батареї в Matlab/Simulink/SymPowerSystems наведено на рисунку 2.13.

Parameters	Discharge
☐ Determined from the nominal parameters of the battery	
Maximum capacity (Ah)	3.350
Cut-off Voltage (V)	2.5
Fully charged voltage (V)	4.2
Nominal discharge current (A)	3.2
Internal resistance (Ohms)	0.03
Capacity (Ah) at nominal voltage	2.5
Exponential zone [Voltage (V), Capacity (Ah)]	[4 0.3]
Display characteristics	
Discharge current [i1, i2, i3,...] (A)	[0.650 3.25 6.5]
Units	Ampere-hour Plot

Рисунок 2.13 – Налаштування блока Battery в програмі Matlab / Simulink

Результати моделювання, а саме характеристика розряду батареї при різних струмах навантаження, що отримано в програмі Matlab / Simulink, наведено на рисунку 2.14.



1) – 0,65 A (0,2C); 2) – 3,2 A (1C); 3) – 6,5 A (2C)

Рисунок 2.14 – Результати моделювання розрядних характеристик батареї NCR-18650b - залежності напруги від ємності при струмах розряду:

Похибки розрядних характеристик літій-іонної батареї NCR-18650b розглянутих математичних моделей та вбудованої Matlab-моделі відносно даних, представлених в технічних даних, наведено в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Похибки розрядних характеристик існуючих математичних моделей літій-іонної батареї NCR-18650b

Тестування ємності	Відносна приведена похибка								
	При струмі розряду 0,65 А			При струмі розряду 3,2 А			При струмі розряду 6,5 А		
Діапазон глибини розряду, %	0-5	5-85	85-100	0-5	5-85	85-100	0-5	5-85	85-100
Відхилення даних Matlab-моделі «Battery» відносно Datasheet	4,5	13,3	11,1	9,4	18,2	5,9	17	23	30
Активно-резистивна модель	2,2	4,3	16,1	3,1	5,8	18,0	4,2	6,4	18,6
Резистивно-конденсаторна модель	7,7	1,7	63,6	7,1	2,1	58,1	6,8	3,2	54,2
Модель Тевеніна	2,1	0,8	21,4	2,0	1,1	20,1	2,0	4,3	19,7

В діапазоні, коли батарея майже повністю розряджена (85-100 %) існуючі математичні моделі досить неточно описують значення напруги на батареї.

Висока похибка моделювання розрядних характеристик у вбудованій Matlab-моделі блока «Battery» обумовлена, в першу чергу, неідеальною математичною моделлю, що описує характеристику розрядку.

Тому для підвищення точності моделювання процесів в літій-іонних батареях запропоновано наступними апроксимуючими виразами, що описують залежність напруги батареї від струму заряду та ступені заряду.

2.4 Синтез математичної моделі зарядно-розрядних характеристик літій-іонної батареї NCR-18650b

Через те, що моделювання літій-іонної батареї NCR-18650b з використанням існуючих схем заміщення та базової моделі Matlab дало високу похибку відносно даних в документації батареї, для підвищення точності комп'ютерного моделювання зарядно-розрядних характеристик, виконано синтез виразів, що описують характеристики заряду та розряду батареї.

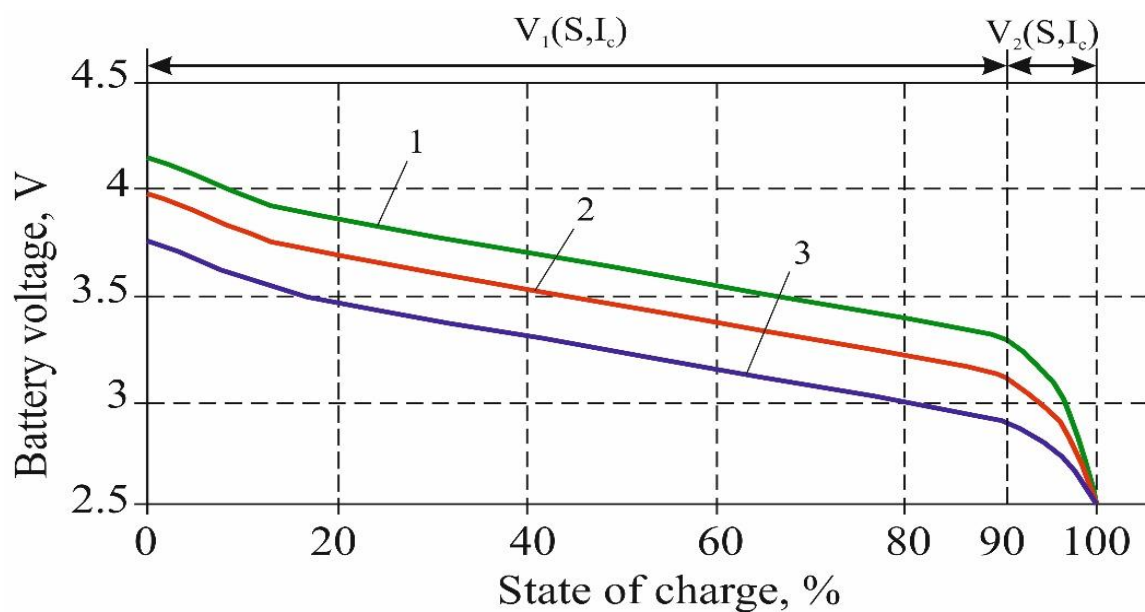
Шляхом поліноміальної апроксимації зарядно-розрядних характеристик, що представлено в документації, отримано тривимірні залежності напруги на батареї від струму батареї та величини поточного заряду батареї $V_{роз}(SoC, I_c)$ і заряду $V_{зар}(SoC, I_c)$. При цьому для отримання більшої точності характеристику напруги батареї отримано для двох інтервалів розряду двома рівняннями. У першому інтервалі SoC від 0 до 90 % описується функцією $V_{роз1}(SoC, I_c)$, а в інтервалі SoC від 90 % до 100 % функцією $V_{роз2}(SoC, I_c)$.

$$V_1(SoC, I_c) = -1,33 \cdot 10^{-6} \cdot S^3 + 2,37 \cdot 10^{-4} \cdot S^2 - 2 \cdot 10^{-2} \cdot S - 6,68 \cdot 10^{-3} I_c + 4,19; \quad (2.59)$$

$$V_2(SoC, I_c) = \left[\left(-4,762 \cdot 10^{-4} \cdot S^3 + 1,321 \cdot 10^{-1} \cdot S^2 - 12,237 \cdot S + 381 - 2,5 \right) \times \right. \\ \left. \times (-0,21 \cdot I_c + 2,362) \right] + 2,5, \quad (2.60)$$

де S – поточний стан заряду (SoC) батареї.

Графічно отримані залежності наведено на рисунку 2.15.



1 – 0,65 A (0,2C); 2 – 3,2 A (1C); 3 – 6,5 A (2C)

Рисунок 2.15 – Залежності напруги від ємності з запропонованими виразами

Як видно з рисунку 2.12 та рисунку 2.16, отримані вирази дозволяють більш точно описати характеристики розряду батареї, що забезпечує більшу точність моделювання ніж існуючі.

2.5 Фізичний дослід з визначення зарядно-розрядної характеристики батареї NCR-18650b для визначення збіжності точно математичних моделей

Для підтвердження отриманих математичних виразів, що описують характеристики заряду/розряду, та порівняння з даними наведених в Datasheet, було

проведено випробування нової батареї типу NCR-18650b. Перед розрядом батарея була повністю заряджена методом CC–CV до напруги 4,2 В. Випробувальний стенд, що наведено на рисунку 2.16, складається з електронного навантаження типу Маупіо m9712, підключеного до USB-порту комп'ютера через перетворювач інтерфейсів USB / RS-485 – AC-4 виробництва компанії ТОВ «АКУТЕК».

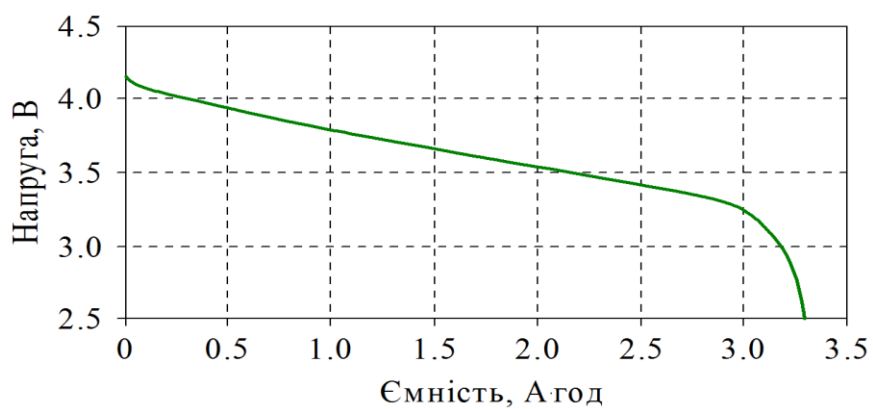


Рисунок 2.16 – Випробувальний стенд, на якому отримані зарядно - розрядні характеристики літій-іонної батареї

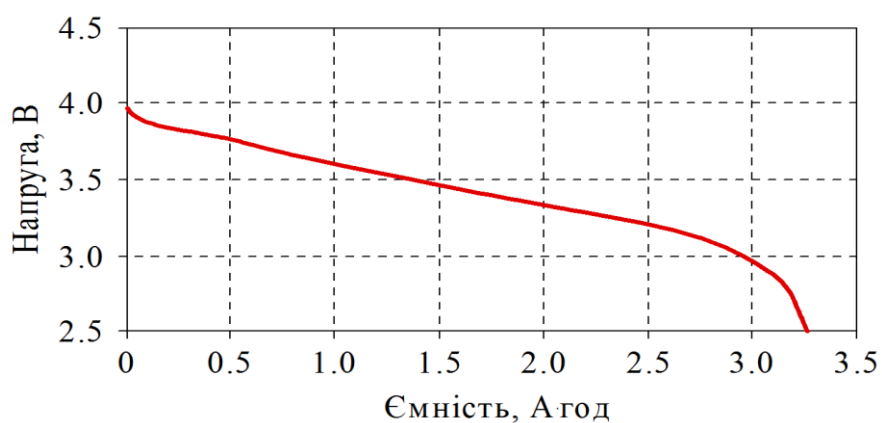
За допомогою стенду проводилося три випробування для розряду батареї, при яких електронне навантаження розряджало батарею струмом 0,65 А (0,2С), 3,2 А (1С) і 6,5 А (2С).

Отримані в ході експерименту розрядні характеристики батареї при різних значеннях струму розряду наведено на рисунку 2.17

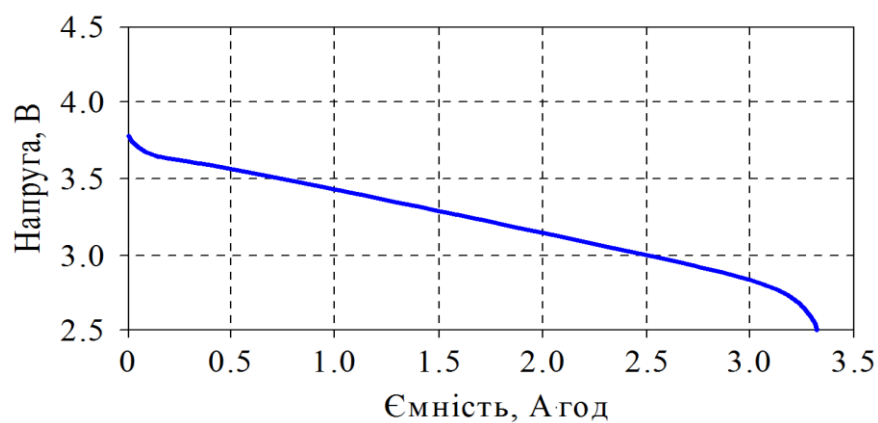
Проведені експерименти показали, що характеристики, що наведено у технічній документації та характеристики, отримані в результаті проведених випробувань, схожі між собою.



а)



б)



в)

а – 0,65 А (0,2С); б – 3,2 А (1С); в – 6,5 А (2С)

Рисунок 2.17 – Залежності напруги від ємності при струмах розряду

Результати аналізу температури батареї під час розряду струмом 6,5 А тепловізором типу DaliTei-P наведено на рисунку 2.18.

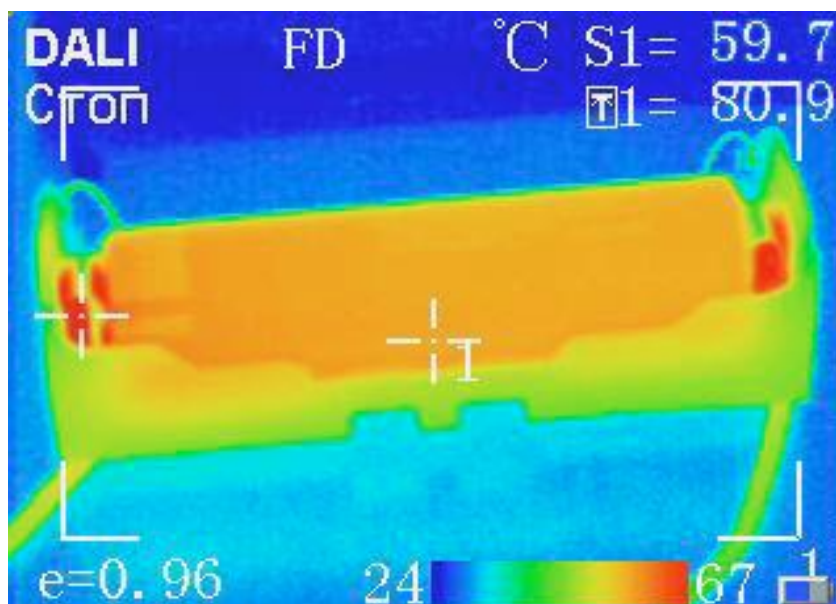


Рисунок 2.18 – Температурна картина батареї під час розряду струмом 6,5 А

Як видно з рисунку 2.18 температура батареї досягає 80,9 С°, що впливає на відхилення реальних параметрів відносно заявлених в документації.

У таблиці 2.3 наведено похибки розрядних характеристик фізичного експерименту та імітаційної моделі літій-іонної батареї типу NCR-18650b відносно даних, представлених в таблиці даних.

При низькому струмі розряду $0,2C = 0,65$ А відносна похибка експерименту та характеристика, що наведено в документації, не перевищує 2 %.

Розбіжність в характеристиках розряду реального зразка при струмі $2C = 6,5$ А відносно параметрів з технічної документації на батарею значно більша (до 9 %). Це можливо з кількох причин:

- технологічний розкид виробництва батарей;
- температура батареї при розряді.

Таблиця 2.3 – Похибки розрядних характеристик фізичного експерименту та імітаційної моделі літій-іонної батареї NCR-18650b

Тестування ємності	Відносна приведена похибка								
	При струмі розряду 0,65 А			При струмі розряду 3,2 А			При струмі розряду 6,5 А		
Діапазон глибини розряду, %	0-5	5-90	90-100	0-5	5-90	90-100	0-5	5-90	90-100
Відхилення фізичного експерименту від таблиці даних, %	1,3	1,3	< 1	4,5	4,7	1,5	9	9	7,6
Відхилення даних імітаційної моделі від таблиці даних, %	4,5	13,3	11,1	9,4	18,2	5,9	17	23	< 100
Відхилення запропонованої моделі Matlab від таблиці даних, %	2	3	6	2	3	6	2	3	6

У технічній документації на батарею температура в режимі розряду повинна бути в діапазоні від -20 до $+60$ °C. В реальних умовах високий струм розряду викликає нагрів батареї до рівня від 70 до 80 °C (дивись рисунок 2.19), що додатково може викликати спотворення характеристик. Що стосується імітаційного моделювання, то похибка характеристик, отриманих в Matlab-моделі при найбільших струмах розряду досягає 23 %. Однак слід зазначити, що дана висока похибка характерна тільки для моделювання процесу розряду високим струмом. При моделюванні меншого струму розряду відсоток похибки менший.

2.6 Параметри блоку акумуляторного відсіку електромобіля Tesla S

Батарейний відсік в автомобілі Tesla S має ємність 85 кВт·год та складається з 7104 штук (16 блоків, у яких знаходиться 6 груп по 74 елемента) літій-іонних батарей виробництва компанії Panasonic типу NCR18650b (дивись рисунок 2.19).

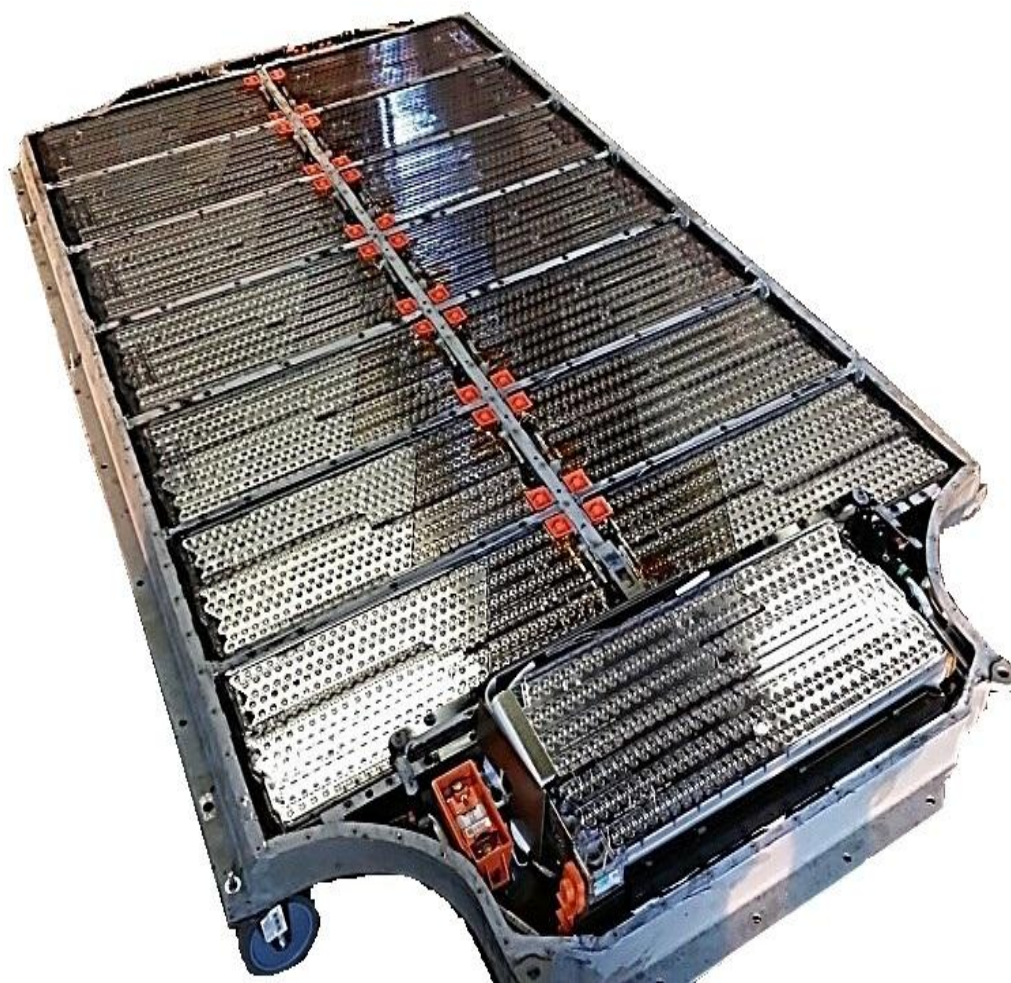


Рис.2.19 – Зовнішній вигляд батарейного відсіку електромобіля

Схема з'єднання батарей в електромобілі Tesla Model S представлена на рисунку 2.20.

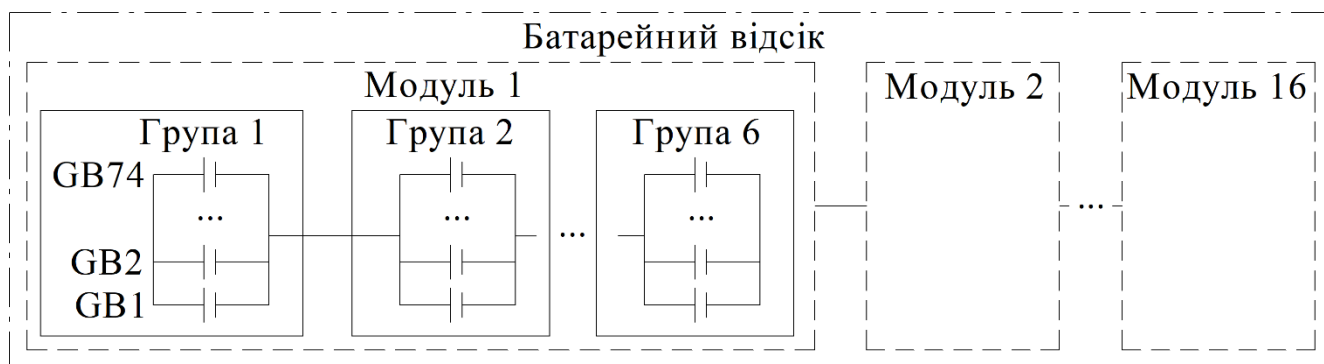


Рисунок 2.20 – Схема з'єднання акумуляторів в батарейному відсіку електромобіля Tesla Model S

У батарейному відсіку окремі батареї типу NCR-18650b паралельно з'єднуються в групи по 74 шт. При паралельному з'єднанні напруга групи дорівнює напрузі елемента (4,2 В), а її ємність - сумі ємностей елементів (250 А·год). Далі шість груп з'єднуються послідовно в модуль. При цьому напруга модуля підсумовується з напруг груп і дорівнює 25,2 В. Далі модулі з'єднуються послідовно в батарею. Всього батарея містить 16 модулів (разом 96 груп). Напруга всіх модулів при цьому підсумовується і становить 400 В. Також розраховано і еквівалентний опір блоку батарей. Виходячи з того, що середній опір одного акумулятора $R_{NCR} = 37$ мОм еквівалентний опору батареї $R_{bat} = 27$ мОм.

Висновки до розділу 2

1. Запропоновано схему перетворювача зарядної станції електромобіля на базі активного чотириквadrантного випрямляча напруги, що дає змогу проводити заряд електромобілів від трифазної електричної мережі в режимі CC-CV, що забезпечує можливість роботи з коефіцієнтом потужності близьким до одиниці;

2. Представлено математичну модель трифазного ШІМ - перетворювача джерела напруги змінного струму в постійний для симетричних та несиметричних робочих умов;

3. На основі поліноміальної апроксимації зарядно - розрядних характеристик літій-іонних акумуляторів, розроблені математичні моделі, що описують процеси

заряду розряду та визначають взаємозв'язок поточної ємності акумуляторних батарей, поточної напруги батареї та миттєвого значення струму батареї. В повному діапазоні заряду/розряду запропонована модель дає максимальну похибку 6%, що дає суттєво кращі показники точності ніж базова модель в бібліотеці матлаб.

4. Представлено еквівалентні схеми літій-іонних акумуляторів . Проведено аналіз математичних моделей еквівалентних схем різних типів літій-іонних батарей;

5. Проведено фізичне моделювання процесів заряду/розряду батареї NCR-18650b для підтвердження її параметрів, яка буде використовуватися в якості навантаження при моделюванні перетворювача для системи заряду електромобіля;

6. Визначено параметри блоку батарейному відсіку електромобіля TeslaModel S, який буде навантаженням.

Розділ 3

ДОСЛІДЖЕННЯ КОВЗАЮЧОГО РЕГУЛЯТОРА ВИХІДНОГО СТРУМУ
ТА ВИХІДНОЇ НАПРУГИ ПРИ ЗАСТОСУВАННІ СПОСТЕРІГАЧІВ

Запропоновано систему автоматичного керування вихідною напругою та вихідного струму активного чотириквadrантного випрямляча зарядної станції з регулятором на базі ковзного режиму. При цьому на етапі роботи в режимі заряду «постійний струм» - зворотній зв'язок регулювання відбувається за параметром струму. В режимі керування CV – зворотній зв'язок відбувається на вихідною напругою [84, 94, 95].

3.1 Математична модель об'єкту керування

Для визначення динамічних властивостей керування процесом заряду

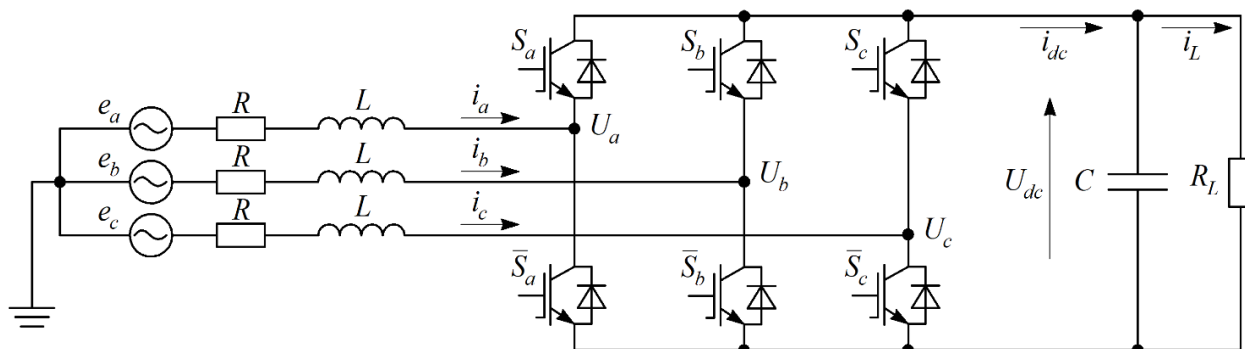


Рисунок 3.1 – Електрична схема активного випрямляча зарядної станції

На рисунку 3.1 представлено наступні позначення:

e_a, e_b, e_c – живлячі напруги в трьох фазах електричної схеми;

i_a, i_b, i_c – миттєві значення фазних струмів, що формуються активним випрямлячем;

L – сумарна індуктивність дроселя активного випрямляча та індуктивності живлячої мережі;

R – сумарний опір дроселя активного випрямляча та живлячої мережі;
 U_a, U_b, U_c – напруги прикладені до входних дроселів від активного випрямляча;

C – ємність вихідного конденсатора перетворювача зарядної станції.

Схема заміщення однієї фази активного випрямляча, що описує процес формування синусоїдального входного струму представлена на рисунку 3.2

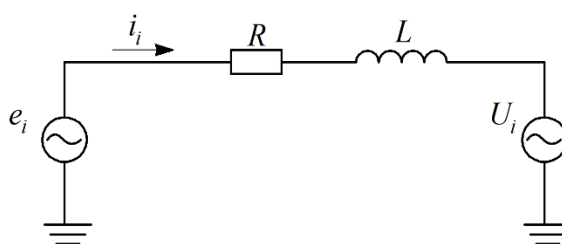


Рисунок 3.2. – Схема заміщення фази перетворювача зарядної станції

Система диференціальних рівнянь, що описує процеси формування синусоїдального входного струму можна визначити як

$$\begin{cases} L \frac{di_a}{dt} = e_a - R \cdot i_a - u_a; \\ L \frac{di_b}{dt} = e_b - R \cdot i_b - u_b; \\ L \frac{di_c}{dt} = e_c - R \cdot i_c - u_c, \end{cases} \quad (3.1)$$

Вихідна напруга активного випрямляча визначається функцією заряду вихідного конденсатора, що описується наступним диференціальним рівнянням

$$C \frac{dU_{dc}}{dt} = (S_a \cdot i_a + S_b \cdot i_b + S_c \cdot i_c) \quad (3.2)$$

де S_a, S_b, S_c – комутаційні стани силових транзисторів перетворювача;

Комутаційний стан S_a відповідає комутаційному стану при якому VT1 увімкнено, VT2 вимкнено. Комутаційний стан S_b відповідає комутаційному стану при якому VT3 увімкнено, VT4 вимкнено. Комутаційний стан S_c відповідає комутаційному стану при якому VT5 увімкнено, VT6 вимкнено.

3.2 Структурна схема системи автоматичного керування на базі ковзного режиму

Структурна схема системи автоматичного керування вихідного струму та вихідної напруги перетворювача зарядної станції представлено на рисунку 3.3

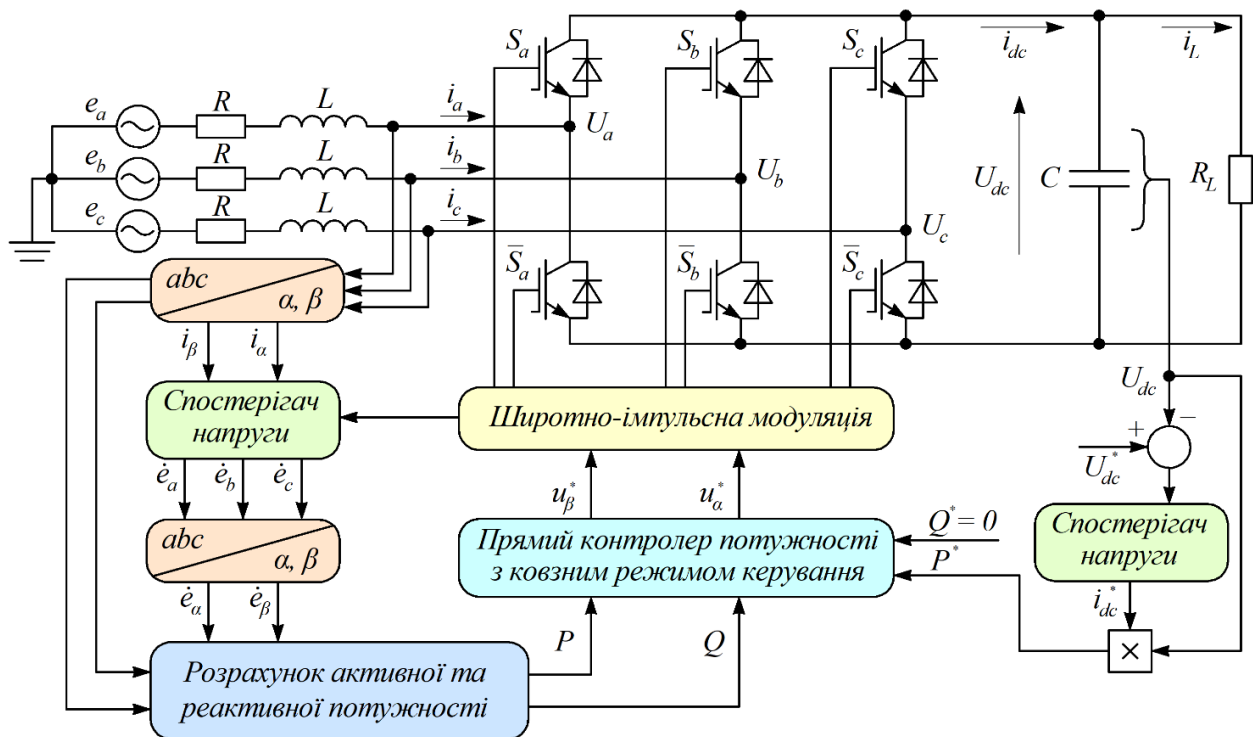


Рисунок 3.3 – Структурна схема системи автоматичного керування вихідного струму та вихідної напруги перетворювача зарядної станції

В запропонованій системі значення вихідної напруги, вихідного струму та вхідної напруги можуть бути визначені безпосередньо прямим вимірюванням чи на основі розрахунку їх математичних спостерігачів.

В розробленій структурі миттєві значення вхідних струмів перетворюються з abc -системи координат в $\alpha\beta$ згідно наступним рівнянням

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

В запропонованій структурі регулювання вихідної напруги та вихідного струму реалізовано за допомогою ковзного регулятора.

У загальній формі ковзний режим може бути описаний наступним диференціальним рівнянням

$$S(t) = \left(\lambda + \frac{d}{dt} \right)^{n-1} \cdot e(t) + K \cdot \int_0^t e(t) dt, \quad (3.4)$$

де $e(t)$ – сигнал похибки між сигналом завдання та сигналом зворотнього зв'язку;

K, λ – коефіцієнти системи, що мають бути більше одиниці;

n – порядок регульованої системи, що визначається порядком диференціальних рівнянь системи, яка регулюється.

Регулювання вихідної напруги визначається диференціальним рівнянням першого порядку, що визначає значення $n = 1$, тому регулювання вихідної напруги та вихідного струму активного чотириквadrантного випрямляча в ковзному режимі визначається рівнянням

$$\dot{S}_{dc} = \dot{e}_{dc} + K_1 \cdot e_{dc} = \dot{U}_{dc}^* + \frac{U_{dc}}{R_L \cdot C} + K_1 \cdot (U_{dc}^* - U_{dc}) - \frac{1}{C} \cdot i_{dc}, \quad (3.5)$$

де K_I – коефіцієнт підсилення похибки вимірюваної вихідної напруги та її значення що розраховано спостерігачем;

U_{dc}^* – сигнал завдання вихідної напруги;

U_{dc} – сигнал вихідної напруги;

e_{dc} – сигнал похибки в регулюванні вихідної напруги.

При досягненні сталого режиму $S_{dc} = 0$:

$$i_{dc}^* = C \cdot \dot{U}_{dc}^* + \frac{U_{dc}}{R_L} + K_I \cdot C (U_{dc}^* - U_{dc}) + K_{dc} \cdot \text{sign}(S_{dc}). \quad (3.6)$$

Для мінімізації пульсацій в системі функцію $\text{sign}(S_{dc})$ замінено функцією насичення $\text{sat}(S_{dc})$

$$\text{sat}(S_{dc}) = \begin{cases} +1 & \text{якщо } S_{dc} > \gamma; \\ -1 & \text{якщо } S_{dc} < -\gamma; \\ \frac{S_{dc}}{\gamma} & \text{якщо } |S_{dc}| \leq \gamma, \end{cases} \quad (3.7)$$

де γ – коефіцієнт зниження пульсацій системи.

Бажані величини вихідного струму та вихідної напруги визначають сигнали завдання вхідної активної потужності

$$\begin{cases} P^* = U_{dc} \cdot i_{dc}; \\ Q^* = 0, \end{cases} \quad (3.8)$$

де i_{dc} – вихідний струм активного випрямляча.

u_{dc} – вихідна напруга активного випрямляча.

Регулятори режиму ковзання забезпечується відповідність вимірюваних

значень вхідної потужності її заданому значення.

Регулювання вхідною активною та реактивною потужністю визначається наступною системою рівнянь

$$\begin{cases} S_P = e_P + K_2 \cdot \int e_P dt; \\ S_Q = e_Q + K_3 \cdot \int e_Q dt; \end{cases} \quad (3.9)$$

де K_2, K_3 – сталі системи.

$$\begin{cases} e_P = P - P^*; \\ e_Q = Q - Q^*, \end{cases} \quad (3.10)$$

При підстановці рівнянь реактивної та активної складової потужності в матричній формі дає сигнал завдання повної потужності [32]:

$$\dot{S}_{PQ} = F + D \cdot U; \quad (3.11)$$

$$D = \begin{bmatrix} -\frac{e_\alpha}{L} & -\frac{e_\beta}{L} \\ -\frac{e_\alpha}{L} & \frac{e_\beta}{L} \end{bmatrix}; \quad (3.12)$$

Узагальнений вектор фазної напруги U визначається наступними рівняннями

$$\begin{bmatrix} u_0 \\ u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix}$$

$$U = \begin{bmatrix} U_\alpha \\ U_\beta \end{bmatrix}; \quad (3.13)$$

Показник системи F визначається системою рівнянь

$$F = \begin{bmatrix} \dot{U}_\alpha \cdot i_\alpha + \dot{U}_\beta \cdot i_\beta + \left(K_2 - \frac{R}{L}\right) \cdot P + \frac{1}{L} \cdot (U_\alpha^2 + U_\beta^2) - \dot{P}^* - K_2 \cdot P^* \\ \dot{U}_\beta \cdot i_\alpha - \dot{U}_\alpha \cdot i_\beta + \left(K_3 - \frac{R}{L}\right) \cdot Q - \dot{Q}^* - K_3 \cdot Q^* \end{bmatrix}, \quad (3.14)$$

Розрахуємо спостерігач напруги вхідної мережі активного випрямляча. Рівняння динамічної моделі трифазного активного випрямляча напруги в $\alpha\beta$ -системі координат може бути виражено як:

$$\frac{di_g}{dt} = \frac{1}{L} \cdot (e_g - R \cdot i_g - U_g). \quad (3.15)$$

Аналогічно узагальнений вектор фазного струму в електричній мережі визначається як:

$$i_g = \begin{bmatrix} i_\alpha & i_\beta \end{bmatrix}^T. \quad (3.16)$$

Єдиний вектор напруги мережі в $\alpha\beta$ системі координат визначається як

$$e_g = \begin{bmatrix} e_\alpha & e_\beta \end{bmatrix}^T. \quad (3.17)$$

Єдиний вектор напруги перетворювача в $\alpha\beta$ системі координат визначається як

$$U_g = \begin{bmatrix} U_\alpha & U_\beta \end{bmatrix}^T. \quad (3.18)$$

При застосування ковзного режиму спостерігач фазного струму може бути описано як:

$$\frac{d\hat{i}_g}{dt} = \frac{1}{L} \cdot \left(G \cdot \text{sign}(S_g) - R \cdot \hat{i}_g - U_g \right), \quad (3.19)$$

де S_g – сигнал розузгодження фазного струму:

$$S_g = i_g - \hat{i}_g \quad (3.20)$$

Вектор струму $\hat{i}_g$ визначається за рівнянням:

$$\hat{i}_g = \begin{bmatrix} \hat{i}_\alpha & \hat{i}_\beta \end{bmatrix}^T; \quad (3.21)$$

$$G = \begin{bmatrix} G_1 & G_2 \end{bmatrix}^T, \quad (3.22)$$

де G_1, G_2 – регулювальні константи ($G_1 > 0$; $G_2 > 0$).

Після того як ковзаючий режим досягне значення при якому $\dot{S}_g = 0$, визначене спостерігачем, величина вектора напруги електричної мережі може бути розраховано як:

$$e_g = G \cdot \text{sign}(S_g). \quad (3.23)$$

Застосування функції $\text{sign}(S_g)$ визначає ступінчате значення розрахункового значення e_g . Застосування фільтра нижчих частот дозволить нівелювати пульсаційний характер. Фільтроване значення сигналу e_g визначає сигнал e_{gf}

$$e_{gf} = \Phi НЧ \cdot (G \cdot \text{sign}(S_g)), \quad (3.24)$$

Відфільтроване виведення спостерігача напруги електричної у $\alpha\beta$ системі координат має вигляд:

$$e_{gf} = \begin{bmatrix} e_{\alpha f} & e_{\beta f} \end{bmatrix}^T. \quad (3.25)$$

Застосування фільтра нижніх частот, що забезпечує мінімізацію пульсації розрахункового значення визначеного спостерігачем в ковзному режимі, має недолік, що полягає в ослабленні амплітуди сигналу, що спостерігається, і створенні фазової затримки між оцінюваними сигналами [33]. Для вирішення цієї проблеми, запропоновано адаптивний алгоритм компенсації згасання, викликаного амплітудною та фазовою затримкою (дивись рисунок 3.4). Оскільки алгоритм нечутливий до зміни частоти напруги мережі, це підвищує точність спостереження.

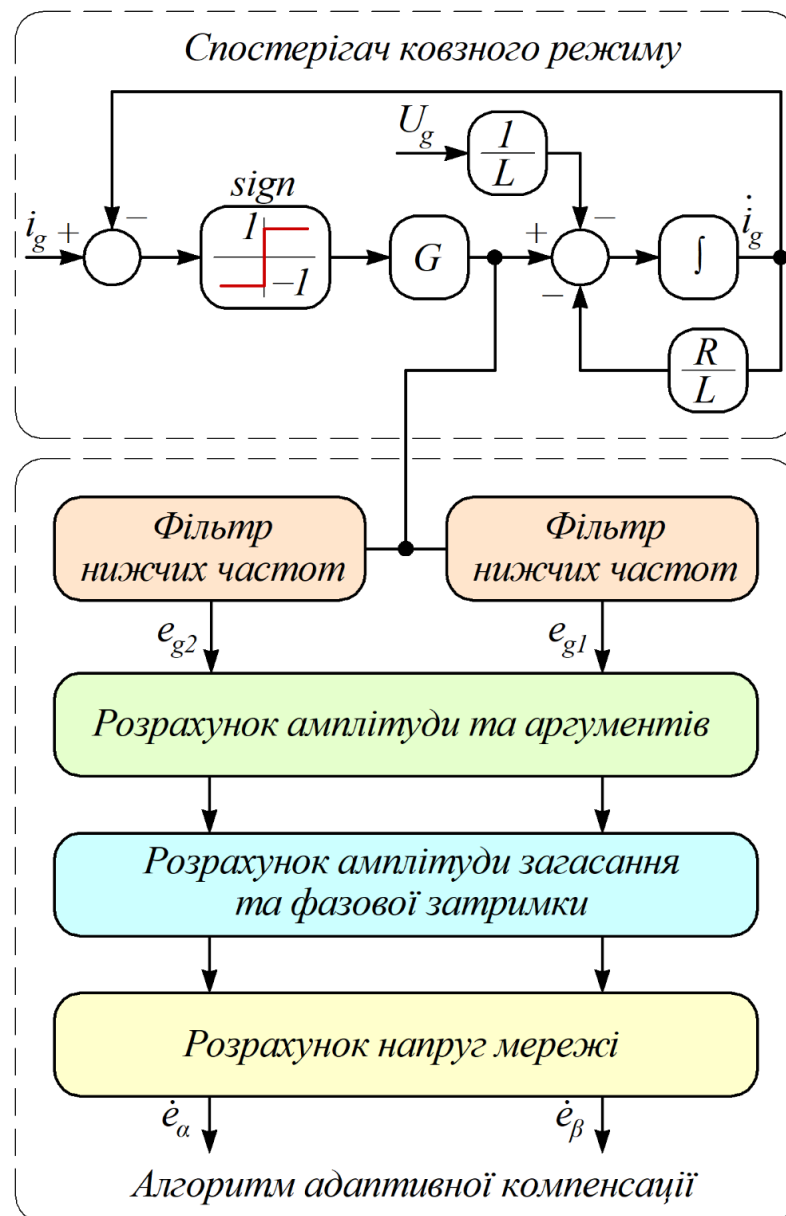


Рисунок 3.4 – Структурна схема спостерігача фазної напруги мережі на базі ковзаючого режиму

В описаному на рисунку 3.4 застосовано однакові фільтри нижніх частот, що зумовлює однакові частоти зрізу.

$$\begin{cases} e_{g1} = \frac{\omega_3}{s + \omega_3} \cdot e_{gf}; \\ e_{g2} = \frac{\omega_3}{s + \omega_3} \cdot e_{g1}. \end{cases} \quad (3.26)$$

Амплітуди та фази фільтрів спостерігачів вихідної напруги можна розрахувати як:

$$\begin{cases} E_1 = \|e_{g1}\|, & \theta_1 = \text{Arg}(e_{g1}); \\ E_2 = \|e_{g2}\|, & \theta_2 = \text{Arg}(e_{g2}). \end{cases} \quad (3.27)$$

Зміна амплітуди та фази сигналів напруги мережі внаслідок дії фільтрів нижніх частот може бути розраховано як

$$\begin{cases} \Delta E = \frac{E_1}{E_2}; \\ \Delta \theta = \theta_1 - \theta_2. \end{cases} \quad (3.28)$$

Компенсовані значення значення фазних напруги мережі (компенсовано фазовий зсув та зміну амплітуди дії ФНЧ) визначаються системою рівнянь

$$\begin{cases} \hat{e}_\alpha = E_2 \cdot \Delta E^2 \cdot \cos(\theta_2 + 2 \cdot \Delta \theta); \\ \hat{e}_\beta = E_2 \cdot \Delta E^2 \cdot \sin(\theta_2 + 2 \cdot \Delta \theta). \end{cases} \quad (3.29)$$

Вихідна напруга може бути визначена за допомогою спостерігачів за системою диференціальних рівнянь, що описана нижче

$$\begin{cases} \frac{dU_{dc}}{dt} = \frac{1}{C} \cdot (S_\alpha \cdot i_\alpha + S_\beta \cdot i_\beta) - \frac{U_{dc}}{C \cdot R_L}; \\ \frac{d\hat{U}_{dc}}{dt} = \frac{1}{C} \cdot (S_\alpha \cdot i_\alpha + S_\beta \cdot i_\beta) - \frac{\hat{U}_{dc}}{C \cdot R_{L0}} + \lambda \cdot \text{sign}(e_U), \end{cases} \quad (3.30)$$

де $\hat{U}_{dc}$ – розрахункове значення спостерігача вихідної напруги;

R_{L0} – опір навантаження

Похибка розрахунку спостерігача вихідної напруги може бути визначено як:

$$e_U = U_{dc} - \hat{U}_{dc}. \quad (3.31)$$

Сигнал похибки похідних вихідної напруги та вихідної напруги розрахованої спостерігачем може бути визначено як:

$$\frac{de_U}{dt} = \frac{dU_{dc}}{dt} - \frac{d\hat{U}_{dc}}{dt} = - \left(\frac{U_{dc}}{C \cdot R_L} - \frac{\hat{U}_{dc}}{C \cdot R_{L0}} \right) - \lambda \cdot \text{sign}(e_U), \quad (3.32)$$

де λ – позитивна константа, яка має бути більшою розрахункового значення:

$$\lambda > \left| - \left(\frac{U_{dc}}{C \cdot R_L} - \frac{\hat{U}_{dc}}{C \cdot R_{L0}} \right) \right|, \quad (3.33)$$

Коли ковзний режим досягне сталої часу, еквівалентне керування буде задовільняти рівнянню:

$$U_{dc} = \hat{U}_{dc} \Rightarrow \left(\frac{\hat{U}_{dc}}{C \cdot R_L} - \frac{U_{dc}}{C \cdot R_{L0}} \right) = U_{R,eq}, \quad (3.34)$$

де $U_{R,eq}$ – сигнал вихідної напруги еквівалентного спостерігача.

Для зниження пульсацій значення еквівалентного спостерігача також застосовано фільтр нижніх частот:

$$\hat{U}_{R,eq} = \Phi HЧ \cdot (\lambda \cdot \text{sign}(e_U)). \quad (3.35)$$

Опір навантаження може бути визначення за допомогою спостерігача вихідної напруги згідно наступного рівняння:

$$\hat{R}_L = -\frac{C \cdot \hat{U}_{R,eq}}{\hat{U}_{dc}} + R_{L0}. \quad (3.36)$$

3.3 Комп'ютерне моделювання регулятора вихідної напруги трифазного активного випрямляча з системою автоматичного керування на базі ковзного режиму.

Для визначення показників якості регулювання вихідної напруги активного випрямляча при зміні опору навантаження розроблена комп'ютерна імітаційна модель активного трифазного випрямляча, яка містить описаний алгоритм роботи регулятора вихідної напруги та спостерігачів фазної напруги та опору навантаження. Моделювання виконано в програмі Matlab / Simulink.

Під час моделювання протягом інтервалу від 0 до 1,5 сек вимірювання вхідної напруги реалізовано за допомогою датчиків. На інтервалах часу від 1,5 до 3 сек застосовано спостерігач вихідної напруги на базі ковзного режиму. Під час моделювання вихідний опір змінювався між значеннями 80 Ом та 40 Ом згідно графіка, який приведено на рисунку 3.5.

Параметри силової частини моделі активного чотириквadrантного випрямляча представлено в таблиці 3.1.

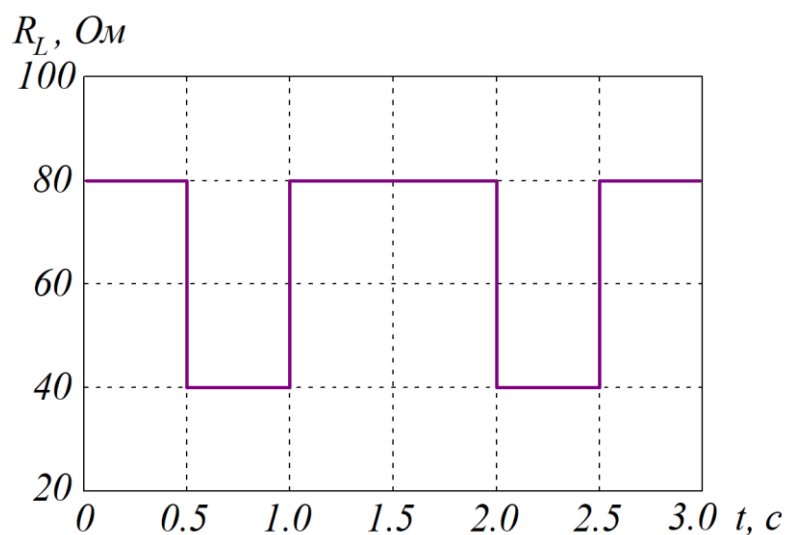


Рисунок 3.5 – Миттєве значення опору навантаження задане в моделюванні

Таблиця 3.1 – Параметри силової частини моделі активного чотириквadrантного випрямляча

Параметр	Значення
Частота напруги електричної мережі f , Гц	50
Діюче значення напруги мережі U , В	220
Сигнал завдання вихідної напруги U_{dc}^* , В	300
Індуктивність вхідного дроселя L , Гн	$16 \cdot 10^{-3}$
Активний опір електричної мережі R , Ом	0,1
Ємність вихідного конденсатора C , мкФ	1100
Опір навантаження активного випрямляча R_L , Ом	40-80
Частота ШІМ, кГц	15

Сигнал завдання вихідної напруги та її вимірне значення в ході перехідного процесу зміни опору навантаження представлено на рисунку 3.6.

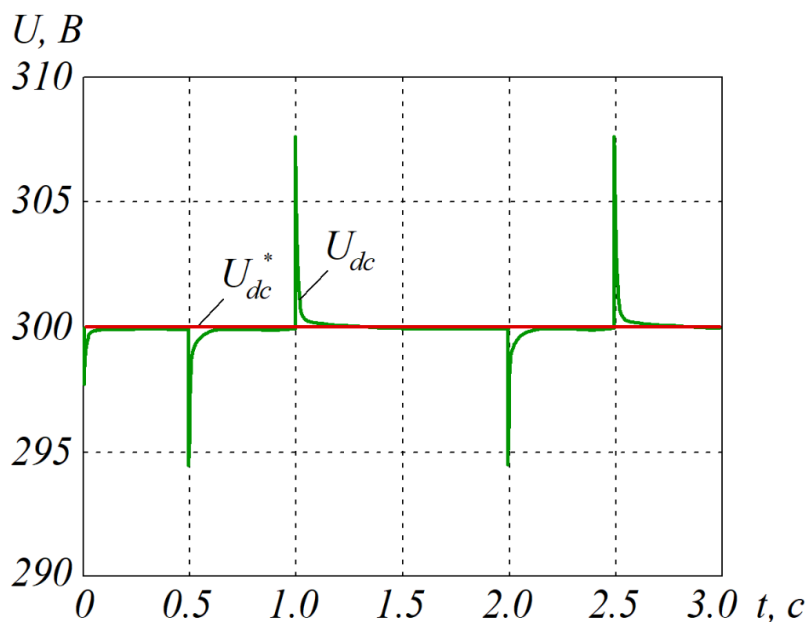


Рисунок 3.6 – Сигнал завдання вихідної напруги та її виміряне значення в ході перехідного процесу зміни опору навантаження

Завданням регулятора є підтримка заданого значення вихідної напруги 300В під час зміни опору навантаження.

На рисунку 3.7 представлено миттєві значення сигналів завдання активної та реактивної потужності та їх фактичні значення.

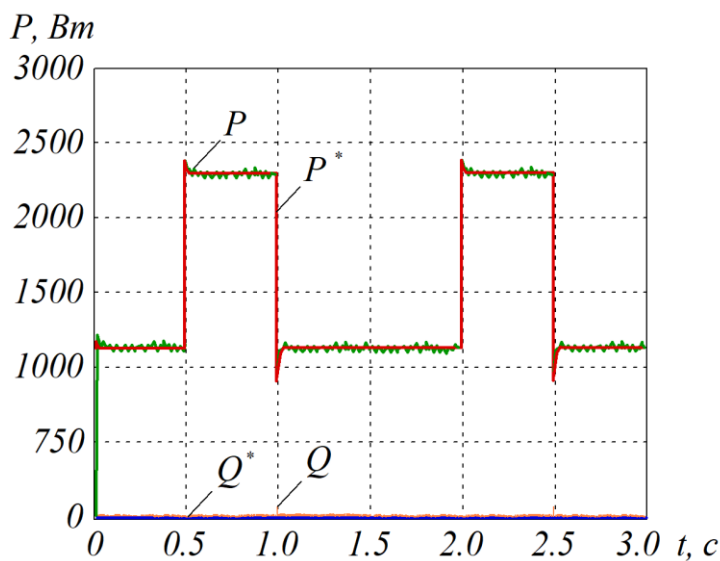


Рисунок 3.7 – Миттєві значення сигналів завдання активної та реактивної потужності та їх фактичні значення

З рисунку 3.7 видно, що реактивна потужність має нульове значення, що гарантує коефіцієнт потужності близький до одиниці, тому струм і напруга завжди знаходяться у фазі.

Незалежно від робочих умов, введення спостерігача напруги в момент часу 1,5 с дає гарні результати, а розрахункова напруга мережі не показує згасання амплітуди або фазової затримки порівняно з фактичним сигналом.

Моделювання також проводилося в розімкненому контурі, щоб продемонструвати переваги спостерігача, пов'язаного з подвійними фільтрами нижчих частот та алгоритмом компенсації. Як наведено на рисунках 3.8, 3.9, похибки в амплітуді та фазі дуже помітні, коли спостерігач використовує один фільтр нижчих частот на інтервалі від 0 до 0,5 с. На інтервалі від 0,5 до 1 с вводиться система з урахуванням подвійних фільтрів нижчих частот і алгоритм у компенсації. Можна помітити, що амплітудне згасання та фазова затримка можуть бути зкомпенсовані.

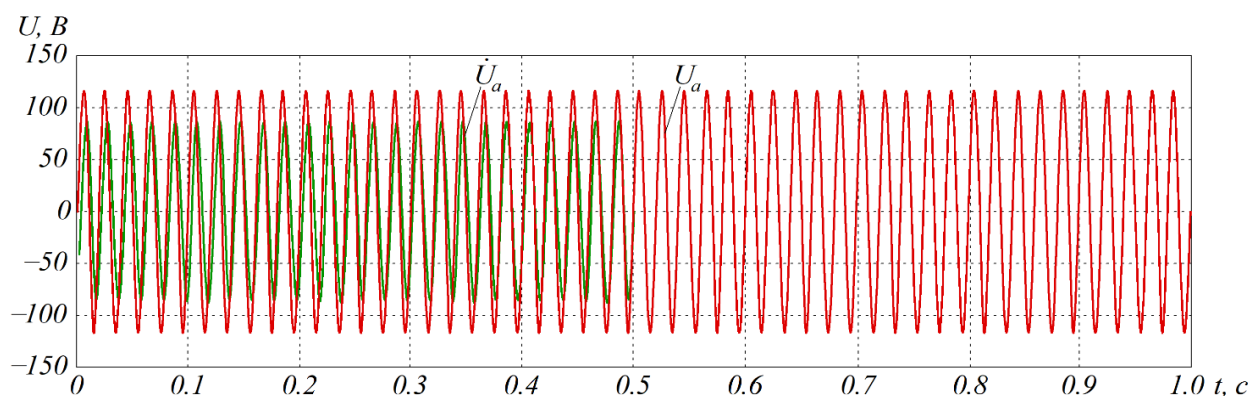


Рисунок 3.8 – Робота спостерігача вхідної напруги

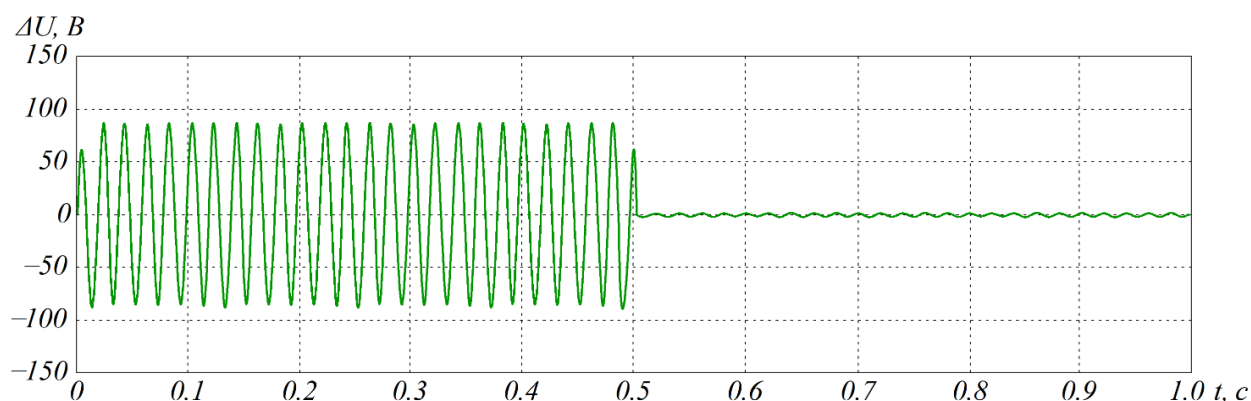
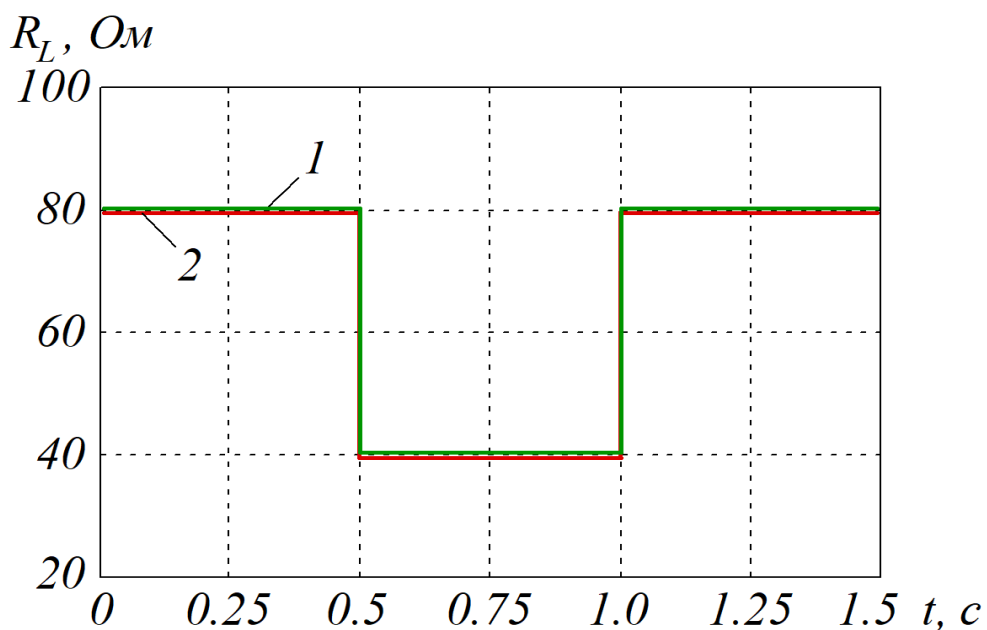


Рисунок 3.9 – Похибка спостерігача вхідної напруги

На рисунку 3.10 показано, що спостерігач точно оцінює зміну навантаження. При цьому, значення похибки є досить малим (дивись рисунок 3.11).



1 – реальне значення; 2 – значення отримане за допомогою спостерігача

Рисунок 3.10 – Зміна опору навантаження

Сигнал похибки спостерігача вихідного опору навантаження представлено на рисунку 3.11.

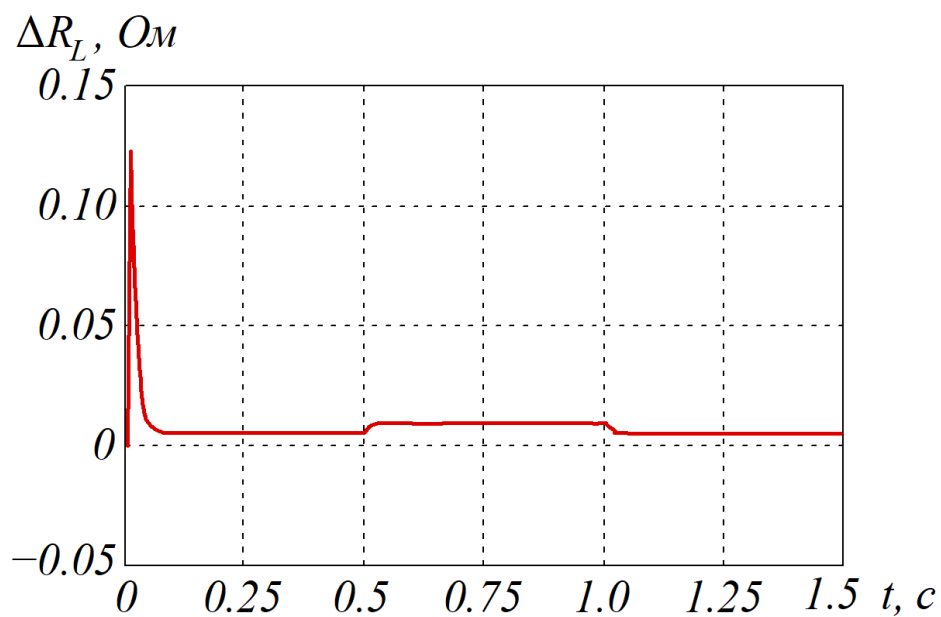


Рисунок 3.11– Сигнал похибки спостерігача вихідного опору навантаження

Миттєві значення сигналу завдання вихідної напруги U_{dc}^* та вимірюваного значення вихідної напруги U_{dc} при ступінчатій зміні опорного навантаження представлено на рисунку 3.12.

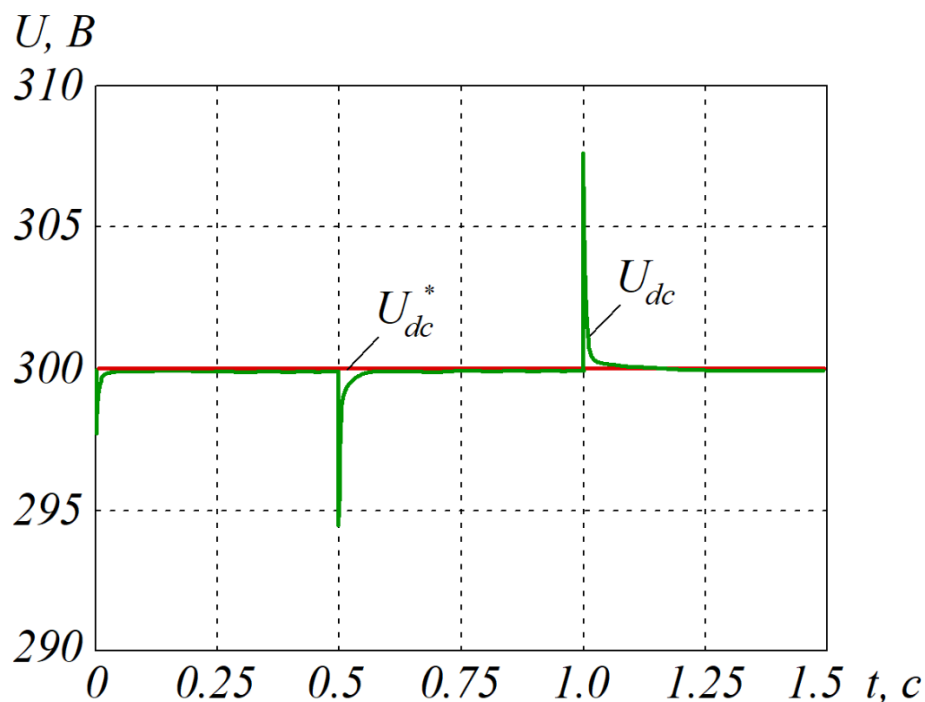


Рисунок 3.12 – Миттєві значення сигналу завдання вихідної напруги U_{dc}^* та вимірюваного значення вихідної напруги U_{dc}

Як видно з рисунку 3.12 при ступінчатій зміні опорного навантаження вихідна напруга відрізняється від її сигналу завдання на 5В, що є задовільним показником при регулюванні.

Миттєві значення сигналів завдання активної та реактивної потужності та фактично виміряних значень при ступінчатій зміні опорного навантаження представлено на рисунку 3.13.

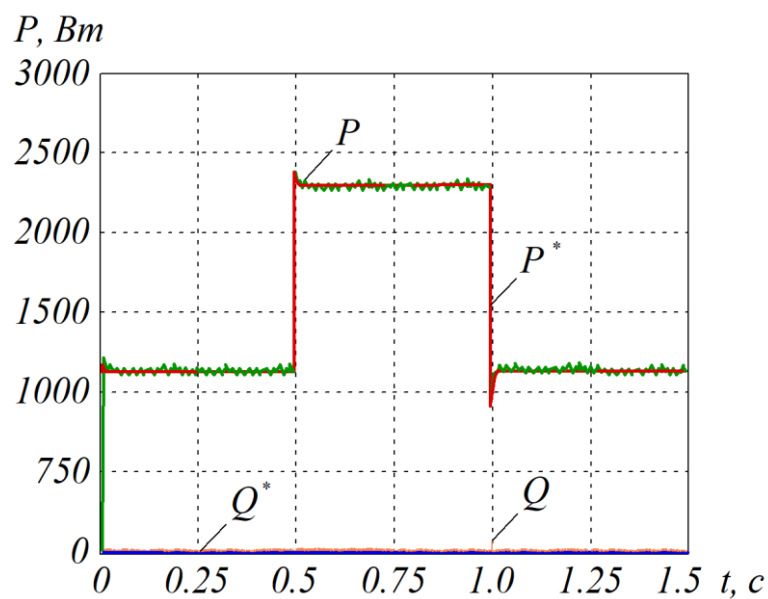


Рисунок 3.13 – Миттєві значення сигналів завдання та фактично виміряних сигналів активної та реактивної потужності

Миттєве значення коефіцієнту потужності в процесі регулювання представлено на рисунку 3.14.

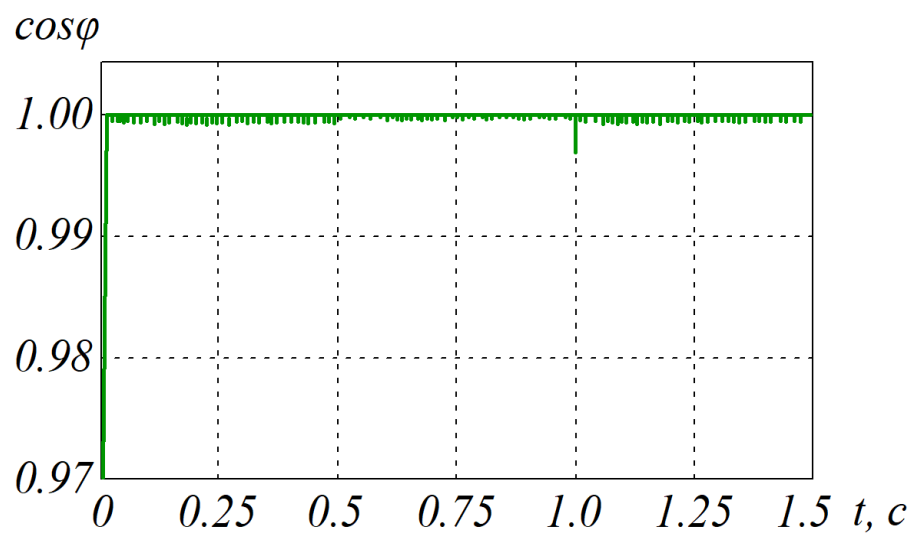


Рисунок 3.14. – Миттєве значення коефіцієнту потужності в процесі регулювання

Як видно з рисунку 3.14 коефіцієнт потужності в процесі регулювання підтримується близьким до одиниці.

Що стосується якості електроенергії, як в умовах роботи спостерігача напруги мережі, так і без нього, коефіцієнт гармонічних спотворень THD становить 1,13, що менше 5 % відповідно до міжнародних стандартів.

Висновки до розділу 3

Представлено систему прямого керування потужністю активного випрямляча з ковзним регулятором і спостерігачем величини вихідної напруги. Визначено параметри ковзного регулятора для регулювання виходу, активної та реактивної потужності з електричної мережі. Знайдено параметри спостерігача напруги мережі з алгоритмом компенсації. Проведено імітаційне моделювання системи керування регулятора активного випрямляча у програмному середовищі Matlab / Simulink. Отримані результати показують, що активний випрямляч забезпечує кращі показники якості електричної енергії з малим значенням коефіцієнта гармонічних спотворень та коефіцієнтом потужності близьким до одиниці.

До того ж, виконана така робота:

- розглянуто схему АВН напруги з широтно-імпульсною модуляцією. Відповідно до схеми заміщення, наведено систему диференціальних рівнянь, що описують електромагнітні процеси у вхідній електричній мережі;

- визначено параметри системи прямого керування потужністю активного випрямляча напруги на основі ковзного режиму. Для наведеної структурної схеми трифазного активного випрямляча з ковзним регулятором та спостерігачем величини вихідної напруги керування потужністю відсутня необхідність у таблиці перемикання ключами, тим самим зменшується складність такого керування. Ковзний регулятор в розглянутій структурі виконує функції регулювання вихідної напруги, а також регулювання величини активної та реактивної складових потужності, що споживається з електричної мережі;

— представлено роботу системи керування регулятора активного випрямляча, заснованого на реалізації ковзного режиму при зміні опору навантаження та зі спостерігачем навантаження. Спостерігач напруги мережі з урахуванням ковзного режиму разом з алгоритмом компенсації забезпечує точні результати з мінімальним коливанням, на відміну від одного фільтра нижчих частот. Активний випрямляч забезпечує кращі показники якості електричної енергії зі значенням THD менше 5 % та коефіцієнтом потужності близьким до одиниці.

Розділ 4

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗАПРОПОНОВАНИХ СИСТЕМ ЗАРЯДНОЇ СТАНЦІЇ В КОМП'ЮТЕРНОМУ МОДЕЛЮВАННІ

4.1 Інтегральний метод аналізу ККД повного процесу заряду електромобіля в зарядної станції із застосуванням активного випрямляча

При роботі зарядної станції вихідний струм і вихідна напруга зарядної станції під час заряду змінюється, а саме струм заряду прямує до нуля, а напруга батарейного відсіку збільшується від мінімального до максимального значення. При цьому в процесі заряду миттєве значення ККД зарядної станції змінюється в певному діапазоні.

Недоліком багатьох досліджень в яких приведено дослідження втрат та ККД різних зарядних станцій [23, 26, 27, 43] є те, що в них приведено значення енергоефективності для однієї точки (зазвичай максимальне значення).

У роботі запропоновано визначення інтегрального значення ККД зарядної станції протягом повного інтервалу заряду. ККД оцінювався на основі комп'ютерного моделювання запропонованої зарядної станції (дивись рисунок 4.1) та визначення сумарної енергій втрат і корисної енергії, отриманої батареєю.

Особливістю проведеного розрахунку ККД є те, що в ньому враховано те, що під час заряду батареї струм заряду змінюється у часі (є досить високим у режимі CC та спадає у режимі CV).

Структура запропонованої зарядної станції приведена на рисунку 4.1.

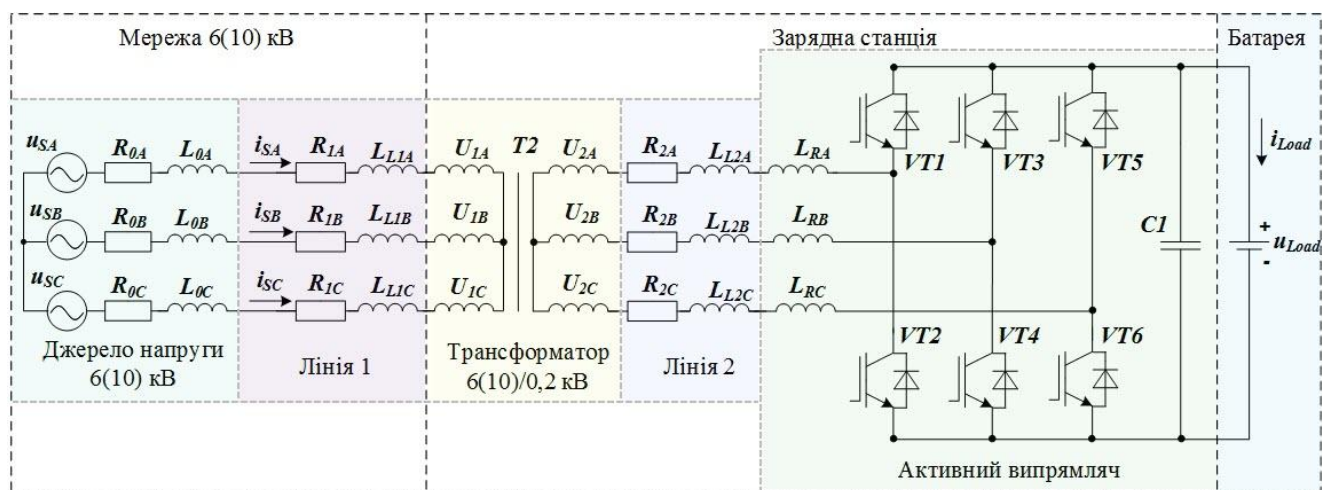
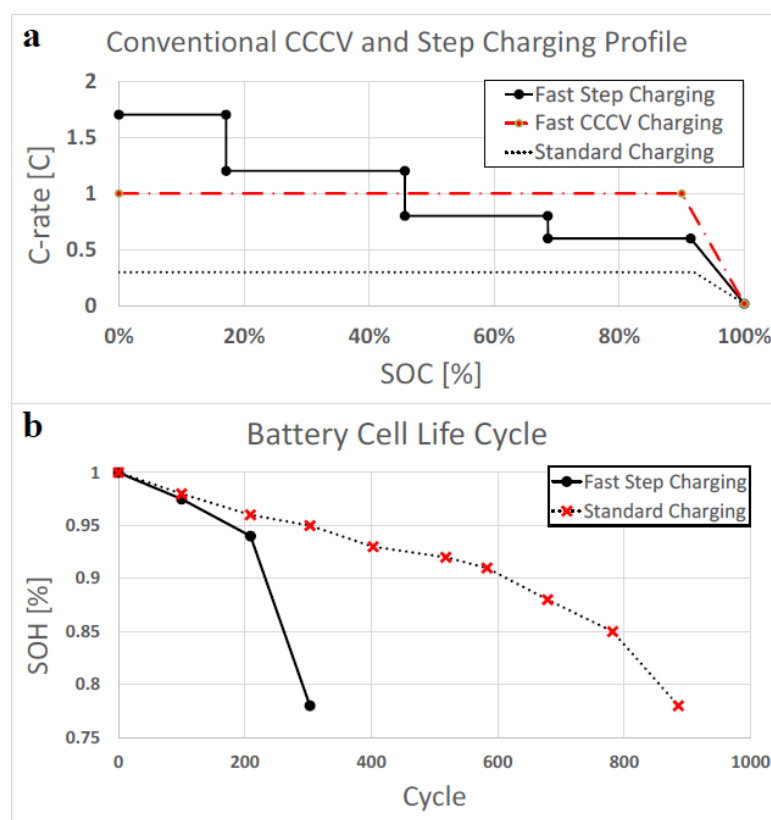


Рисунок 4.1 – Запропонована структура зарядної станції

Мережа 6 (10) кВ представлена трифазною симетричною системою синусоїдальних напруг u_{SA} , u_{SB} , u_{SC} . Параметри мережі враховані активними опорами R_0 і індуктивністю L_0 . У якості мережі виступає вторинна обмотка трансформатора ТМН-4000/35/6. Параметри лінії 1 – лінії від вторинної обмотки трансформатора ТМН-4000/35/6 (мережі 6(10) кВ) до перетворювального трансформатора $T2$ серії СПЗ-1000/10У3 6 (10) / 0,2 кВ визначаються активним опором R_1 і індуктивністю L_2 . Параметри лінії, що з'єднує тягову підстанцію і перетворювальний трифазний трансформатор 6 (10) кВ / 0,2 кВ, визначаються активним опором R_2 і індуктивністю L_1 . Обмотки живлення трансформатора $T2$ підключаються до мережі 6 (10) кВ, а вентильні – до активного випрямляча, який складається з дроселів $L_{1A} - L_{1C}$, транзисторів $VT1 - VT6$ і конденсатора C_1 . Навантаження представлено батареєю постійного струму, яка враховує параметри опору, струму та напруги акумуляторного відсіку електромобіля Tesla.

Заряджання акумуляторів електромобілів зі швидкістю, порівнянною із заправкою бензинових автомобілів, залишається невирішеною проблемою [78]. Для вирішення цієї проблеми та сприяння подальшому зростанню на ринку електромобілів важливим є технологія, здатна швидко заряджати літій-іонні акумулятори, зберігаючи при цьому прекрасний термін служби. Таким чином, розвиток матеріалів та технологій виробництва, придатних для високошвидкісної зарядки, приве-

ртав увагу як виробників акумуляторів, так і наукових кіл [1–5]. Однак через відсутність інтересу до розробки методів швидкої зарядки компанії-виробники акумуляторів надають виробникам оригінального обладнання автомобілів попередньо проаналізовані дані із типових моделей зарядки. У цьому контексті більшість типових моделей швидкої зарядки складаються із звичайних одно- або багаторазових процесів постійної напруги з постійною струмом (CC-CV), як показано на рисунку 4.2 [6–9]. Щоб зменшити час зарядки, звичайні методи, як правило, включають зарядку акумулятора високим постійним струмом в області низького стану заряду (SOC) перед зарядкою акумулятора через ряд кроків зменшення струму заряду, оскільки SOC збільшується з метою мінімізації деградація акумуляторних батарей.



а – зміна струму заряду в функції поточного значення відсотку заряду батареї (SOC–state of charge); б – кількість циклів, які батарея зможе працювати при розглянутих алгоритмах заряду

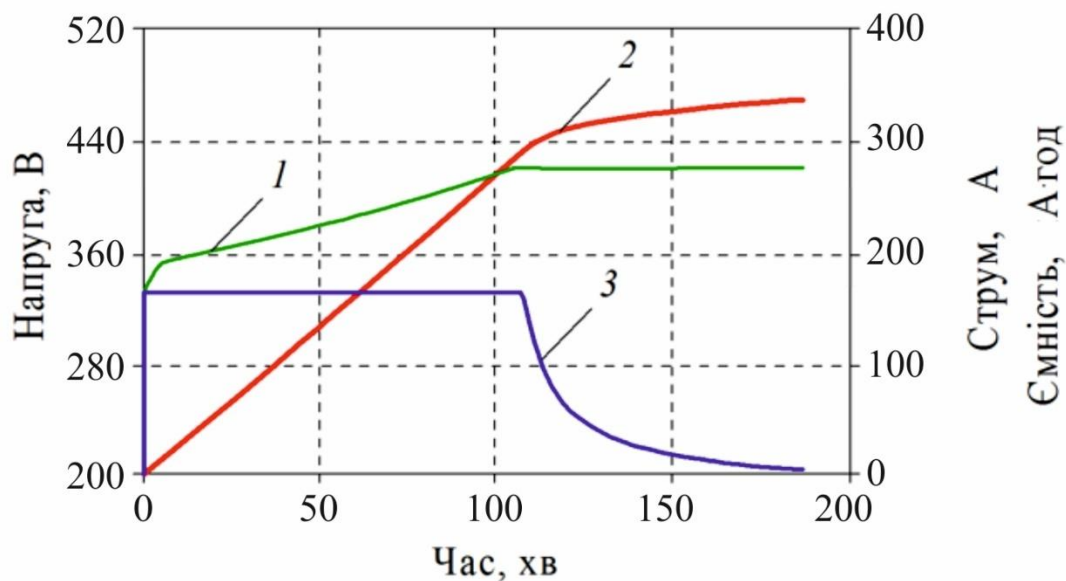
Рисунок 4.2 – Вплив алгоритму заряду на кількість робочих циклів

Однак ці звичайні методи крокової зарядки не відображають якість батарей та стану, спричиненого внутрішньою деградацією, що в кінцевому підсумку призводить до швидкої деградації батарей (дивись рисунок 4.2 б) [6]. Інші нещодавно відомі методи швидкої зарядки включають імпульсну зарядку та підсилювальну зарядку [10–13], які вводять періодичні паузи для запобігання покриттю літієм. Таке покриття спричинене високими концентраціями іонів літію навколо анода через високий струм заряду, що використовується в цих процесах. Однак, оскільки конструкція схеми швидкої зарядки пов'язана з балансом між часом зарядки та життям клітинного циклу, використання вищих струмів заряду для компенсації часу паузи може призвести до швидких втрат потужності.

Роблячи висновок з рисунку 4.2. ми бачимо, що оптимальним режимом заряду для акумуляторних батарей є метод заряду за режимом CC-CV. Саме тому представлена структура зарядної станції повинна забезпечити зарядну характеристику акумуляторного відсіку батареї електромобіля за методом заряджання «constantcurrent – constantvoltage».

Зарядна характеристика (залежність струму заряду, напруги на батарейному відсіку та величини заряду ємності в часі) акумуляторного відсіку електромобіля Tesla наведено на рисунку 4.3.

Перевагою представленого алгоритму розрахунку є те, що він враховує значення вищих гармонік струму та може враховувати несиметричні режими роботи ЗС для електромобілів.



1 – напруга, 2 – ємність, 3 – струм

Рисунок 4.3 – Перехідні процеси в батарейному відсіку, який складається з батарей типу NCR 18650 при заряді батареї номінальним значенням струму

Розрахунок ККД здійснюється за виразом:

$$\eta = \frac{E_{Load}}{E_{Load} + \Delta E_{\Sigma}}, \quad (4.1)$$

де E_{Load} – корисна енергія, що передається на батарею за час заряду;
 ΔE_{Σ} – сумарна енергія втрат в розглянутій системі.

$$\Delta E_{\Sigma} = E_S + E_{L1} + E_{TV} + E_{L2} + E_{LR} + E_{AR} + E_{CR}, \quad (4.2)$$

де E_S – енергія втрат в джерелі (вторинна обмотка трансформатору 35/6(10) кВ);
 E_{L1} – енергія втрат в опорі лінії 1;
 E_{TV} – енергія втрат в трансформаторі 6 (10) / 0,2 кВ;
 E_{L2} – енергія втрат в лінії 2;
 E_{LR} – енергія втрат у входних дроселях активного випрямляча;

E_{AR} – енергія втрат в ключах активного випрямляча;

E_{CR} – енергія втрат у вихідному конденсаторі

Вищезазначені енергії розраховуються за повний інтервал процесу заряду батареї від 0% до 100% SOC.

При розрахунках зроблено допущення симетрії живлячої напруги, індуктивності та активного опору ліній.

Енергія втрат в джерелі – це енергія втрат вторинної обмотки трансформатора ТМН4000/35/6 35/6(10) кВ. Енергія втрат в джерелі (E_s) розраховується за формулою:

$$E_s = 3 \cdot \int_0^T (i_s^2 \cdot R_s) dt \quad (4.3)$$

де i_s – миттєве значення струму на ділянці лінії 1;

R_s – значення опору вторинної обмотки трансформатора Tl ;

T – періоду повторюваності, обчисленому як відрізок часу від початку заряду до кінця заряду (від 0% до 100% SOC).

Розрахунок енергії втрат в активному опорі лінії 1 (E_{L1}) вівся за формулою:

$$E_{L1} = 3 \cdot \int_0^T (i_s^2 \cdot R_{L1}) dt \quad (4.4)$$

де R_{L1} – значення опору в лінії 1.

Розрахунок енергії втрат в активному опорі лінії 2 (E_{L2}) вівся за формулою:

$$E_{L2} = 3 \cdot \int_0^T (i_{L2}^2 \cdot R_{L2}) dt \quad (4.5)$$

де i_{L2} – миттєве значення струму на ділянці лінії 2;

R_{L2} – значення опору в лінії 2.

Для розрахунку значення опору на ділянках лінії 1 та лінії 2 враховувалися параметри матеріалу провідників, поперечного перерізу та довжини ліній.

У відносних одиницях опір фази трансформатора (R_{pu}) розраховується по формулі:

$$R_{pu} = \frac{\Delta P_{к.з.}}{2 \cdot P_n} \quad (4.6)$$

де $\Delta P_{к.з.}$ – втрати короткого замикання трансформатора згідно технічної документації;

P_n – потужність навантаження згідно технічної документації.

Після того, як вирахували опір фази трансформатора у відносних одиницях можемо перерахувати його на опір фази трансформатора на первинній (R_{1TV}) і вторинній обмотці (R_{2TV}):

$$R_{1TV} = \frac{R_{pu} \cdot U_{1лн}^2}{P_n} \quad (4.7)$$

$$R_{2TV} = \frac{R_{pu} \cdot U_{2лн}^2}{P_n} \quad (4.8)$$

де $U_{1лн}$ та $U_{2лн}$ – номінальне значення лінійної напруги первинної та вторинної обмоток трансформатора.

Енергія втрат в трансформаторі 6 (10) / 0,2 кВ (E_{TV}) визначаються як сума втрат на омичному опорі первинної (E_{1TV}) та вторинної (E_{2TV}) обмотки трансформатора:

$$E_{1TV} = 3 \cdot \int_0^T (i_s^2 \cdot R_{1TV}) dt \quad (4.9)$$

$$E_{2TV} = 3 \cdot \int_0^T (i_{L2}^2 \cdot R_{2TV}) dt \quad (4.10)$$

$$E_{TV} = E_{1TV} + E_{2TV} \quad (4.11)$$

Енергія втрат у опорі вхідних дроселях активного випрямляча в періоді повторюваності розраховується за формулою:

$$E_{LR} = 3 \cdot \int_0^T (i_{L2}^2 \cdot R_{ARL}) dt \quad (4.12)$$

де R_{ARL} – значення опору обмотки дроселя.

Енергія втрат у вихідному конденсаторі активного випрямляча в періоді повторюваності розраховується за формулою:

$$E_{CR} = \int_0^T (i_{Load}^2 \cdot R_{ESR}) dt \quad (4.13)$$

де i_{Load} – миттєве значення вихідного струму;

R_{ESR} – значення еквівалентного послідовного активного опору конденсатора.

4.2 Метод визначення енергії втрат в силових транзисторах перетворювача зарядної станції

Силові IGBT-модулі зазвичай складаються з транзисторної частини та зворотнього діода (дивись рисунок 4.4). При цьому як в транзисторі, так і в зворотньому діоді є статичні та динамічні втрати потужності.

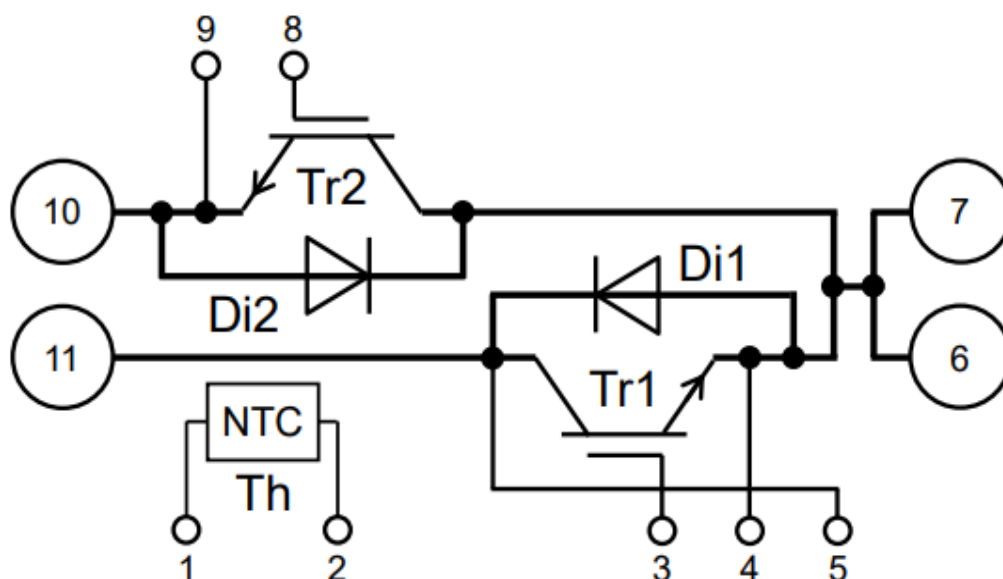


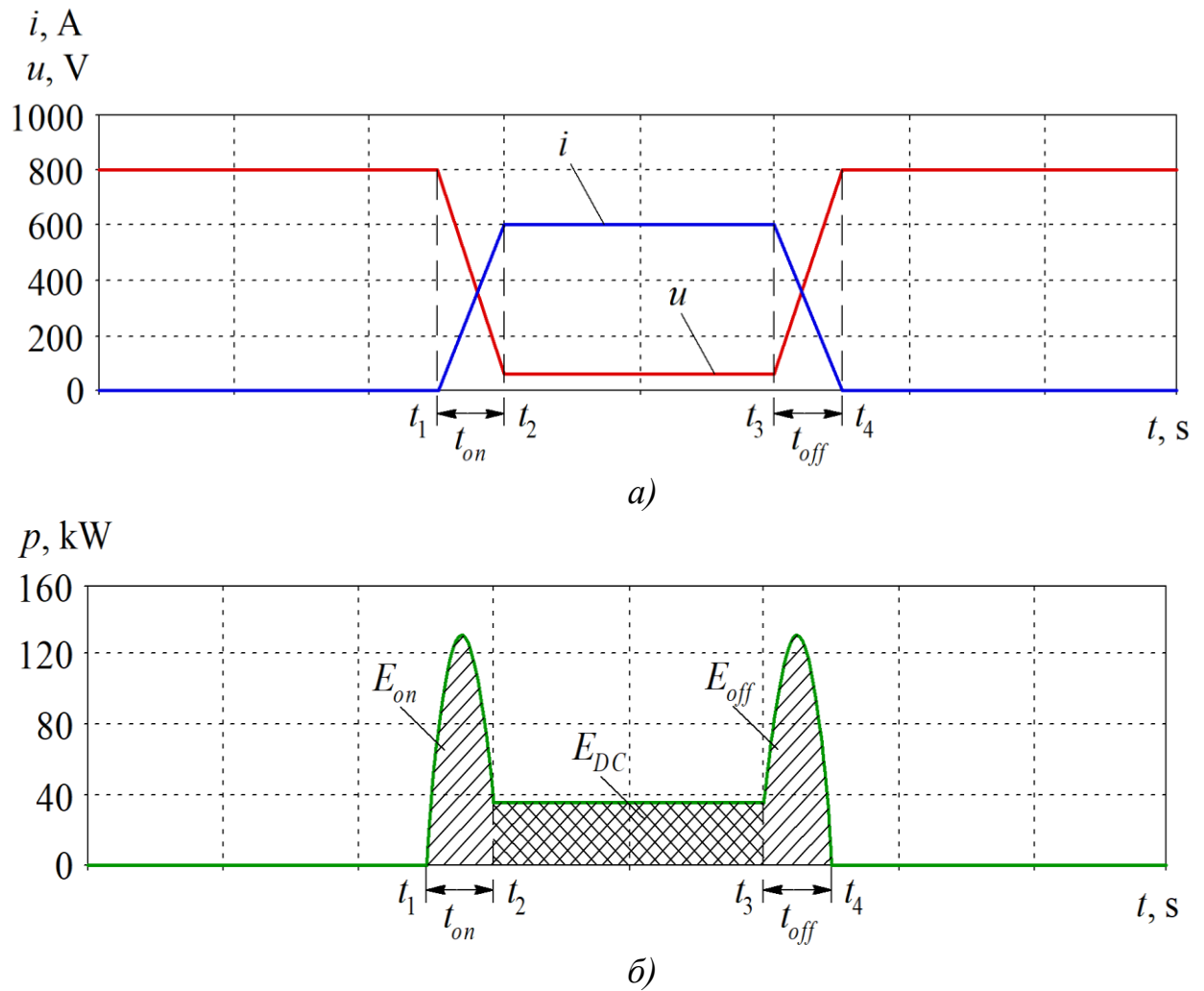
Рисунок 4.4 – Типова схема IGBT-модуля

Статичні втрати потужності зумовлені розсіюванням потужності в транзисторі при протіканні струму у ввімкненому стані. (зумовлені тим, що на переході емітер-колектор є падіння напруги і через нього завжди протікає струм).

Динамічні втрати потужності в силовому транзисторі – це втрати які зумовлені процесом комутації, а саме процесами ввімкнення та вимкнення та пропорційно залежать від частоти комутації.

Динамічні втрати потужності в зворотньому діоді – зумовлені швидкою комутацією струму через діодну частину модуля та пов'язані з процесом його відновлення.

Приблизний процес комутації струму та напруги в IGBT-модулі й графічне розподілення статичних і динамічних втрат в транзисторі показано на рисунку 4.5 [22, 23,85].



а – перехідні процеси струму та напруги; б – перехідні процеси потужності

Рисунок 4.5 – Процес комутації в IGBT-ключі

Сумарні втрати в IGBT-модулі (E_{AR}), які складаються з динамічних і статичних втрат в IGBT-транзисторі і зворотному діоді, розраховуються за виразами:

$$E_{loss.IGBT} = E_{lossVT} + E_{lossVD}; \quad (4.14)$$

$$E_{lossVT} = E_{VT.DC} + E_{VT.SW}; \quad (4.15)$$

$$E_{lossVD} = E_{VD.DC} + E_{VD.SW}, \quad (4.16)$$

де E_{lossVT} – енергія втрат в транзисторах модуля IGBT;
 E_{lossVD} – енергія втрат в паралельних діодах модуля IGBT;
 $E_{VT.DC}$ – енергія статичних втрат в IGBT-транзисторах;
 $E_{VT.SW}$ – енергія динамічних втрат в IGBT-транзисторах;
 $E_{VD.DC}$ – енергія статичних втрат в паралельних діодах;
 $E_{VD.SW}$ – енергія динамічних втрат в паралельних діодах.

4.3 Енергія втрат потужності в ключах активного випрямляча визначається шляхом комп'ютерного моделювання в програмі Matlab/Simulink

Оскільки базові моделі IGBT-транзисторів і силових діодів в Matlab не враховують динамічні втрати, а їх вольт-амперні характеристики представлені лінійною функцією, що може викликати значні похибки у моделюванні статичних втрат, була розроблена власна субмодель для розрахунку сумарної енергії втрат в силових ключах.

Вхідними даними для розрахунку статичних та динамічних втрат в ключах АВ є миттєві значення струмів транзисторів, сигнали керування ключами, миттєві значення напруги на силових ключах та аналітичні функції, що описують наступні енергетичні характеристики силового транзистора:

Залежність падіння напруги на рп-переході колектора-емітера від струму колектора $u_{ce}(i_c)$;

Залежність падіння напруги на зворотньому діоді, а саме рп-переході емітер-колектор від струму емітера $u_{ec}(i_e)$;

Залежність енергії включення від струму колектора $E_{on}(i_c)$;

- Залежність енергії виключення від струму колектора $E_{off}(i_c)$;
- Залежність енергії відновлення зворотнього діода від струму емітера $E_{rec}(i_e)$.

$$E_{VT.DC} = \int_0^{T_{\beta}} (i_c \cdot u_{ce}) dt, \quad (4.17)$$

де i_c – струм колектора;

u_{ce} – напруга між колектором та емітером.

Динамічні втрати в IGBT-транзисторах визначаються за виразом:

$$E_{VT.SW} = \int_0^{T_3} [E_{on}(I_c) + E_{off}(I_c)] dt, \quad (4.18)$$

$E_{off}(I_c)$ – енергія, що розсіюється в транзисторі при вимиканні.

Статичні втрати в зворотних діодах визначаються за виразом:

$$E_{VD.DC} = \int_0^{T_3} (u_{ec} \cdot i_e) dt, \quad (4.19)$$

де u_{ec} – падіння напруги на зворотному діоді;

i_e – струм зворотного діода.

Динамічні втрати в зворотних діодах визначаються за виразом:

$$E_{VD.SW} = \int_0^{T_3} E_{rec}(i_e) dt, \quad (4.20)$$

де E_{rec} – енергія відновлення зворотного діода.

У джерелі [37,88] наведено більш детальне моделювання статичних та динамічних втрат в силових ключах перетворювачів при використанні методів апроксимації енергетичних характеристик транзисторів.

У якості силового IGBT-модуля в моделі було обрано модуль CM600DX-13T з наступними параметрами:

Для розрахунку енергії втрат в силових ключах потрібно отримати математичні залежності функцій $u_{ce}(i_c)$, $u_{ec}(i_c)$, $E_{on}(i_c)$, $E_{off}(i_c)$ і $E_{rec}(i_e)$, приведених з доку-

ментації IGBT-модуля CM600DX-13T. Одним з варіантів отримання даних математичних функцій є переведення графічних енергетичних характеристик документації в табличний вигляд та подальша апроксимація табличних даних у функції.

Існують різні види апроксимації: лінійна, частково-лінійна, статична, експонентна та поліноміальна. Крім цього існують різні математичні методи, які дозволяють виконати апроксимацію. Метою апроксимації є визначення математичних функцій, які найбільш точно описують отримані залежності $u_{ce}(i_e)$, $u_{ec}(i_c)$, $E_{on}(i_c)$, $E_{off}(i_c)$ і $E_{rec}(i_e)$.

Поліноміальна апроксимація дозволяє досить точно математично описати енергетичні залежності силових IGBT-модулів в заданому діапазоні, проте поза цього діапазону функція буде поводитись некоректно, що накладає обмеження в застосуванні даного методу, а саме – розрахунок втрат працює коректно тільки в заданому діапазоні обмеження струму.

Врахування у моделюванні статичних та динамічних втрат потужності силових IGBT-транзисторів при використанні отриманих характеристик в програмному забезпеченні Matlab/Simulink більш детально наведено в роботі [69].

Для проведення автоматизованого розрахунку втрат потужності в силових IGBT-модулях вольт-амперні характеристики транзистора, діода та залежності енергії ввімкнення та енергії вимкнення від струму було апроксимовано методом найменших квадратів [25, 87]. Процес математичної апроксимації було виконано в програмі Microsoft Excel.

Були побудовані таблиці для кожної з необхідних функцій для подальшого моделювання енергії втрат в ключах активного випрямляча (дивись рисунки 4.7, 4.9, 4.11).

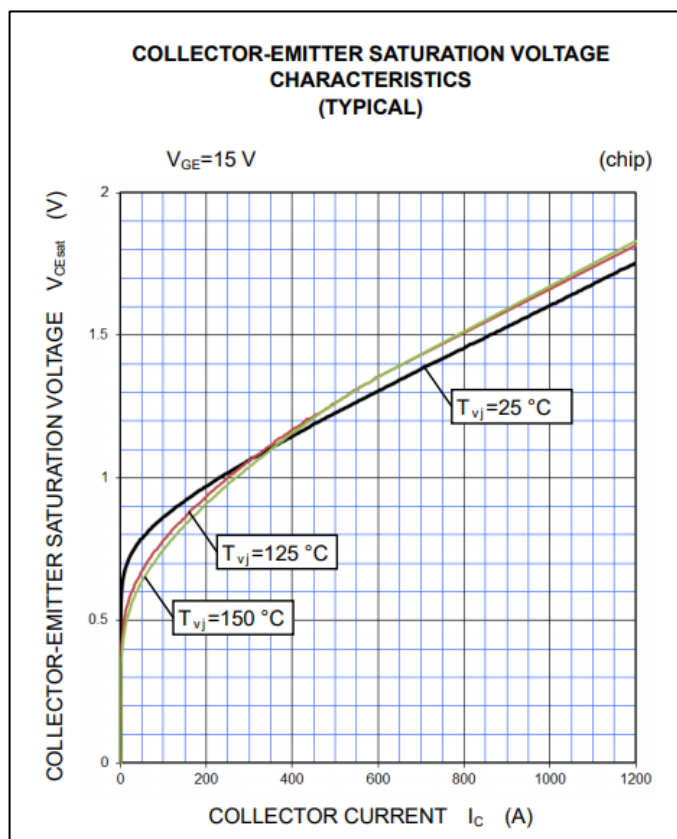


Рисунок 4.6 – Залежність напруги насичення колектора-емітера (u_{ce}) від струму колектора (i_c) модуля CM600DX-13T згідно технічної документації

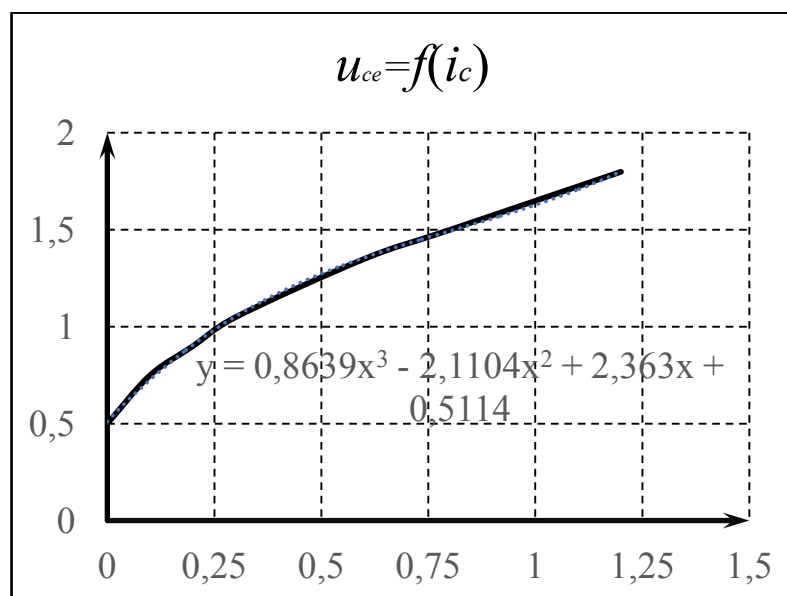


Рисунок 4.7 – Залежність напруги насичення колектора-емітера (u_{ce}) від струму колектора (i_c) модуля CM600DX-13T після апроксимації графіку (по осі X – i_c з розмірністю у 10^3 A , по осі Y – u_{ce} з розмірністю у В)

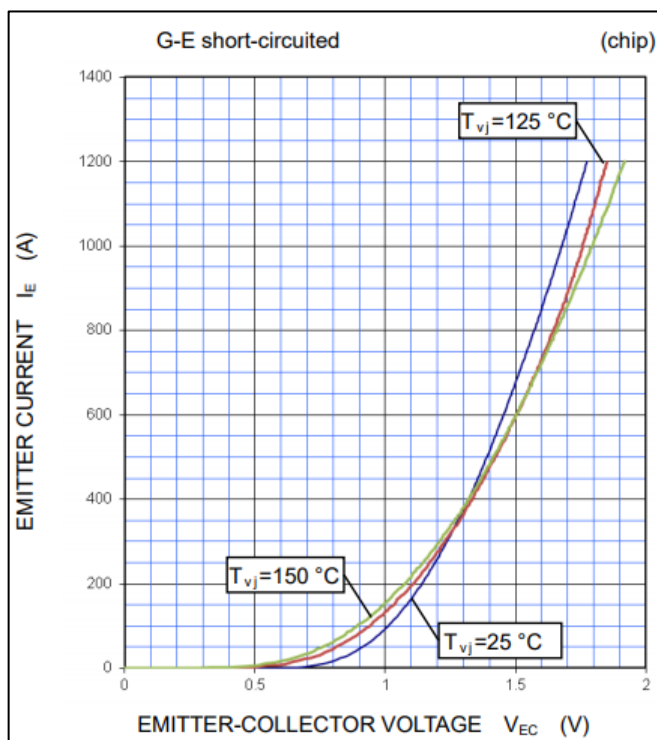


Рисунок 4.8 – Залежність напруги емітер-колектор (u_{ec}) від струму емітера (i_e) модуля CM600DX-13T згідно технічної документації

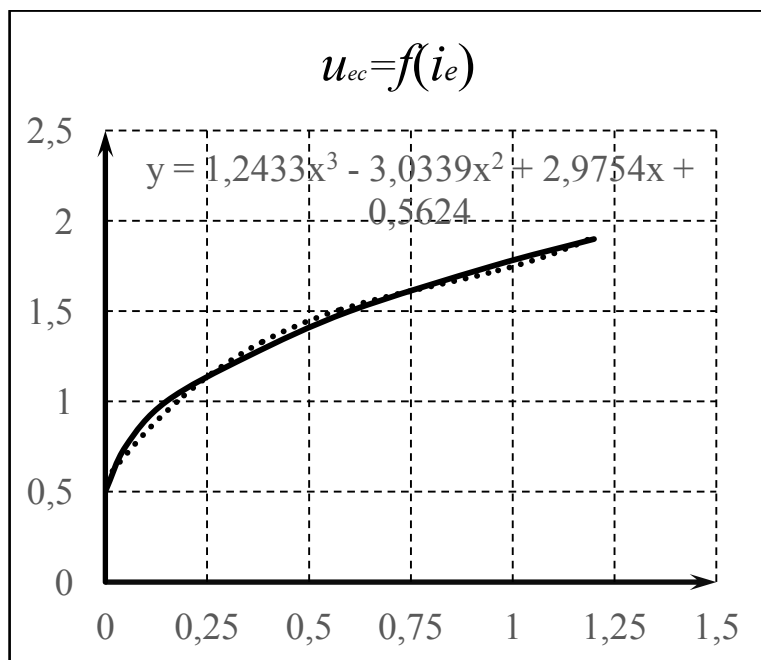


Рисунок 4.9 – Залежність напруги емітер-колектор (u_{ec}) від струму емітера (i_e) модуля CM600DX-13T після апроксимації графіку (по осі X – i_e з розмірністю $y \cdot 10^3$ A, по осі Y – u_{ec} з розмірністю y B)

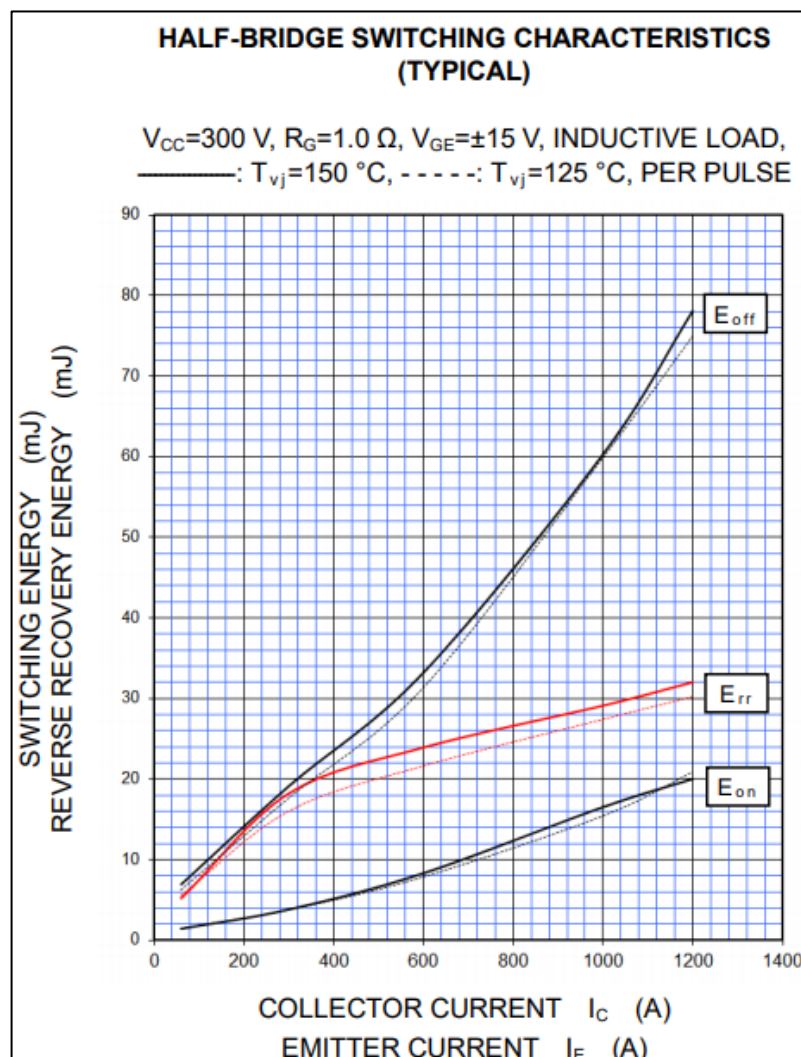


Рисунок 4.10 – Залежність енергії включення E_{on} , енергії виключення E_{off} від струму колектора i_c та залежність енергії зворотнього відновлення діода E_{rec} від струму емітера i_e модуля CM600DX-13T згідно технічної документації

Залежність енергії включення E_{on} , енергії виключення E_{off} від струму колектора i_c та залежність енергії зворотнього відновлення діода E_{rec} від струму емітера i_e модуля CM600DX-13T після апроксимації графіків представлено на рисунку 4.11.

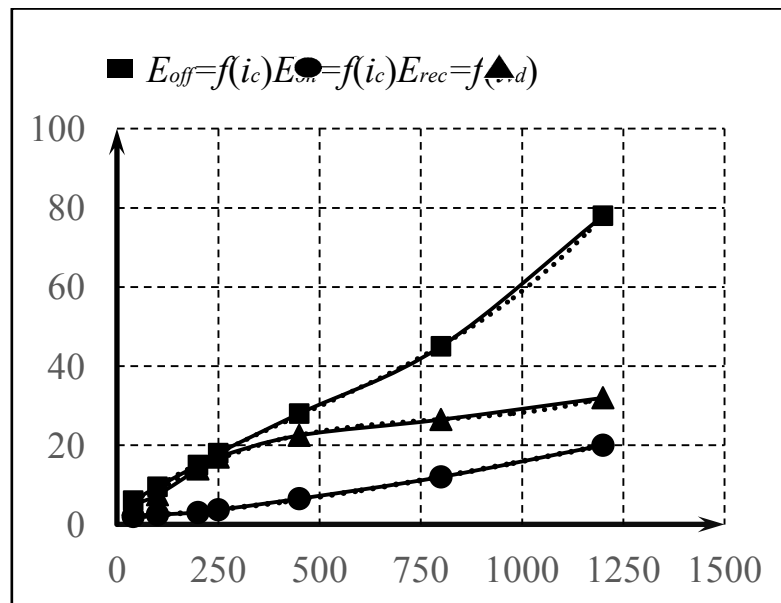


Рисунок 4.11 – Залежність енергії включення (E_{on}), енергії виключення (E_{off}) від струму колектора (i_c) та залежність енергії зворотнього відновлення діода (E_{rec}) від струму емітера (i_e) модуля SM600DX-13T після апроксимації графіків (по осі X – i_{ec} з розмірністю у А, по осі Y – E_{on} , E_{off} , E_{rec} з розмірністю у мДж)

З побудованих графіків $u_{ce}(i_e)$, $u_{ec}(i_c)$, $E_{on}(i_c)$, $E_{off}(i_c)$ і $E_{rec}(i_e)$ методом поліноміальної апроксимації були отримані наступні вирази, які будуть використані в Matlab-моделі далі:

$$u_{ce}(i_c) = 0,8639 \cdot \left(\frac{i_c}{1000}\right)^3 - 2,1104 \cdot \left(\frac{i_c}{1000}\right)^2 + 2,363 \cdot \left(\frac{i_c}{1000}\right) + 0,5114; \quad (4.21)$$

$$u_{ec}(i_e) = 1,2433 \cdot \left(\frac{i_e}{1000}\right)^3 - 3,0339 \cdot \left(\frac{i_e}{1000}\right)^2 + 2,9754 \cdot \left(\frac{i_e}{1000}\right) + 0,5624; \quad (4.22)$$

$$E_{on}(i_c) = 6,230414 \cdot 10^{-6} \cdot i_c^2 + 7,992571096 \cdot 10^{-3} \cdot i_c + 1,495824769248; \quad (4.23)$$

$$E_{off}(i_c) = 39,857 \cdot 10^{-9} \cdot i_c^3 - 55,3643 \cdot 10^{-6} \cdot i_c^2 + 71,5372 \cdot 10^{-3} \cdot i_c + 2,97379; \quad (4.24)$$

$$E_{rec}(i_{vd}) = 39,776 \cdot 10^{-9} \cdot i_{vd}^3 - 94,602431 \cdot 10^{-6} \cdot i_{vd}^2 + 81,874 \cdot 10^{-9} \cdot i_{vd} + 1,2314 \quad (4.25)$$

Дані в формулах 4.23 - 4.25 приведені для номінальній напрузі на IGBT-модулі 300 В.

Для зручності опису коефіцієнтів в апроксимованих функціях залежності приведено від струму в кілоамперах. Matlab-модель буде представлено далі.

4.4 Комп'ютерне моделювання енергетичних процесів роботи зарядної станції

4.4.1 Структура моделі зарядної станції

З метою дослідження енергетичних процесів, що протікають в запропонованій топології зарядної станції на базі трифазного активного чотириквadrантного випрямляча була розроблена комп'ютерна імітаційна модель.

На розробленій модулі було визначено:

- показники електромагнітної сумісності зарядної станції з електричною мережею, а саме показники емісії вищих гармонік фазних струмів, вміст реактивної потужності до трифазної електричної мережі, а також визначено значення коефіцієнт потужності;

- показники втрат потужності в силовій частині зарядної станції та інтегральне значення ККД процесу повного електромобіля зарядною станцією при реалізації різних частот модуляції та зарядних струмів.

Розроблена комп'ютерна модель зарядної станції приведено на рисунку 4.12 і за своєю структурою повторює схему, приведену на рисунку 4.1.

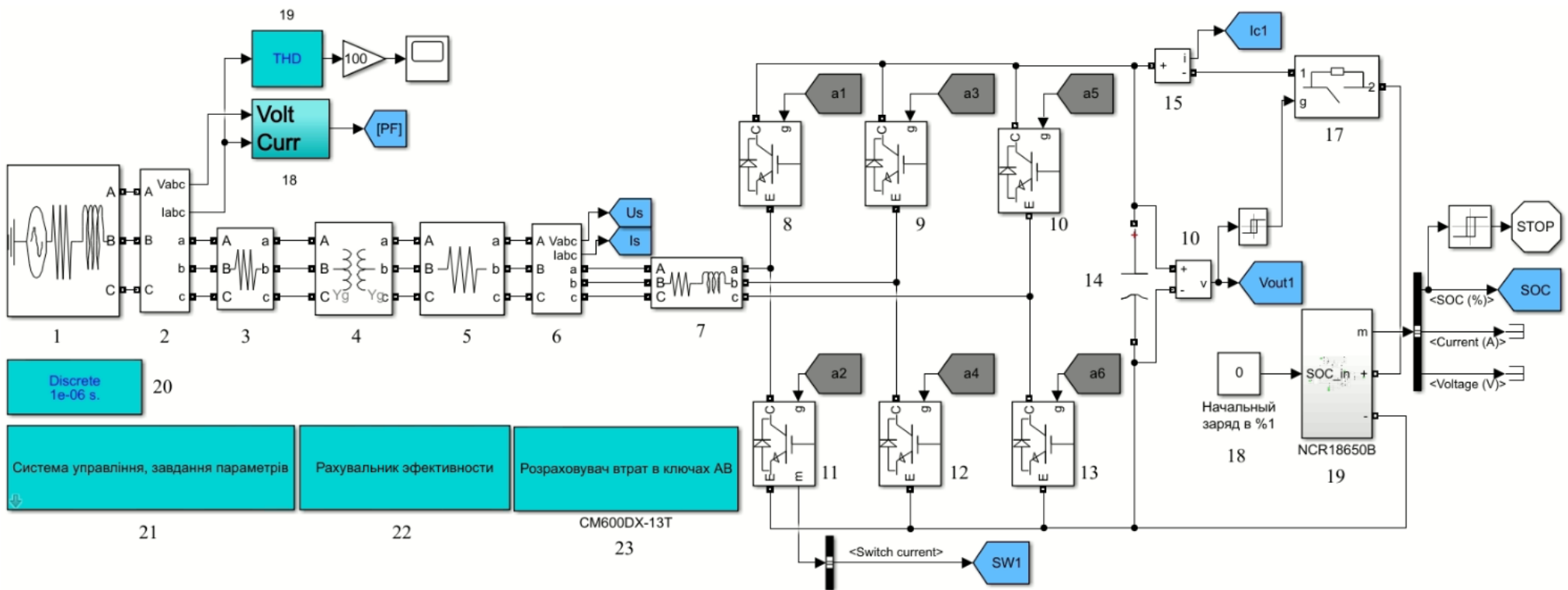


Рисунок 4.12 – Matlab-модель системи зарядної станції для електромобілів

Matlab - модель зарядної станції складається з наступних блоків:

- трифазного джерела змінної напруги 6(10) кВ, яке містить внутрішній активний опір та індуктивність 1;
- трифазний вимірювач струмів та напруг 2;
- активного опору лінії 1 і лінії 2 (згідно з рисунком 4.1), які імітують опір лінії (3 і 5 на рисунку 4.12);
- трифазного трансформатора змінного струму 6 (10) кВ / 0,2 кВ;
- активного випрямляча (7-14), який складається з вхідних трифазних індуктивностей та опору 7, силових IGBT-модулів (8-13) та вихідного фільтруючого конденсатора 14;
- силового контактора 17;
- підмодель імітатора батареї електромобіля 19 з блоком 18, в якому задається початкове значення величини SOC;
- датчики струму та напруги (2, 6, 10, 15);
- підсистема розрахувача коефіцієнта потужності 18;
- блок розрахувача THD для розрахунку THD вхідного струму (19);
- блок powergui 20;
- підмодель системи управління силовими ключами 8-13 та завдання початкових параметрів для моделювання – 21;
- підмодель рахувальника ефективності системи зарядної станції для електромобілів 22;
- підмодель розрахувача втрат в силових ключах 8-13 під номером 23.

Характеристики мережі живлення визначаються параметрами трифазного трансформатора живильної підстанції типу ТМН-4000/35/6. Параметри лінії 1 визначаються відстанню між тяговою підстанцією і перетворювальним трансформатором, що приймається рівною 1 км. Алюмінієвий трижильний кабель, що використовується в лінії 1, має величину опору фази $R_{1A} = 0,8 \text{ Ом/км}$, а його перетин вибирається по струму і дорівнює 35 мм^2 .

Перетворювальний трансформатор серії СПЗ-1000/10УЗ 6 (10) / 0,2 кВ має номінальну потужність 0,878 МВт і втрати короткого замикання 8 кВт. Сумарний еквівалентний опір його фази R_{TV} розраховується за (4.6) і дорівнює 1,73 мОм. Па-

параметри лінії 2 - це відстань між перетворювальним трансформатором $T2$ і активним випрямлячем, яку прийнято рівною 50 м. Перетин мідного кабелю дорівнює 350 мм^2 , величина опору фази $R_{2A} = 2,5 \text{ мОм}$. Значення індуктивності вхідних дроселів активного випрямляча дорівнюють $0,25 \text{ мГн}$.

Для активних випрямлячів обрано ключі типу CM600DX-13T від виробника Mitsubishi Electric з параметрами струму колектора $I_c = 600 \text{ А}$ і напруги колектор-емітера $U_{CE} = 650 \text{ В}$, ємність кожного вихідного конденсатора дорівнює 20 мФ . На основі інтегрального регулятора з подальшим ШІМ формуванням форми вхідного струму було реалізовано систему автоматичного регулювання струму та напруги заряду батареї [88,93]. Значення ємності вихідного конденсатора дорівнює 50 мФ . Внутрішній опір конденсатора 50 мФ складає 1 мОм .

4.4.2 Модель розраховувача втрат потужності в ключах активного випрямляча зарядної станції

Підмодель розраховувача втрат потужності (та енергії втрат) в ключах активного випрямляча представлена на рисунку 4.13.

Вхідними сигналами для підмоделі є сигнал керування з ШІМ-регулятора, струм транзистора, напруга транзистора. Принцип роботи: оскільки сумарна енергія втрат в силових ключах визначається за формулою (3.5) в моделі визначались складові частини втрат, які потім підсумовуються.

У підмоделі розрахунку втрат потужності в силових ключах АВ (дивись рисунок 4.13) відокремлено зони від 1 до 5. Кожна в цих зон визначає певний вид втрат потужності.

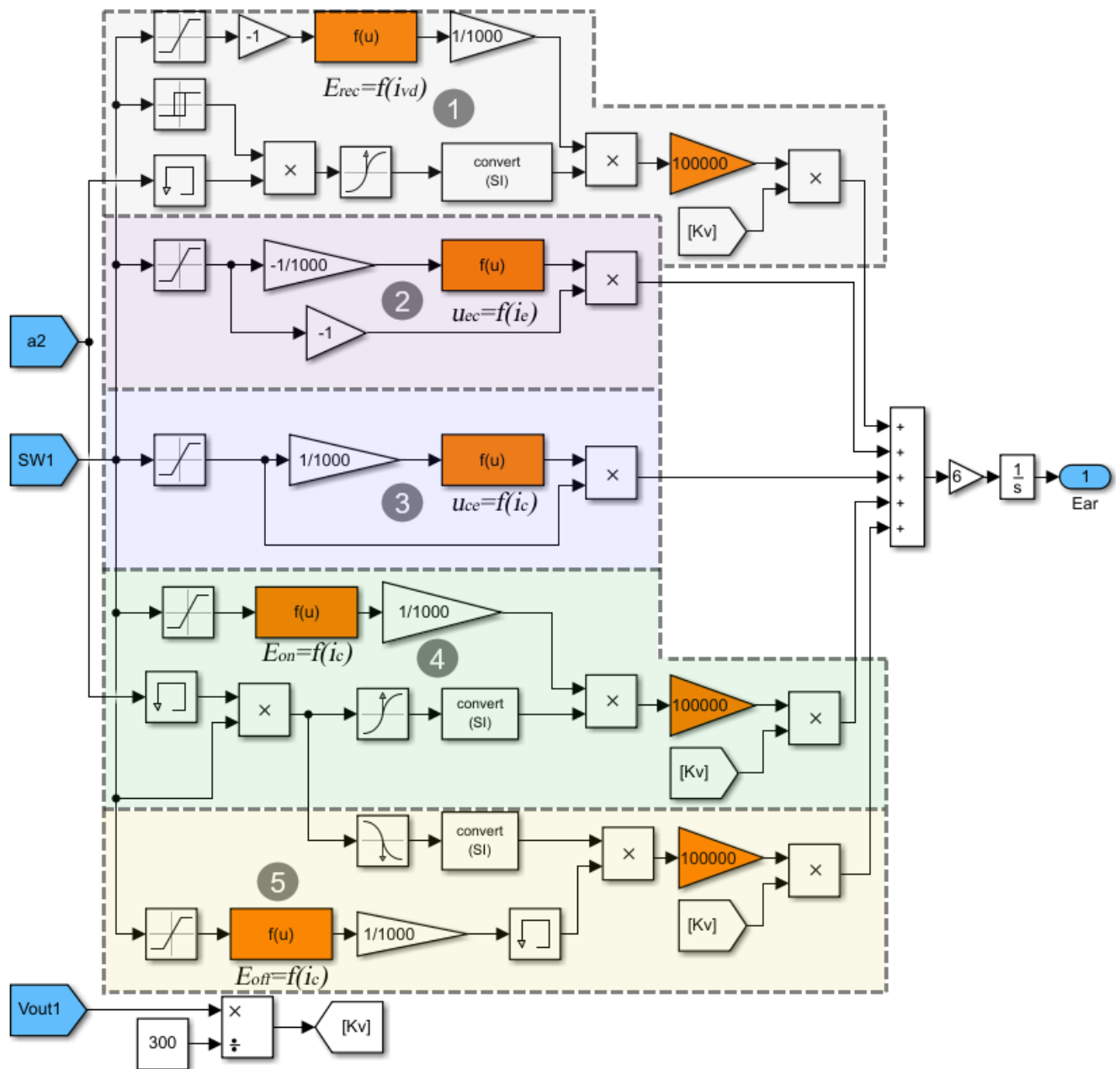


Рисунок 4.13 – Matlab-підмодель розрахувача енергії втрат в ключах активного випрямляча

Для визначення усіх видів втрат потужності в силовому IGBT - модулі використовувалися поліноміальні функції (4.21 - 4.25), отримані в результаті апроксимації графіків з технічної документації IGBT-модуля $u_{ce}(i_e)$, $u_{ec}(i_c)$, $E_{on}(i_c)$, $E_{off}(i_c)$ і $E_{rec}(i_e)$ (дивись рисунки 4.7 - 4.12).

Для зони 1 використовувалася функція визначення (4.25), для зони 2 формула 4.22, зона 3 – формула 4.21, зона 4 – формула 4.23, зона 5 – формула 4.24.

В технічній документації на транзисторний модуль CM600DX-13T характеристики $E_{on}(i)$, $E_{off}(i)$, $E_{rec}(i)$ приведено для напруги модуля 300 В.

При збільшенні або зменшенні напруги на IGBT-модулі пропорційно змінюється величина енергії втрат $E_{on}(i)$, $E_{off}(i)$, $E_{rec}(i)$. Для уточнення величини втрат потужності вводиться додатковий коефіцієнт K_v , який враховує зміну енергії перемикання та відновлення.

$$K_v = U_{cc.факт} / U_{cc.ном} \quad (4.26)$$

$U_{cc.ном}$ – номінальне напруги IGBT модуля, для якого приведені дані в технічній документації

$U_{cc.факт}$ – фактичне напруги IGBT модуля.

$$E_{on}(i) = E_{on.ном} \cdot K_v \quad (4.27)$$

E_{on} – енергія ввімкнення транзистора при номінальному значенні напруги модуля (4.23)

$E_{on.ном}$ – енергія ввімкнення транзистора при врахуванні зміни напруги модуля від номінального значення

В моделі значення напруги IGBT-модуля змінюється в діапазоні від 330 В до 420 В. Для цього після визначення втрат потужності значення динамічних втрат IGBT-модуля уточняється через коефіцієнт K_v .

Графічно процеси, що протікають в розраховувачі складових втрат потужності наведено на рисунку 4.14.

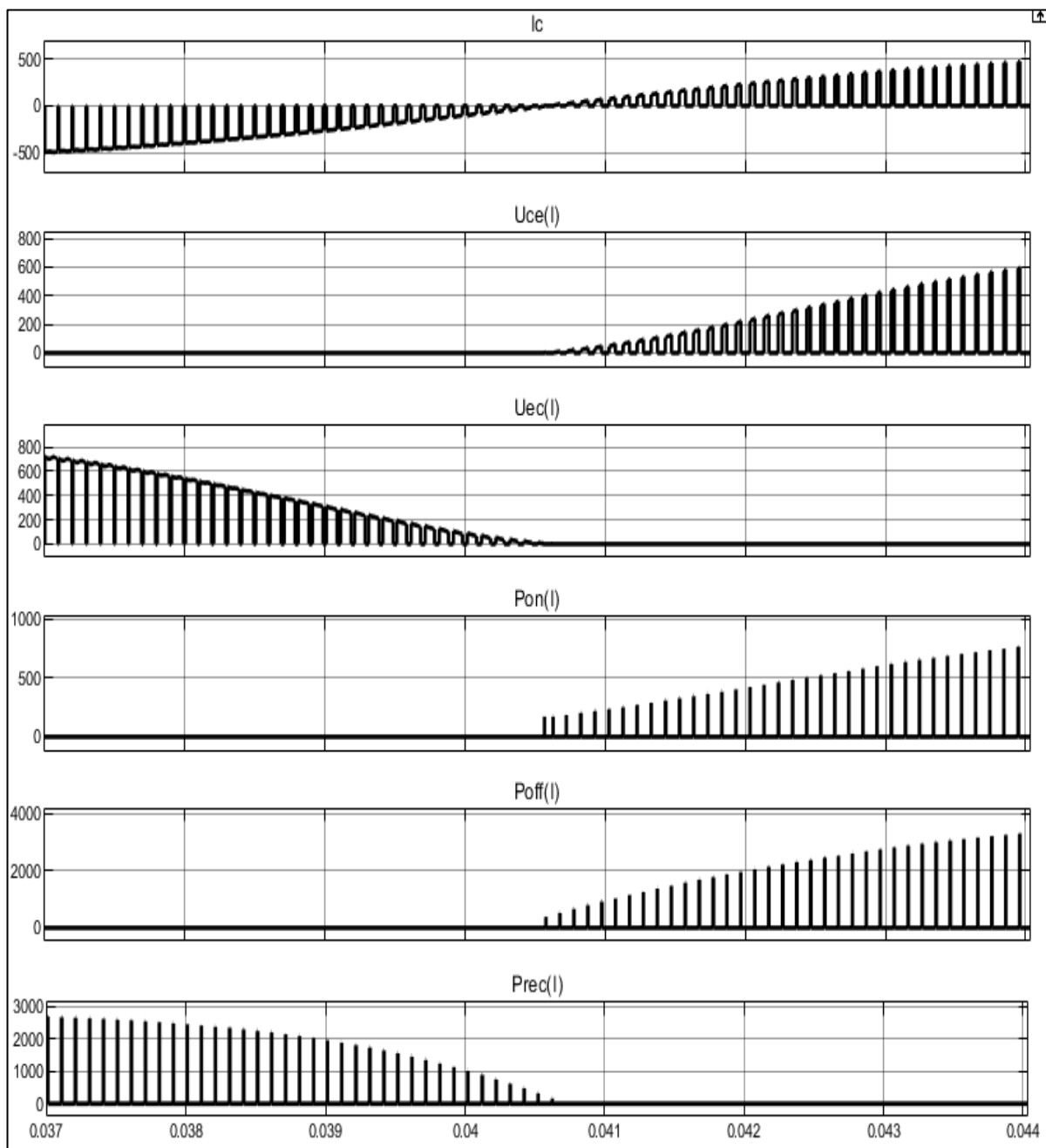


Рисунок 4.14 – Результати роботи підмоделі розраховувача втрат в ключах АВ моделювання втрат потужності

Позитивна частина струму протікає через транзисторну частину модуля і відповідно зумовлює статичні та динамічні втрати в транзисторній частині. Відповідно від’ємна частина струму IGBT-модуля протікає через зворотній діод і зумовлює статичні та динамічні втрати в зворотному діоді.

Було проведено порівняння значень втрат потужності в IGBT-модулях при моделюванні в Matlab з програмою MelcoSim 5.1 від виробника Mitsubishi Electric.

Похибка в розрахунках становить від 2 до 3%. У MelcoSim 5.1 немає можливості проводити моделювання втрат потужності при динамічній зміні напруги, струму модуля, частоти комутації, що є необхідним для інтегрального визначення енергії втрат у періоді повного інтервалу заряду.

4.4.3 Модель розраховувача коефіцієнта потужності

Поліпшенням коефіцієнта потужності називають заходи, що вживаються для підвищення коефіцієнта потужності певної частини електроустановки. Для цього в певній точці мережі генерується така реактивна потужність, яка зменшує струм, а, отже, і потужність, які повертаються в джерело живлення. Це дозволяє використовувати лінії електроживлення, генератори і трансформатори, розраховані на меншу повну потужність.

Електроустановка з правильно підібраними параметрами може добре працювати і при низькому коефіцієнті потужності, тому не існує стандартів, розпорядчих електроустановок певний коефіцієнт потужності. Однак підвищення коефіцієнта потужності дає ряд технічних і економічних переваг. Фактично, експлуатація електроустановки з низьким $\cos\phi$ означає підвищені витрати для енергопостачальної компанії, яка прагне ввести тарифи, які роблять експлуатацію таких електроустановок не вигідними. Законодавчі заходи, що діють в більшості країн, створюють таку систему тарифів, при якій за високе споживання реактивної потужності (пороговий $\cos\phi$ дорівнює 0,9) доводиться платити штрафи. Розмір штрафів залежить від рівня напруги (високе, середнє, низьке) і коефіцієнта потужності.

Тому виникає необхідність збільшити значення коефіцієнта потужності шляхом компенсації реактивної потужності. Перевагами корекції коефіцієнта потужності є:

- більш ефективне використання електричних генераторів;
- більш ефективне використання електричних ліній;
- зниження втрат.

Формула для розрахунку коефіцієнта потужності:

$$PF = \frac{P_1}{S} = \frac{I_1}{I_{rms}} \cdot \frac{U_1}{U_{rms}} \cdot \cos\varphi; \quad (4.28)$$

де P_1 – активна потужність;

S – реактивна потужність;

Підмодель розраховувача коефіцієнта потужності за формулою (4.28) наведена на рисунку 4.15.

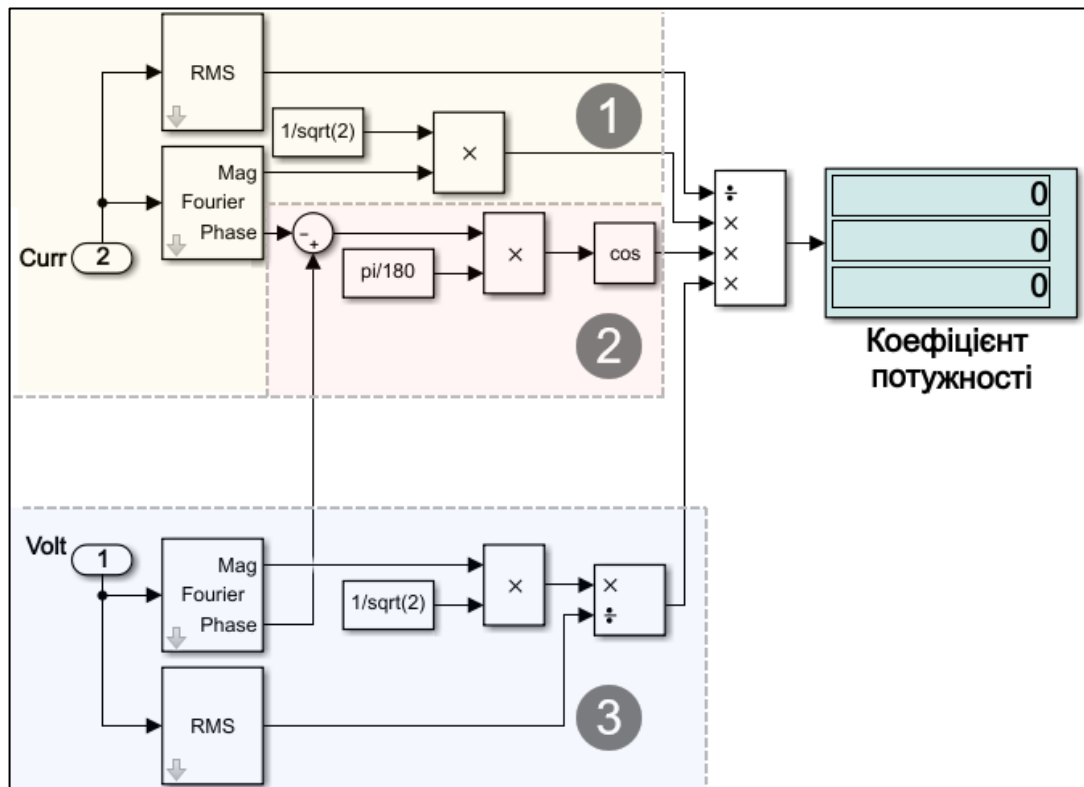


Рисунок 4.15 – Підмодель розраховувача коефіцієнта потужності

Вхідними даними для підмоделі розраховувача коефіцієнта потужності є значення трифазної напруги джерела живлення та значення трифазного струму джерела живлення. У частині 1 підмоделі (дивись рисунок 4.15) ведеться розрахунок співвідношення I_1/I_{rms} з формули (4.28), у частині 2 ведеться розрахунок $\cos\varphi$, у частині 3 ведеться розрахунок співвідношення U_1/U_{rms} . При множенні цих

значень у результаті отримуємо значення коефіцієнта потужності для кожної в фаз. Слід зауважити, що система має симетричний характер.

4.4.4 Модель розраховувача енергії втрат в системі ЗС для ЕМ

Для можливості розрахувати втрати енергії за формулою (4.2) в Matlab було побудовано підмодель, яка зображена на рисунку 4.16.

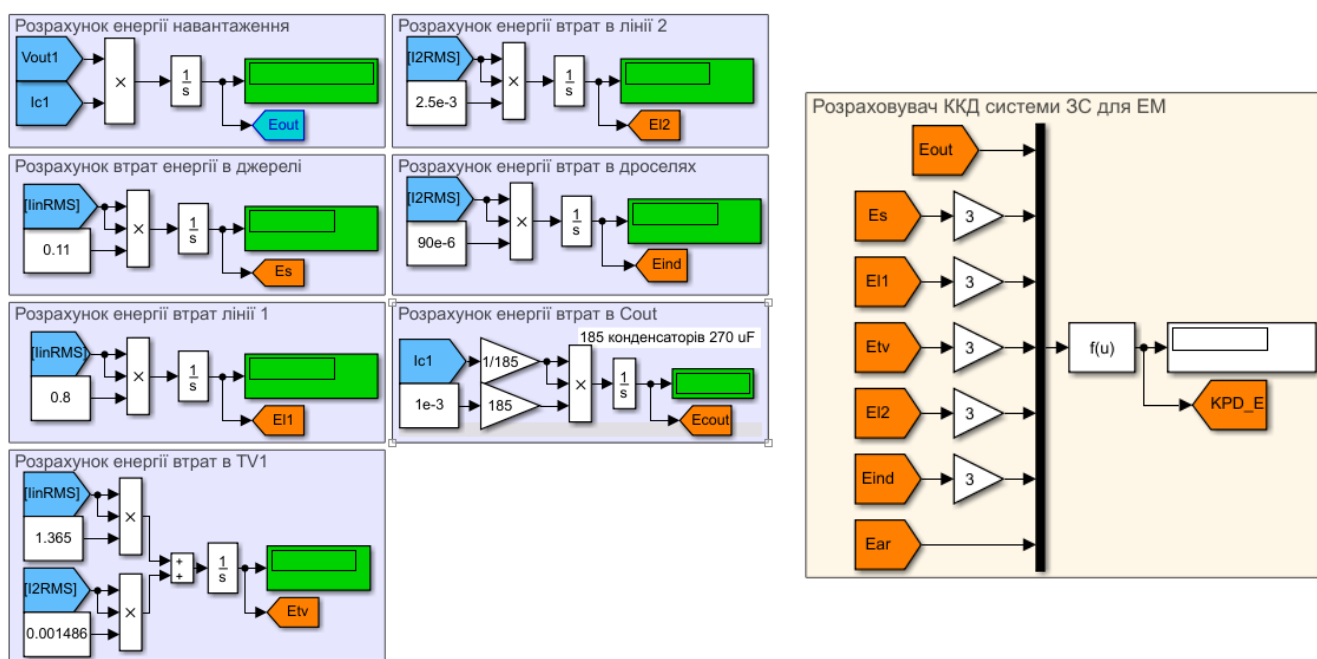


Рисунок 4.16 – Підмодель розраховувача енергії втрат в системі зарядної станції для електромобілів

4.4.5 Модель батарейного відсіку

Оскільки у якості навантаження повинна бути акумуляторна батарея, яка складається з певної кількості батарей типу NCR18650b, потрібно правильно врахувати її параметри та побудувати Matlab-модель таким чином, щоб похибка в розрахунку SOC, струму та напруги на ній були мінімальні.

Побудована модель акумуляторного відсіку зображена на рисунку 4.17.

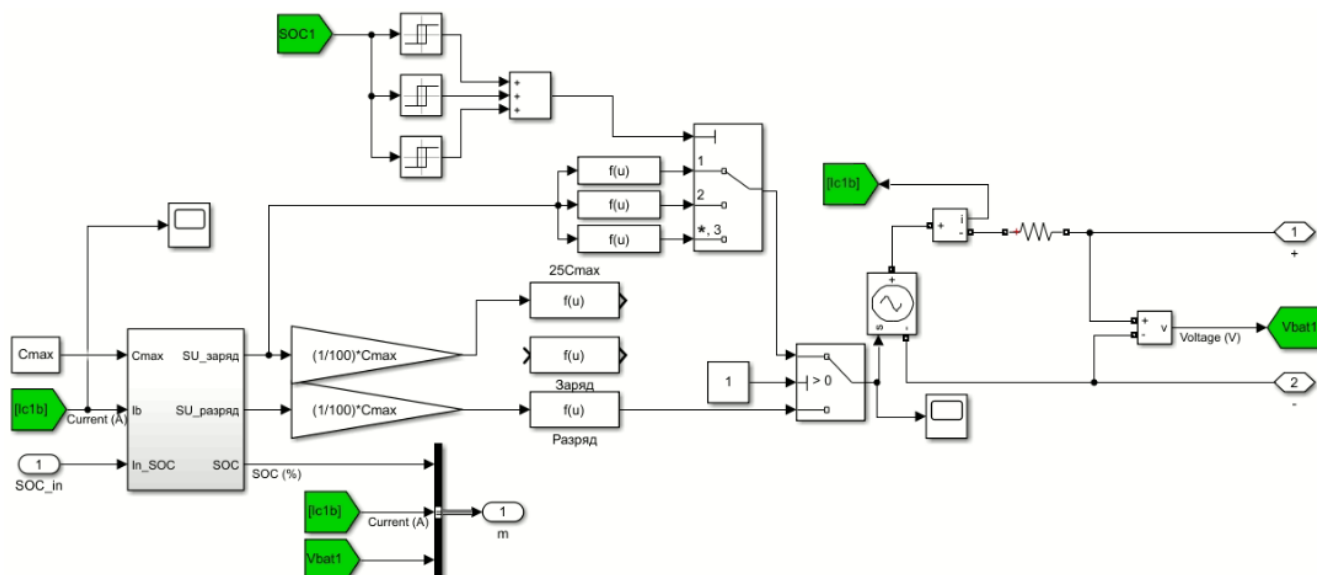


Рисунок 4.17 – Підмодель батарейного відсіку електромобіля

4.5 Результати комп'ютерного моделювання зарядної станції з дворівневим активним випрямлячем

В ході комп'ютерного моделювання отримані осцилограми фазної напруги та фазного струму активного чотириквadrантного випрямляча зарядної станції [87], які представлені на рисунку 4.18

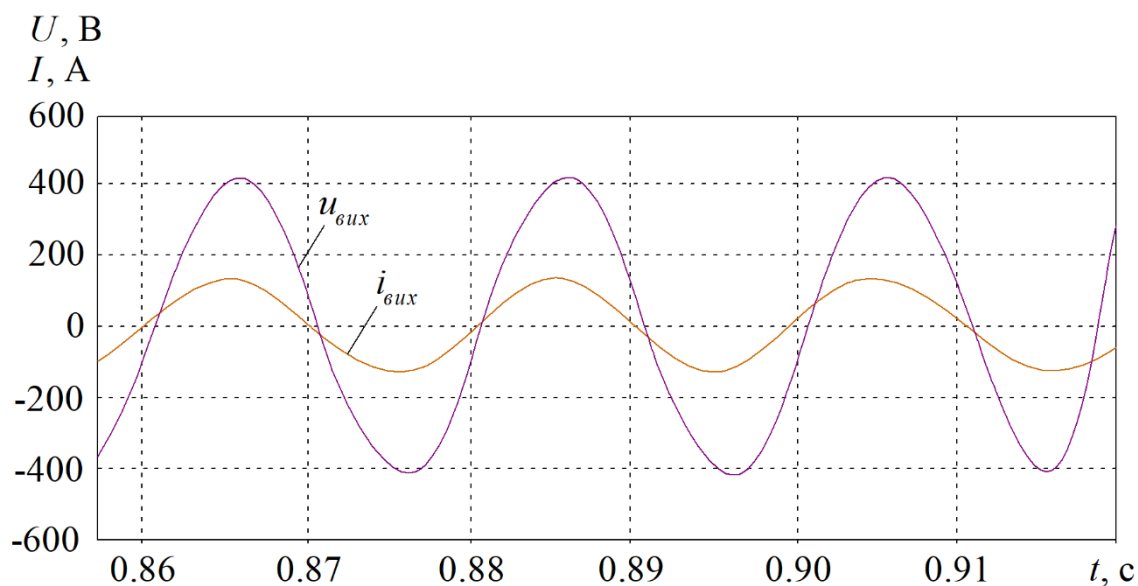
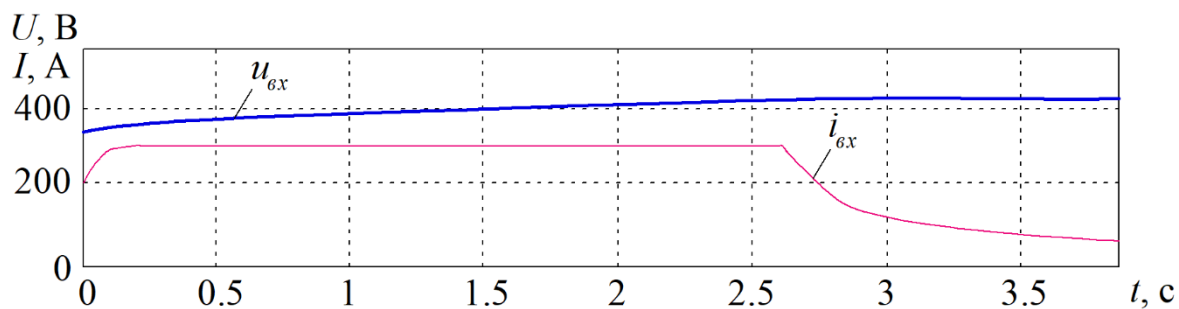


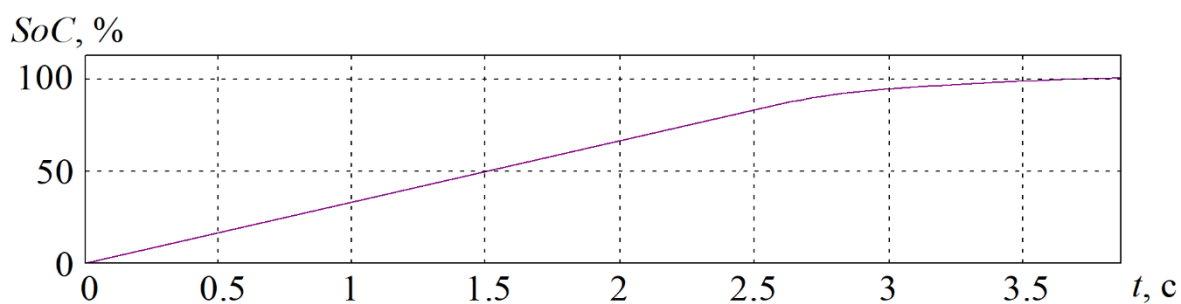
Рисунок 4.18 – Осцилограми напруги та струму фази *A*
на вході трансформатора *T1*

Як видно з осцилограм форми фазних струмів мають практично синусоїдальну форму з коефіцієнтом потужності близьким до одиниці.

Осцилограми вихідної напруги та вихідного струму в процесі заряду режимом «постійний струм постійна напруга» представлені на рисунку 4.19.



а)

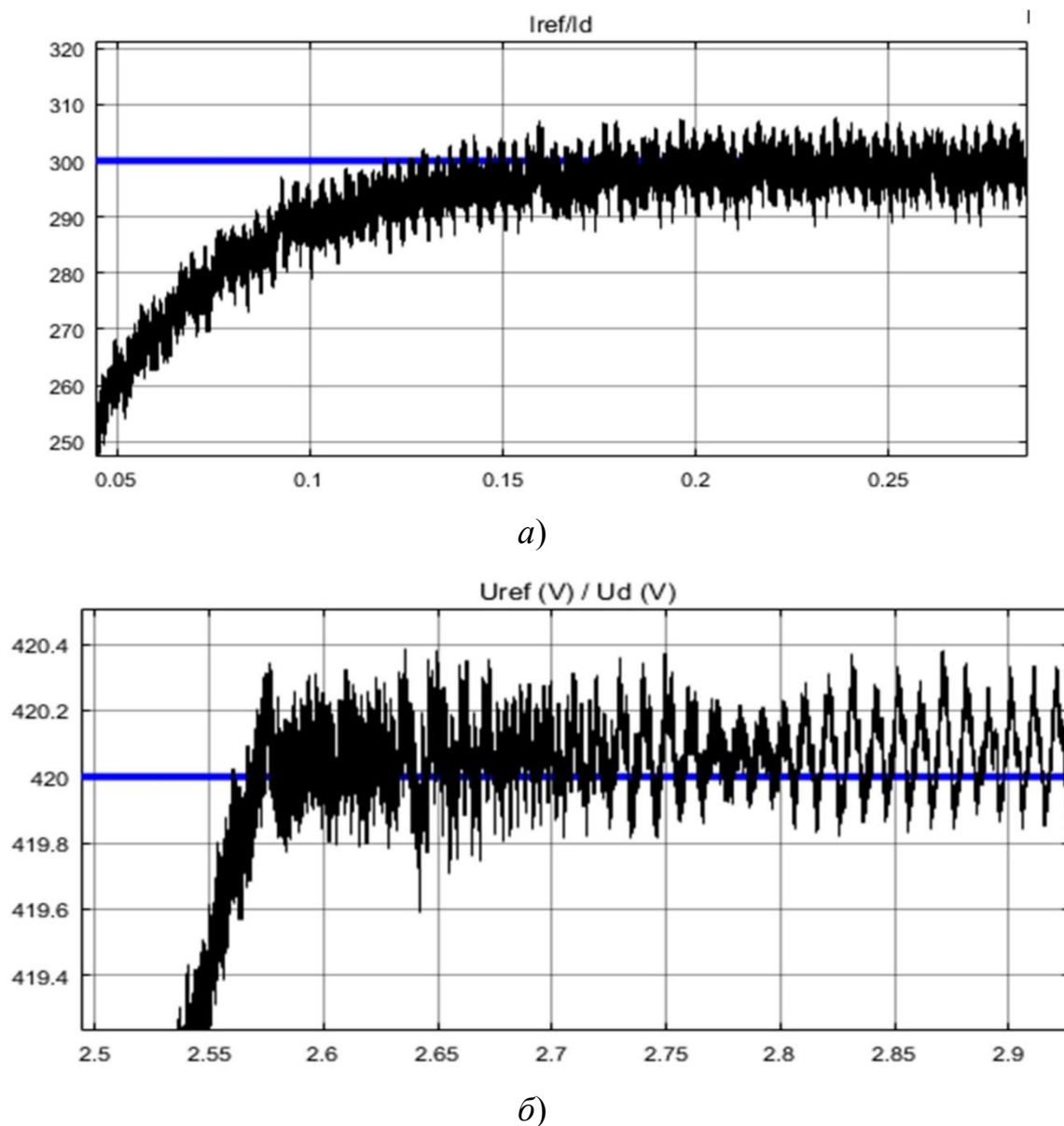


б)

а – вихідна напруга та струм; б – ступінь заряду батареї

Рисунок 4.19 – Осцилограми роботи зарядної станції:

Відпрацювання регулятора за струмом та напругою наведено на рисунку 4.20.



а – за струмом; б – за напругою

Рисунок 4.20 – Відпрацювання регулятора

Як видно з рисунку 4.20 регулятор досить точно відпрацьовує задане значення вихідної напруги, а величина пульсації вихідної напруги складає від 0,4 до 0,6В.

Аналіз якості пульсацій вихідної напруги активного випрямляча, а саме результати швидкого перетворення Фур'є, наведено на рисунку 4.21.

У результаті моделювання отримані значення параметрів ефективності. У таблиці 4.1 наведено порівняльний аналіз теоретично розрахованих значень ККД при різних струмах заряду і отриманих в результаті експерименту.

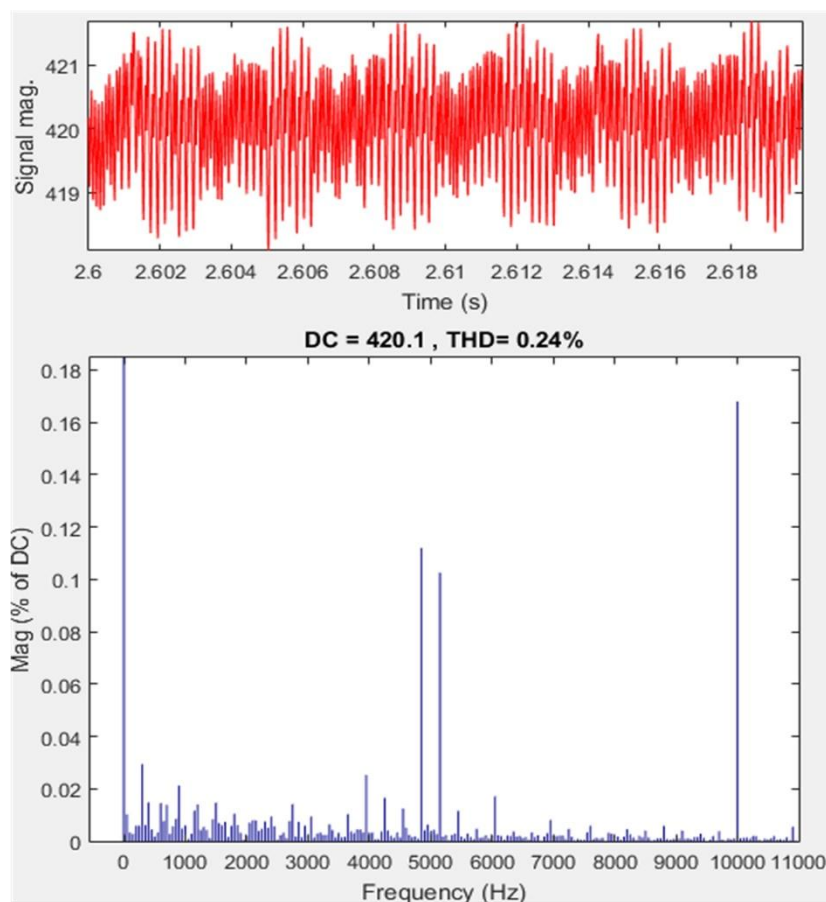


Рисунок 4.21 – Спектр вищих гармонік вихідної напруги активного випрямляча зарядної станції

За результатами моделювання видно, що ефективність запропонованої конструкції зарядної станції досить висока. Спостерігається динаміка того, що чим більший струм заряду, тим нижчий ККД.

У таблиці 4.1 наведено порівняльний аналіз теоретично розрахованих значень ККД при різних струмах заряду і отриманих в результаті експерименту.

Таблиця 4.1 – Результати моделювання системи зарядної станції

Частота ШІМ	Струм заряду, А	Інтегральний ККД, %	Час заряду, с*2000		Power Factor		THD, %	
			Режим СС	Повний заряд	В режимі СС	В кінці заряду	В режимі СС	В кінці заряду
СС - 10 кГц CV - 20 кГц	150 (0,6С)	97,87	2,74	3,276	0,985	0,945	1,76	4,7-5,2
	200 (0,8С)	97,52	2,025	2,604			1,32	7,8-8,2
	250 (1С)	97,17	1,601	2,207			1,1	7,7-8,3
	300 (1,2С)	96,82	1,315	1,946			0,93	8,2-8,8
	350 (1,4С)	96,45	1,113	1,761			0,82	7,4-8,1
	400 (1,6С)	96,14	0,959	1,63			0,78	8,6-9,3
СС - 20 кГц CV - 30 кГц	150 (0,6С)	97,69	2,74/91,2	3,276	0,985	0,945	1,35	4,1-5,1
	200 (0,8С)	97,34	2,025	2,604			0,83	5,5-6,6
	250 (1С)	96,98	1,601	2,207			0,6	6,6-6,8
	300 (1,2С)	96,64	1,315	1,946			0,58	5,9-6,7
	350 (1,4С)	96,31	1,113	1,761				5,9-7,5
	400 (1,6С)		0,959	1,63				

У таблиці 4.2 наведено розрахункові значення параметрів потужності втрат при максимальному струмі заряду 300 А і напрузі на навантаженні 420 В.

Таблиця 4.2 – Параметри потужності втрат у системі зарядної станції

Параметр потужності втрат	Енергії втрат, кВт*с*10 ³ <i>перевести в кВт*год</i>	Втрати потужності (% від загальних втрат)
У джерелі, E_S	0,765	8,73
У лінії 1, E_{L1}	0,438	5
У трансформаторі, E_{T1}	1,494	17,1
У лінії 2, E_{L2}	1,257	14,3
У ключах активного випрямляча, E_{AR}	2,399	27,4
У батареї, E_{bat}	2,409	27,45
Сумарні втрати, ΔE_{Σ}	8,762	100

4.6 Підвищення енергетичних показників зарядної станції електромобілів на базі трирівневого активного випрямляча

З проведеного огляду у першому розділі можна зробити висновок, що питання покращення енергоефективності зарядних станцій електромобілів є актуальним. Крім цього, актуальним є визначення інтегрального значення ККД повного процесу заряду електромобілів. Все це дозволяє стверджувати про доцільність дослідження, що спрямоване на підвищення енергоефективності зарядних станцій електромобілів на базі активного трирівневого випрямляча з корекцією коефіцієнта потужності [27,72, 73].

Запропоновано концепцію зовнішньої зарядної станції постійного струму на основі трирівневого активного трифазного випрямляча (АВ) з корекцією коефіцієнта потужності (дивись рисунок 4.23). При цьому активний випрямляч виконує функцію регулювання. Для експериментальної перевірки теоретичних припущень було розроблено модель запропонованої зарядної станції в програмному середо-

вищі Matlab (дивись рисунок 4.24). При імітаційному моделюванні використовувався метод розв'язку диференціальних рівнянь ODE15S (метод Рунге-Кута) з дозволеною відносною похибкою моделювання 0,01 %.

Систему автоматичного керування (САК) активним випрямлячем побудовано на основі інтегрального регулятора з подальшою широтно-імпульсною модуляцією. Розроблена САК забезпечує задану динаміку зміни напруги та струму заряду в режимах CC–CV.

Запропоновану структурну схему системи керування АВ з широтно-імпульсною модуляцією наведено на рисунку 4.25, де I_{as} , I_{out} , U_{as} , U_{out} – струми та напруги заряду батарей, отримані в зворотному зв'язку і блоці сигналу завдання відповідно.

У субмоделей блока регулятора напруги та струму заряду батареї CC-CV batteryregulator реалізований інтегральний регулятор. Особливістю розробленого регулятора є те, що для режимів завдання струму та напруги заряду використовуються різні інтегральні коефіцієнти, що покращує динаміку регулювання в порівнянні, коли в режимі CC і CV використовується той же коефіцієнт (рис. 4.26).

Результати моделювання, а саме осцилограми вхідного струму та вхідної напруги активного випрямляча наведено на рисунку 4.27.

Процес заряду, а саме динаміку зміни вихідної напруги, струму заряду батареї, а також величину SoC батареї на всьому інтервалі заряду наведено на рисунку 4.28.

Висновки до розділу 4

1. У цьому розділі була запропонована структура зарядної станції електромобілів, яка складається з таких компонентів: вхідний трансформатор, трирівневий активний випрямляч, навантаження (еквівалентної моделі блоку літій-іонних батарей електромобіля TeslaModel S), що забезпечує відносно відомих технічних рішень зарядних станцій покращення параметрів ККД, коефіцієнта потужності та

коефіцієнта гармонічних спотворень. Отримані результати пояснюються тим, що запропонована зарядна станція реалізує одноетапне перетворення електроенергії в активному випрямлячі з корекцією коефіцієнта потужності.

2. Приведена методика і проведено розрахунок ККД процесу заряду розглянутої системи. При різних параметрах струму заряду та частоти комутації, враховуючи втрати потужності в батареї електромобіля, ККД зарядної станції лежить в межах від 91,3 % до 95,6 %.

3. На основі поліноміального наближення енергетичних залежностей IGBT-модулів створено математичну модель розраховувача статичних та динамічних втрат енергії. Проведено аналіз параметрів якості електроенергії, складових втрат енергії та ККД зарядної станції на інтервалі повного заряду акумулятора при різних струмах заряду та частоті ШІМ.

4. В програмному середовищі Matlab розроблено імітаційну модель запропонованої зарядної станції. Проведені дослідження енергетичних показників зарядної станції на базі трирівневого активного випрямляча показали, що коефіцієнт потужності (PF) зарядної станції лежить в межах від 98,5 % до 99,3%. Коефіцієнт гармонічних спотворень (THD) в процесі заряду лежить в межах від 2,5 % до 11,8 %.

5. Максимальна ефективність системи досягається в режимі мінімального струму заряду. У той же час зменшення струму заряду призводить до збільшення часу процесу заряду, а також до незначного погіршення параметрів якості електроенергії.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено науково-практичне завдання з енергозбереження та застосування енергоефективних технологій на електричному автомобільному транспорті та його зарядній інфраструктурі шляхом інтеграції в електричну систему поновлювальних автономних джерел електроживлення та ефективного розподілу в ній балансу потужності.

Основні результати, що отримані в процесі проведення теоретичних і експериментальних досліджень, полягають у наступному:

1. Проведений аналіз науково-технічної літератури щодо тенденції розвитку зарядних станцій електромобілів показав, що даний вид перетворювачів перебуває на етапі його розвитку і потребує як вдосконалення, так і розробки нових рішень та методів, що забезпечать його енергоефективність. Особливо це актуально з огляду на тенденції зростання вартості електричної енергії та необхідності пошуків шляхів підвищення ККД зарядних станцій електромобілів. Визначено, що існуючі топології зарядних станцій електромобілів зумовлюють багатоступінчасте перетворення електроенергії, що зумовлює втрати потужності на кожному етапі перетворення. Проведено аналіз схем напівпровідникових перетворювачів зарядних станцій, який показав, що питання покращення енергоефективності зарядних станцій електромобілів є актуальним і потребує подальшого вдосконалення. Виконано аналіз вимог вітчизняних та закордонних стандартів електромагнітної сумісності зарядних станцій з живлячими мережами, які обмежують коефіцієнт гармонійних спотворень спожитого з мережі струму $< 5\%$.

2. Запропоновано структуру зарядної станції електромобілів, яка складається з вхідного трансформатора, трирівневого активного випрямляча та навантаження (еквівалентної моделі блоку літій-іонних батарей електромобіля Tesla Model S), що забезпечує відносно відомих технічних рішень зарядних станцій покращення параметрів ККД, коефіцієнта потужності та коефіцієнта гармонічних спотворень. Отримані результати пояснюються тим, що запропонована заря-

дна станція реалізує одноетапне перетворення електроенергії в активному випрямлячі з корекцією коефіцієнта потужності. Дана схема дає змогу забезпечити заряд акумуляторного блоку електромобілів від трифазної електричної мережі в режимі CC-CV, що забезпечує можливість роботи з коефіцієнтом потужності близьким до одиниці, також реалізувати одноступінчасте перетворення електроенергії, що зумовлює зменшення втрат потужності та збільшення ККД. Представлено математичну модель зарядної станції на базі активного чотириквadrантного випрямляча напруги для симетричних та несиметричних робочих умов, яка дозволяє провести аналітичний аналіз силової схеми. Визначено, що існуючі математичні моделі літій-іонні акумулятори зумовлюють значні похибки при визначенні розрядних характеристик. На основі поліноміальної апроксимації зарядно-розрядних характеристик літій-іонних акумуляторів, розроблені математичні моделі, що описують процеси заряду розряду та визначають взаємозв'язок поточної ємності акумуляторних батарей, поточної напруги батареї та миттєвого значення струму батареї. Розроблена модель більш точно описує зарядно-розрядні характеристики літій-іонних акумуляторів. В повному діапазоні заряду/розряду запропонована модель дає максимальну похибку 6%, що дає суттєво кращі показники точності. Проведено фізичне моделювання процесів заряду/розряду батареї NCR-18650b для підтвердження її параметрів, яка буде використовуватися в якості навантаження при моделюванні перетворювача для системи заряду електромобіля.

3. Для запропонованої схеми зарядної станції електромобілів на базі трифазного активного чотириквadrантного випрямляча виконано синтез системи керування та регулятора вихідного струму та вихідної напруги. Визначено параметри ковзного регулятора, що виконує функції регулювання вихідної напруги, а також регулювання величини активної та реактивної потужності, що споживається з електричної мережі. Визначено параметри спостерігача напруги мережі з алгоритмом компенсації, що забезпечує точні результати з мінімальним коливанням. Проведено імітаційне моделювання системи керування регулятора активного випрямляча, заснованого на реалізації ковзного режиму при зміні опору наванта-

ження та зі спостерігачем навантаження за допомогою програмного середовища Matlab / Simulink. Визначено, що запропонований регулятор зумовлює величину регульовальної вихідної потужності $< 3\%$. Відповідно до отриманих характеристик, активний випрямляч забезпечує кращі показники якості електричної енергії з малим значенням коефіцієнта гармонічних спотворень, що не перевищує 4% , та коефіцієнтом потужності близьким до значення $0,99$.

4. Приведено методику розрахунку ККД процесу заряду розглянутої системи. При різних параметрах струму заряду та частоти комутації ККД зарядної станції з урахуванням втрат потужності в батареї електромобіля лежить в межах від $91,3\%$ до $95,6\%$. На основі поліноміального наближення енергетичних залежностей IGBT-модулів створено математичну модель розраховувача статичних та динамічних втрат енергії. Проведено аналіз параметрів якості електроенергії, складових втрат енергії та ККД зарядної станції на інтервалі повного заряду акумулятора при різних струмах заряду та частоті ШІМ. В програмному середовищі Matlab розроблено імітаційну модель запропонованої зарядної станції. Проведені дослідження енергетичних показників зарядної станції на базі трирівневого активного випрямляча показали, що коефіцієнт потужності (PF) зарядної станції лежить в межах від $98,5\%$ до $99,3\%$. Коефіцієнт гармонічних спотворень (THD) в процесі заряду лежить в межах від $2,5\%$ до $11,8\%$.

Практична значимість результатів дисертаційної роботи підтверджується актами впровадження у навчальний процес Харківського національного автомобільно-дорожнього університету та у різних компаніях і підприємствах України: «Elcars»; ТОВ «АВТОДОМ ХАРКІВ»; ТОВ «АКУТЕК».

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Panchenko, A., Smyrnov, O., Nechaus, A., Trunova, I., Borysenko, A., Sokhin, P., & Bagach, R. (2021). Establishing patterns in the compatible electromagnetic and electromechanical transition processes when the starter is powered by a supercapacitor. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(5), 19–25. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.232423> (Scopus, Quartiles – Q2) ;
2. Гнатов, А. В., Аргун, Щ. В., Багач, Р. В., Гнатова, Г. А., Тарасова, В. В., & Ручка, О. О. (2021). Аналіз найбільш поширених методів визначення стійкості енергетичних систем. *Автомобіль і електроніка. Сучасні технології: електронне наукове спеціалізоване видання*, (20), 17–26. <https://doi.org/10.30977/VEIT.2021.20.0.02>;
3. Нерубацький, В. П., Плахтій, О. А., Гордієнко, Д. А., Філіп'єва, М. В., & Багач, Р. В. (2023). Підвищення точності моделювання перехідних процесів і розрахунку втрат потужності напівпровідникових перетворювачів у програмному середовищі NI Multisim. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*, (2), 22–35. <https://doi.org/10.18664/iksz.v28i2.283312>;
4. Багач, Р. (2023). Дослідження акумуляторних блоків електромобілів та зарядних станцій на основі активного трифазного випрямляча струму. *Автомобіль і електроніка. Сучасні технології*, (24), 62–71. <https://doi.org/10.30977/VEIT.2023.24.0.2>;
5. Багач, Р. (2024). Підвищення електромагнітної сумісності і енергоефективності зарядної станції електромобілів. *Автомобіль і електроніка. Сучасні технології*, (25), 53–62. <https://doi.org/10.30977/VEIT.2024.25.0.6>;
6. Багач Р. (2024). Синтез математичної моделі зарядної станції для електромобілів. *Стале виробництво та споживання у ланцюгах створення вартості : монографія. За заг. ред. А. В. Павличенка та Л. Л. Палехової*. Дрезден, 2024.(с. 205-238);

7. Hnatov, A., Arhun, S., Hnatova, H., Bagach, R., Patlins, A., & Zabasta, A. (2021). Implementation of the double degree master's program on the example of the Erasmus project CybPhys. *Proceedings of the 2021 IEEE 62nd International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University* (pp. 277-282). Riga, Latvia: Riga Technical University; Piscataway: IEEE. ISBN 978-1-6654-3805-6, e-ISBN 978-1-6654-3804-9. doi:10.1109/RTUON53541.2021.9711716;

8. Plakhtii, O., Prokhorova, V., Bagach, R., Zhuchenko, O., Yermilova, N., & Perets, K. (2023). Research of Accumulator Blocks of Electric Vehicles and Charging Station Based on Current Source Rectifier. *2023 IEEE 4th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)* (pp. 1-6). IEEE. doi:10.1109/KhPIWeek61412.2023.10312968;

9. Багач, Р.В. (2020). Загальні питання стосовно опалення електромобіля. *Автомобіль і електроніка. Сучасні технології* [Збірка матеріалів VII Міжнародної науково-технічної Інтернет-конференції] (23-24 листопада 2020 р., м. Харків) ХНАДУ, 2020. 36–38;

10. Hnatova, A., Bagach, R., & Sokhin, P. (2021). Economic and environmental impact of electric vehicles. *Proceedings of the Fourth International Scientific and Practical Conference "Automotive Transport and Infrastructure"* (pp. 215-217). Kyiv;

11. Bagach, R. V. (2021). Community safety issues of modern Electric Vehicles in Ukraine. *KhNAHU. Студентство. Наука. Іноземна мова: Збірник наукових праць студентів, аспірантів та молодих науковців* (Vol. 13, No. 2, pp. 125-128). Харків: ХНАДУ;

12. Багач, Р.В. (2021). Перспективи подальшого вдосконалення акумуляторних батарей для електромобілів. Міжнародна науково-практична конференція присвячена 90-річчю Харківського автомобільно-дорожнього університету та 90-річчю автомобільного факультету "Новітні технології в автомобілебудуванні, транспорті та при підготовці фахівців" (pp. 346-349). Харків: ХНАДУ;

13. Багач, Р.В., & Гнатов, А.В. (2022). Енергозбереження у секторі міського електротранспорту. *Тринадцята Міжнародна науково-практична конференція*

"Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування СЕУТТОО-2022" (с. 105–108). Херсон: ХДМА;

14. Багач, Р.В., Ульянець, О.А., Stella Hadjistassou, Irina Ciornei, & Lenos Hadjidemetriou. (2022). Сучасні технології мобільних зарядних станцій для електромобілів. *Збірка матеріалів VIII Міжнародної науково-технічної Інтернет-конференції* (с. 56–59). ХНАДУ. https://dl2022.khadi-kh.com/pluginfile.php/416773/mod_resource/content/1/%D0%97%D0%B1;

15. Багач, Р.В. (2023). Використання зарядних станцій для електромобілів у Харківській області. *Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування: 14-а Міжнародна науково-практична конференція* (с. 323–327). Херсон: Херсонська державна морська академія;

16. Багач, Р.В. (2023). Загальні проблеми енергетичного забезпечення робототехнічних пристроїв. *XIX міжнародна наукова конференція Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба "Новітні технології – для захисту повітряного простору": тези доповідей, 12–13 квітня 2023 року* (с. 527–528). Харків: ХНУПС ім. І. Кожедуба;

17. Багач, Р.В., & Кальченко, О.О. (2023). Перспективи та розвиток літєвих акумуляторів в Україні. *Світові тенденції ресурсозбереження на електричному транспорті: матеріали Всеукр. наук.-практ. конф., Харків, 25–27 жовт. 2023 р.* (с. 31–34). Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова;

18. Багач, Р.В., Гнатов, А.В., & Аргун, Щ.В. (2024). Використання трифазних активних випрямлячів напруги з функцією рекуперації енергії. *Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування: 15-а Міжнародна науково-практична конференція, 13–15 березня 2024 р.* (с. 128–132). Херсон: Херсонська державна морська академія;

19. Bahach, R. (2024). Study of the efficiency of a charging station for electric vehicles using an active rectifier in a micro-grid system. A. Pavlychenko & L. Paliekhova (Eds.), *Sustainable production and consumption in industry: Challenges and opportunities. Collection of scientific articles* (с. 126–133). Dresden;

20. Hnatov, A., Arhun, Shch., Bagach, R., Nechaus, A., Tarasova, V., Ruchka, O., Don, A., & Patlins, A. (2021). Electrical power unit of the transformer oil centrifugal cleaning unit. *Автомобільний транспорт*, 48, 101-112. <https://doi.org/10.30977/AT.2219-8342.2021.48.0.101>;

21. Mygal, V., Arhun, S., Hnatov, A., Bagach, R., & Kunicina, N. (2022, October). Methods for Diagnosing Vehicles by an Operator-Diagnostician. *2022 IEEE 63th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON)* (pp. 1-6). IEEE;

22. Латвинський, В.Д., & Багач, Р.В. (2024). Аналіз технологій безпілотного електромобільного транспорту. *Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування: 15-а Міжнародна науково-практична конференція, 13–15 березня 2024 р.* (с. 256–260). Херсон: Херсонська державна морська академія;

23. Нерубацький, В. П., Плахтій, О. А., Машура, А. В., & Гордієнко, Д. А. (2019). Аналіз технічних характеристик акумуляторних батарей і систем заряджання електромобілів. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*, 6, 11–19. <https://doi.org/10.18664/ikszt.v24i6.185510>;

24. Plakhtii, O., Nerubatskyi, V., Philipjeva, M., & Mashura, A. (2019). Research of mathematical models of lithium-ion storages. *International scientific journal "Mathematical modeling,"* 3(4), 127–130;

25. Plakhtii, O., Nerubatskyi, V., Mashura, A., & Hordiienko, D. (2020). The analysis of mathematical models of charge-discharge characteristics in lithium-ion batteries. *2020 IEEE 40th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)* (pp. 635–640). <https://doi.org/10.1109/ELNANO50318.2020.9088827>;

26. Zhemerov, G., Plakhtii, P., & Mashura, A. (2020). Efficiency Analysis of Charging Station for Electric Vehicles Using the Active Rectifier in Microgrid System. *2020 IEEE 4th International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)* (pp. 37–42). <https://doi.org/10.1109/IEPS51250.2020.9263182>;

27. Plakhtii, O., Nerubatskyi, V., Mashura, A., Hordiienko, D., & Khoruzhevskyi, H. (2020). Improving energy indicators of the charging station for electric vehicles based on a three-level active rectifier. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(8) (105), 46–55. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.204068>;
28. Weiss, M., Zerfass, A., & Helmersb, E. (2019). Fully electric and plug-in hybrid cars: An analysis of learning rates, user costs, and costs for mitigating CO₂ and air pollutant emissions. *Clean Production*, 212, 1478–1489. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.019>;
29. Giechaskiel, B., Riccobono, F., Vlachos, T., Mendoza-Villafuerte, P., Suarez-Bertoa, R., Fontaras, G., Bonnel, P., & Weiss, M. (2015). Vehicle emission factors of solid nanoparticles in the laboratory and on the road using Portable Emission Measurement Systems (PEMS). *Frontiers in Environmental Science*, 3, 82–83. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2015.00082>;
30. Haq, G., & Weiss, M. (2018). Time preference and consumer discount rates – insights for accelerating the adoption of efficient energy and transport technologies. *Technological Forecasting and Social Change*, 137, 76–88. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2018.06.045>;
31. Hardman, S., Chandan, A., Tal, G., & Turrentine, T. (2017). The effectiveness of financial purchase incentives for battery electric vehicles – a review of the evidence. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80, 1100–1111. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.255>;
32. Helmers, E. (2015). Possible resource restrictions for the future large-scale production of electric cars. *Competition and Conflicts on Resource Use, Natural Resource Management and Policy* (Vol. 46, pp. 121–131). https://doi.org/10.1007/978-3-319-10954-1_9;
33. Levay, P. Z., Drossinos, Y., & Thiel, C. (2017). The effect of fiscal incentives on market penetration of electric vehicles: A pairwise comparison of total cost of ownership. *Energy Policy*, 105, 524–533. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.02.054>;

34. Safari, M. (2017). Battery electric vehicles: Looking behind to move forward. *Energy Policy*, 115, 54–65. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.12.053>.
35. Ciez, R. E., & Whitacre, J. F. (2016). The cost of lithium is unlikely to upend the price of Li-ion storage systems. *Journal of Power Sources*, 320, 310–313. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2016.04.073>;
36. Helmers, E., & Weiss, M. (2017). Advances and critical aspects in the life-cycle assessment of battery electric cars. *Energy Emissions Control Technology*, 5, 1–18. <https://doi.org/10.2147/EECT.S60408>;
37. Nilsson, M., & Nykvist, B. (2016). Governing the electric vehicle transition – near term interventions to support a green energy economy. *Applied Energy*, 179, 1360–1371. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.03.056>;
38. Nerubatskyi, V., Plakhtii, O., Hordiienko, D., & Khoruzhevskyi, H. (2019). Simulation of surge protection according to IEC 61000-4-5. *Industry 4.0*, 4(6), 293–296;
39. Helmers, V., Dietz, J., & Hartard, S. (2017). Electric car LCA based on real-world mileage and the electric conversion scenario. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 22, 15–30. <https://doi.org/10.1007/s11367-015-0934-3>;
40. Nerubatskyi, V. P., & Gordiienko, D. A. (2019). Control and planning of energy consumption in railway transport. *Proceedings of the VII International Scientific and Practical Conference "Human, Society, Communicative Technologies"* (pp. 227–230). Kharkiv-Lyman;
41. Nerubatskyi, V., Plakhtii, O., Ananieva, O., & Zinchenko, O. (2019). Analysis of the Smart Grid concept for DC power supply systems. *Industry 4.0*, 4(4), 179–182;
42. Franco, V., Zacharopoulou, T., Hammer, J., Schmidt, H., Mock, P., Weiss, M., & Samaras, V. (2016). Evaluation of exhaust emissions from three diesel-hybrid cars and simulation of after-treatment systems for ultralow real-world NOX emissions. *Environmental Science & Technology*, 50(37), 13151–13159. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b03585>;

43. Coffman, M., Bernstein, P., & Wee, S. (2016). Electric vehicles revisited: A review of factors that affect adoption. *Transport Reviews*, 37, 79–93. <https://doi.org/10.1080/01441647.2016.1217282>;
44. Zhemerov, G. G., & Krylov, D. S. (2018). Concept of construction of power circuits of a multilevel modular converter and its transistor modules. *Electrical Engineering & Electromechanics*, (6), 26–32. <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2018.6.03>;
45. Nerubatskyi, V., Plakhtii, O., & Kotlyarov, V. (2019). Analysis of topologies of active four-quadrant rectifiers for implementing the INDUSTRY 4.0 principles in traffic power supply systems. *Industry 4.0*, 4(3), 106–109;
46. Ciez, R. E., & Whitacre, J. F. (2016). The cost of lithium is unlikely to upend the price of Li-ion storage systems. *Journal of Power Sources*, 320, 310–313. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2016.04.073>;
47. Islam, M. M., Shareef, H., & Mohamed, A. (2018). Optimal location and sizing of fast charging stations for electric vehicles by incorporating traffic and power networks. *IET Intelligent Transport Systems*. <https://doi.org/10.1049/iet-its.2018.5136>;
48. Vasiladiotis, M., & Rufer, A. A. (2015). Modular Multiport Power Electronic Transformer With Integrated Split Battery Energy Storage for Versatile Ultrafast EV Charging Stations. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62(5), 3213–3222. <https://doi.org/10.1109/tie.2014.2367237>;
49. Lee, W.-S., Kim, J.-H., Lee, J.-Y., & Lee, I.-O. (2019). Design of An Isolated DC/DC Topology with High Efficiency of over 97-% for EV Fast Chargers. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 1–11. <https://doi.org/10.1109/tvt.2019.2949080>;
50. Deng, F., & Chen, Z. (2015). Voltage-Balancing Method for Modular Multi-level Converters Switched at Grid Frequency. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62(5), 2835–2847. <https://doi.org/10.1109/tie.2014.2362881>;
51. Tugay, D., Sayenko, Y., Kolontaevsky, Y., & Shkurpela, A. (2019). Distributed solar photovoltaic power station conversion system with power filtration function.

International Ukraine-Poland Seminar "Power Quality in Distribution Networks with Distributed Generation" (pp. 131–138);

52. Kumari, B., & Sankar, M. (2014). Modeling and individual voltage balancing control of modular multilevel cascade converter. *International Journal of Emerging Engineering Research and Technology*, 2(1), 42–48;

53. Weiss, M., Dekker, P., Moro, A., Scholz, H., & Patel, M. (2015). On the electrification of road transportation – a review of the environmental, economic, and social performance of electric two-wheelers. *Transport. Res. Transport Environ.*, 41, 348–366. DOI: 10.1016/j.trd.2015.09.007;

54. Venkatramanan, D., Bharadwaj, P., Adapa, A. K., & John, V. (2019). Power Conversion Technologies for High-Performance AC Micro-grid. *INAE Lett.*, 4(1), 27–35;

55. Martinez-Rodrigo, F., Ramirez, D., Rey-Boue, A., de Pablo, S., & Herrero-de Lucas, L. (2017). Modular Multilevel Converters: Control and Applications. *Energies*, 10(11), 1709. DOI: 10.3390/en10111709;

56. Serdnykh, D. V., & Tomashevsky, Yu. B. (2017). Modeling of lithium-ion batteries in energy-saving complexes of autonomous objects. *Proceedings of the South Ural State University*, 17(3), 86–94. DOI: 10.14529/power170310;

57. Plakhtii, O., Nerubatskyi, V., Ryshchenko, I., Zinchenko, O., Tykhonravov, S., & Hordiienko, D. (2019). Determining additional power losses in the electricity supply systems due to current's higher harmonics. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(8), 6–13. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.155672;

58. Xu, B., Oudalov, A., Ulbig, A., Andersson, G., & Kirschen, D. (2018). Modeling of Lithium-Ion Battery Degradation for Cell Life Assessment. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 9(2), 1131–1140. DOI: 10.1109/tsg.2016.2578950;

59. Bryden, T. S., Holland, A., Hilton, G., Dimitrov, B., de Leon Albarran, C. P., & Cruden, A. (2018). Lithium-ion degradation at varying discharge rates. *Energy Procedia*, 151, 194–198. DOI: 10.1016/j.egypro.2018.09.047;

60. Lee, J., Ahn, J.-H., & Lee, B. K. (2017). A novel li-ion battery pack modeling considering single cell information and capacity variation. *2017 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*. DOI: 10.1109/ecce.2017.8096880;
61. Saldana, G., Martin, J. I., Zamora, I., & Asensio, F. J., Onederra, O. (2019). Analysis of the Current Electric Battery Models for Electric Vehicle Simulation. *Energies journal*, 12. DOI: 10.3390/en12142750;
62. Poonsuk, J., & Pongyupinpanich, S. (2016). Design and estimation of state-charging applied for lithium-ion battery based on Matlab-Simulink. *2016 Management and Innovation Technology International Conference (MITicon)*. DOI: 10.1109/MITICON.2016.8025222;
63. Plakhtii, O., & Nerubatskyi, V. (2018). Analyses of energy efficiency of interleaving in active voltage-source rectifier. *2018 IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*, 253–258. DOI: 10.1109/IEPS.2018.8559514;
64. Stokes, L. C., & Breetz, H. L. (2018). Politics in the U.S. energy transition: Case studies of solar, wind, biofuels and electric vehicles policy. *Energy Policy*, 113, 76–86. DOI: 10.1016/j.enpol.2017.10.057;
65. Plakhtii, O., Tsybulnyk, V., Nerubatskyi, V., & Mittsel, N. (2019). The analysis of modulation algorithms and electromagnetic processes in a five-level voltage source inverter with clamping diodes. *2019 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*, 294–297. DOI: 10.1109/MEES.2019.8896567;
66. Nilsson, M., & Nykvist, B. (2016). Governing the electric vehicle transition – Near term interventions to support a green energy economy. *Applied Energy*, 179, 1360–1371. DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.03.056;
67. Dai, P., Guo, G., & Gong, Z. (2016). A selection precharge method for modular multilevel converter. *International Journal of Control and Automation*, 9(4), 161–170. DOI: 10.14246ca.2016.9.4.16;
68. Плахтий, А. А., Нерубацкий, В. П., Кавун, В. Е., & Машура, А. В. (2018). Компенсация высших гармоник входных токов в системах с параллельным вклю-

чением автономных инверторов. *Електротехнічні та комп'ютерні системи*, 27(103), 65–74. DOI: 10.15276/eltecs.27.103.2018.07;

69. Plakhtii, O. A., Nerubatskyi, V. P., Hordiienko, D. A., & Khoruzhevskyi, H. A. (2020). Calculation of static and dynamic losses in power IGBT-transistors by polynomial approximation of basic energy characteristics. *Scientific bulletin of National mining university*, 2(176), 82–88. DOI: 10.33271/nvngu/2020-2/082;

70. Luo, S., Wang, Q., & Lu, S. A. (2019). Novel Efficient Electric Vehicle Fast Charging System Structure with Low Order Harmonic Current Suppression Capability. *2019 14th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*. DOI: 10.1109/iciea.2019.8834146;

71. Plakhtii, O., Nerubatskyi, V., Sushko, D., Ryshchenko, I., Tsybulnyk, V., & Hordiienko, D. (2019). Improving energy characteristics of AC electric rolling stock by using the three-level active four-quadrant rectifiers. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(8) (100), 6–14. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.174112;

72. Shruti, K. K., Valsalan, T., & Poorani, S. (2017). Single phase active front end rectifier system employed in three phase variable frequency drive. *International Journal of Innovative Research in Electrical, Electronics, Instrumentation and Control Engineering*, 121–129. DOI: 10.17148/IJIREEICE;

73. Bodo, N., Levi, E., Subotic, I., Espina, J., Empringham, L., & Johnson, C. M. (2017). Efficiency Evaluation of Fully Integrated On-Board EV Battery Chargers With Nine-Phase Machines. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 32(1), 257–266. DOI: 10.1109/tec.2016.2606657;

74. Huang, Z., Wong, S.-C., & Tse, C. K. (2017). Design of a Single-Stage Inductive-Power-Transfer Converter for Efficient EV Battery Charging. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 66(7), 5808–5821. DOI: 10.1109/tvt.2016.2631596;

75. Kim, D.-H., Kim, M.-J., & Lee, B.-K. (2017). An Integrated Battery Charger With High Power Density and Efficiency for Electric Vehicles. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 32(6), 4553–4565. DOI: 10.1109/tpel.2016.2604404;

76. Taylor, A., Lu, J., Zhu, L., Bai, K., McAmmond, M., & Brown, A. (2018). Comparison of SiC MOSFET-based and GaN HEMT-based high-efficiency high-power-density 7.2kW EV battery chargers. *IET Power Electronics*, 11(11), 1849–1857. DOI: 10.1049/iet-pel.2017.0467;
77. Kwon, M., Jung, S., & Choi, S. (2015). A high efficiency bi-directional EV charger with seamless mode transfer for V2G and V2H application. *2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*. DOI: 10.1109/ecce.2015.7310418;
78. Srdic, S., & Lukic, S. (2019). Toward Extreme Fast Charging: Challenges and Opportunities in Directly Connecting to Medium-Voltage Line. *IEEE Electrification Magazine*, 7(1), 22–31. DOI: 10.1109/mele.2018.2889547;
79. Нерубацький, В. П., Плахтій, О. А., Карпенко, Н. П., Гордієнко, Д. А., & Цибульник, В. Р. (2019). Аналіз енергетичних процесів у семирівневому автономному інверторі напруги при різних алгоритмах модуляції. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*, 5, 8–18. DOI: 10.18664/ikszt.v24i5.181286;
80. Mali, S. M., & Patil, Dr. B. (2018). THD Minimization in Multilevel Inverter Using Optimization Approach. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 7(6), 97–100;
81. Sonia, K., & Seshadri, G. (2015). Analysis and modelling of a multilevel inverter in distribution system with FACTS capability. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 4(5), 3015–3021. DOI: 10.15680/IJIRSET.2015.0405072;
82. Aghdam, M., Fathi, S., & Gharehpetian, G. B. (2008). Harmonic Optimization Techniques in Multi-Level Voltage-Source Inverter with Unequal DC Sources. *Journal of Power Electronics*, 8(2), 171–180;
83. Kurwale, M. V., Sharma, P. G., & Bacher, G. (2014). Performance analysis of modular multilevel converter (MMC) with continuous and discontinuous pulse width modulation (PWM). *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, 3(2), 7463–7474;

84. Plakhtii, O. A., Nerubatskyi, V. P., Karpenko, N. P., Hordiienko, D. A., Butova, O. A., & Khoruzhevskyi, H. A. (2019). Research into energy characteristics of single-phase active four-quadrant rectifiers with the improved hysteresis modulation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5(8), 36–44. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.179205;
85. Zhou, J., Suan, J., & Wang, X. (2014). Pre-charging control of modular multi-level converter. *High Voltage Apparatus*, 50(4), 103–107;
86. Solas, E., Abad, G., Barrena, J. A., Aurtenetxea, S., Carcar, A., & Zajac, L. (2013). Modular multilevel converter with different submodule concepts – part I: capacitor voltage balancing method. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 60(10), 4525–4535. DOI: 10.1109/TIE.2012.2210378;
87. Plakhtii, O. A., Nerubatskyi, V. P., Hordiienko, D. A., & Tsybulnyk, V. R. (2019). Analysis of the energy efficiency of a two-level voltage source inverter in the overmodulation mode. *Scientific Bulletin of National Mining University*, 4(172), 68–72. DOI: 10.29202/nvngu/2019-4/9;
88. Yang, H., & Saeedifard, M. (2017). A capacitor voltage balancing strategy with minimized AC circulating current for the DC-DC modular multilevel converter. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 64(2), 956–965;
89. Plakhtii, O., Nerubatskyi, V., Sushko, D., Hordiienko, D., & Khoruzhevskyi, H. (2020). Improving the harmonic composition of output voltage in multilevel inverters under an optimum mode of amplitude modulation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(8), 17–24. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.200021;
90. Kelrykh, M., & Fomin, O. (2014). Perspective directions of planning carrying systems of gondolas. *Scientific and Technical Journal "Metallurgical and Mining Industry"*, (6), 64–67;
91. Plakhtii, O., Nerubatskyi, V., Karpenko, N., Ananieva, O., Khoruzhevskyi, H., & Kavun, V. (2019). Studying a voltage stabilization algorithm in the cells of a modular six-level inverter. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(8), 19–27. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.185404;

92. Korneliuk, S., Dmitriev, P., & Tugay, D. (2019). Empirical support of the mathematical model of the wind turbine WPI. *Lighting Engineering & Power Engineering*, 2(55), 68–72. DOI: 10.33042/2079-424X-2019-2-55-68-72;

93. Bashir, S. B., & Beig, A. R. (2018). An improved voltage balancing algorithm for grid connected MMC for medium voltage energy conversion. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 95, 550–560;

94. Plakhtii, O. A., Nerubatskyi, V. P., Kavun, V. Ye., & Hordiienko, D. A. (2019). Active single-phase four-quadrant rectifier with improved hysteresis modulation algorithm. *Scientific Bulletin of National Mining University*, 5(173), 93–98. DOI: 10.29202/nvngu/2019-5/16;

95. Щербак, Я. В., Плахтій, О. А., & Нерубацький, В. П. (2017). Регулювальні характеристики активного чотириквadrантного перетворювача в режимах випрямлення і рекуперації. *Технічна електродинаміка*, (6), 26–31. DOI: 10.15407/techned2017.06.026.

Додаток А

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ ТА ВІДОМОСТІ ПРО АПРОБАЦІЮ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Panchenko, A., Smyrnov, O., Nechaus, A., Trunova, I., Borysenko, A., Sokhin, P., & Bagach, R. (2021). Establishing patterns in the compatible electromagnetic and electromechanical transition processes when the starter is powered by a supercapacitor. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(5), 19–25. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.232423> (Scopus, Quartiles – Q2) ;

2. Гнатов, А. В., Аргун, Щ. В., Багач, Р. В., Гнатова, Г. А., Тарасова, В. В., & Ручка, О. О. (2021). Аналіз найбільш поширених методів визначення стійкості енергетичних систем. *Автомобіль і електроніка. Сучасні технології: електронне наукове спеціалізоване видання*, (20), 17–26. <https://doi.org/10.30977/VEIT.2021.20.0.02>;

3. Нерубацький, В. П., Плахтій, О. А., Гордієнко, Д. А., Філіп'єва, М. В., & Багач, Р. В. (2023). Підвищення точності моделювання перехідних процесів і розрахунку втрат потужності напівпровідникових перетворювачів у програмному середовищі NI Multisim. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*, (2), 22–35. <https://doi.org/10.18664/ikszt.v28i2.283312>;

4. Багач, Р. (2023). Дослідження акумуляторних блоків електромобілів та зарядних станцій на основі активного трифазного випрямляча струму. *Автомобіль і електроніка. Сучасні технології*, (24), 62–71. <https://doi.org/10.30977/VEIT.2023.24.0.2>;

5. Багач, Р. (2024). Підвищення електромагнітної сумісності і енергоефективності зарядної станції електромобілів. *Автомобіль і електроніка. Сучасні технології*, (25), 53–62. <https://doi.org/10.30977/VEIT.2024.25.0.6>;

6. Багач Р. (2024). Синтез математичної моделі зарядної станції для електромобілів. *Стале виробництво та споживання у ланцюгах створення вартості : монографія. За заг. ред. А. В. Павличенка та Л. Л. Палєхової*. Дрезден, 2024. (с. 205-238) ;

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

7. Hnatov, A., Arhun, S., Hnatova, H., Bagach, R., Patlins, A., & Zabasta, A. (2021). Implementation of the double degree master's program on the example of the Erasmus project CybPhys. *Proceedings of the 2021 IEEE 62nd International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University* (pp. 277-282). Riga, Latvia: Riga Technical University; Piscataway: IEEE. ISBN 978-1-6654-3805-6, e-ISBN 978-1-6654-3804-9. doi:10.1109/RTUCON53541.2021.9711716;

8. Plakhtii, O., Prokhorova, V., Bagach, R., Zhuchenko, O., Yermilova, N., & Perets, K. (2023). Research of Accumulator Blocks of Electric Vehicles and Charging Station Based on Current Source Rectifier. *2023 IEEE 4th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)* (pp. 1-6). IEEE. doi:10.1109/KhPIWeek61412.2023.10312968;

9. Багач, Р.В. (2020). Загальні питання стосовно опалення електромобіля. *Автомобіль і електроніка. Сучасні технології* [Збірка матеріалів VII Міжнародної науково-технічної Інтернет-конференції] (23-24 листопада 2020 р., м. Харків) ХНАДУ, 2020. 36–38;

10. Hnatova, A., Bagach, R., & Sokhin, P. (2021). Economic and environmental impact of electric vehicles. *Proceedings of the Fourth International Scientific and Practical Conference "Automotive Transport and Infrastructure"* (pp. 215-217). Kyiv;

11. Bagach, R. V. (2021). Community safety issues of modern Electric Vehicles in Ukraine. *KhNAHU. Студентство. Наука. Іноземна мова: Збірник наукових*

праць студентів, аспірантів та молодих науковців (Vol. 13, No. 2, pp. 125-128). Харків: ХНАДУ;

12. Багач, Р.В. (2021). Перспективи подальшого вдосконалення акумуляторних батарей для електромобілів. Міжнародна науково-практична конференція присвячена 90-річчю Харківського автомобільно-дорожнього університету та 90-річчю автомобільного факультету "Новітні технології в автомобілебудуванні, транспорті та при підготовці фахівців" (pp. 346-349). Харків: ХНАДУ;

13. Багач, Р.В., & Гнатов, А.В. (2022). Енергозбереження у секторі міського електротранспорту. *Тринадцята Міжнародна науково-практична конференція "Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування СЕУТТОО-2022"* (с. 105–108). Херсон: ХДМА;

14. Багач, Р.В., Улянець, О.А., Stella Hadjistassou, Irina Ciornei, & Lenos Hadjidemetriou. (2022). Сучасні технології мобільних зарядних станцій для електромобілів. *Збірка матеріалів VIII Міжнародної науково-технічної Інтернет-конференції* (с. 56–59). ХНАДУ. https://dl2022.khadi-kh.com/pluginfile.php/416773/mod_resource/content/1/%D0%97%D0%B1;

15. Багач, Р.В. (2023). Використання зарядних станцій для електромобілів у Харківській області. *Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування: 14-а Міжнародна науково-практична конференція* (с. 323–327). Херсон: Херсонська державна морська академія;

16. Багач, Р.В. (2023). Загальні проблеми енергетичного забезпечення робототехнічних пристроїв. *XIX міжнародна наукова конференція Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба "Новітні технології – для захисту повітряного простору": тези доповідей, 12–13 квітня 2023 року* (с. 527–528). Харків: ХНУПС ім. І. Кожедуба;

17. Багач, Р.В., & Кальченко, О.О. (2023). Перспективи та розвиток літєвих акумуляторів в Україні. *Світові тенденції ресурсозбереження на електричному транспорті: матеріали Всеукр. наук.-практ. конф., Харків, 25–27 жовт. 2023 р.* (с. 31–34). Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова;

18. Багач, Р.В., Гнатов, А.В., & Аргун, Щ.В. (2024). Використання трифазних активних випрямлячів напруги з функцією рекуперації енергії. *Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування: 15-а Міжнародна науково-практична конференція, 13–15 березня 2024 р.* (с. 128–132). Херсон: Херсонська державна морська академія;

19. Bahach, R. (2024). Study of the efficiency of a charging station for electric vehicles using an active rectifier in a micro-grid system. *A. Pavlychenko & L. Paliekhova (Eds.), Sustainable production and consumption in industry: Challenges and opportunities. Collection of scientific articles* (с. 126–133). Dresden.

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

20. Hnatov, A., Arhun, Shch., Bagach, R., Nechaus, A., Tarasova, V., Ruchka, O., Don, A., & Patlins, A. (2021). Electrical power unit of the transformer oil centrifugal cleaning unit. *Автомобільний транспорт*, 48, 101-112. <https://doi.org/10.30977/AT.2219-8342.2021.48.0.101>;

21. Mygal, V., Arhun, S., Hnatov, A., Bagach, R., & Kunicina, N. (2022, October). Methods for Diagnosing Vehicles by an Operator-Diagnostician. *2022 IEEE 63th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON)* (pp. 1-6). IEEE;

22. Латвинський, В.Д., & Багач, Р.В. (2024). Аналіз технологій безпілотного електромобільного транспорту. *Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування: 15-а Міжнародна науково-практична конференція, 13–15 березня 2024 р.* (с. 256–260). Херсон: Херсонська державна морська академія.

Додаток Б
АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ



Вул. Шатилова Дача, 4, Харків, Харківська область, 61000
www.elcars.ua

А К Т

впровадження результатів наукових досліджень

Багача Руслана Володимировича

аспіранта Харківського національного автомобільно-дорожнього
університету

Автосервіс «Elcars» вважає, що дисертаційна робота Багача Руслана Володимировича «Підвищення ефективності експлуатації автомобільного електротранспорту з використанням зарядних станцій постійного струму» є актуальною і має перспективи щодо реалізації та втілення в сфері електричного автомобільного транспорту.

Автосервіс «Elcars» повідомляє, що наступні результати дисертаційної роботи Багача Руслана Володимировича «Підвищення ефективності експлуатації автомобільного електротранспорту з використанням зарядних станцій постійного струму» прийняті до використання:

- аналітичний метод, що описує зарядно-розрядні характеристики літій-іонних тягових акумуляторних батарей для електромобілів, який на відміну від існуючих, враховує залежність напруги, струму та температури батареї від величини її розряду;
- аналітичний метод визначення інтегрального значення ККД процесу передачі електроенергії при заряді батареї способом CC-CV, що на відміну існуючих до-зволяє визначити ККД циклу заряду.

Апробація і впровадження зазначених результатів дисертаційних досліджень Багача Р.В. дозволяє створювати нові силові перетворювачі для зарядних станцій електромобілів з підвищеним ККД.

Керівник Автосервісу «Elcars»,
м. Харків вул. Шатилова дача-4


Олександр КОЗЛОВ





ТОВ «АКУТЕК»
 IBAN: UA 483808050000000026000618809
 в АТ «Райффайзен Банк АВАЛЬ» МФО 380805
 Код ЄДРПОУ 35348663
 ІПН: 353486620345

ТОВАРИСТВО З ОБМЕЖЕНОЮ
 ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ «АКУТЕК»
 (ТОВ «АКУТЕК»)

вул. Гвардійців Широнінців, 3-А, м. Харків, 61153
 тел. (057)720-91-19
 Код ЄДРПОУ 35348663
 м. Харків
 15.04.2024

А К Т

впровадження результатів наукових досліджень дисертаційної роботи Багача Руслана Володимировича, що виконувалась в Харківському національному автомобільно-дорожньому університеті.

ТОВ «АКУТЕК», повідомляє, що результати дисертаційної роботи «Підвищення ефективності експлуатації автомобільного електротранспорту з використанням зарядних станцій постійного струму» за авторством Багача Руслана Володимировича, що подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії, пройшли апробацію, а саме:

1. Запропоновано структуру зарядних станцій для електромобілів на базі дворівневого активного чотириквандрантного випрямляча, яка дозволяє реалізувати заряд літійових батарей в режимі «постійний струм-постійна напруга» (CC-CV), що на відміну від існуючих аналогів дозволить підвищити показники ККД системи зарядної станції та забезпечити вимоги електромагнітної сумісності згідно міжнародних стандартів IEEE-519, IEC 61000-3-2, IEC 61000-4-3, і двонаправлену передачу електричної енергії;
2. Розроблено аналітичний метод, що описує зарядно-розрядні характеристики літій-іонних тягових акумуляторних батарей для електромобілів, який на відміну від існуючих, враховує залежність напруги, струму та температури батареї від величини її розряду.

Результати роботи впроваджено при розробці джерела безперебійного живлення ІБП60К, що містить літій-іонні накопичувачі та має систему автоматичного заряду.

Директор



Свєгеній АНАКІН

61153, м. Харків, вул. Гв. Широнінців, 3А
 (057) 720-91-19