

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

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

Кафедра Кафедра автотранспорту та логістики
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Цьонь О.П.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

«21» січня 2026 р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня бакалавр
(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 274 «Автомобільний транспорт»
(шифр і назва спеціальності)

студенту Царику Ігору Руслановичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Проектування бортового зарядного пристрою електромобіля з підтримкою керованого заряджання

Керівник роботи Гевко Іван Богданович, д.т.н., професор
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від «21» січня 2026 року № 4/9-43

2. Термін подання студентом завершеної роботи 14 червня 2026

3. Вихідні дані до роботи Технічні параметри основних вузлів, зарядних пристроїв та параметри АКБ для електромобілів.

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

1 Загально-технічний розділ. 2 Технологічний розділ. 3 Конструкторський розділ.

4 Безпека життєдіяльності, основи охорони праці.

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

Динаміка розвитку електромобільності та зарядної інфраструктури у світі та Україні – 1А1.

Структурна схема енергетичної системи з бортовим зарядним пристроєм – 1А1.

Класифікація режимів заряджання електромобілів – 1А1.

Структурна схема бортового зарядного пристрою електромобіля – 1А1.

Розрахункова схема силової частини бортового зарядного пристрою – 1А1.

Алгоритм керованого заряджання акумуляторної батареї електромобіля – 1А1.

Компонування основних компонентів бортового зарядного пристрою – 1А1.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Безпека життєдіяльності, основи охорони праці			

7. Дата видачі завдання

21.01.2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Загально-технічний розділ	10.05.2026	
2	Технологічний розділ	17.05.2026	
3	Конструкторський розділ	24.05.2026	
4	Безпека життєдіяльності, основи охорони праці	31.05.2026	
5	Оформлення графічної частини	05.06.2026	
6	Захист кваліфікаційної роботи бакалавра	08.06.2026	

Студент

_____ (підпис)

Ігор ЦАРИК

_____ (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

_____ (підпис)

Іван ГЕВКО

_____ (прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційної роботи бакалавра на тему: «Проектування бортового зарядного пристрою електромобіля з підтримкою керованого заряджання».

Метою роботи є розроблення технічних рішень для проектування бортового зарядного пристрою електромобіля, який забезпечує ефективне, безпечне та кероване заряджання тягової акумуляторної батареї від зовнішньої мережі змінного струму.

Об'єктом дослідження є процес заряджання тягової акумуляторної батареї електромобіля через бортовий зарядний пристрій, який виконує перетворення електричної енергії змінного струму в постійний струм із параметрами, необхідними для безпечного заряджання батареї.

Предметом дослідження є схемотехнічні, розрахункові та алгоритмічні рішення бортового зарядного пристрою електромобіля, що забезпечують стабілізацію зарядної напруги та струму, підтримку режимів заряджання за профілем постійного струму і постійної напруги, обмеження зарядної потужності відповідно до стану батареї та зовнішніх умов, а також захист силових електричних кіл від аварійних режимів роботи.

У роботі розглянуто сучасний стан розвитку електромобільності та зарядної інфраструктури, визначено роль бортового зарядного пристрою в енергетичній системі електромобіля та проаналізовано особливості заряджання тягових акумуляторних батарей. Розглянуто відмінності між заряджанням змінним і постійним струмом, визначено місце бортового зарядного пристрою в структурі електромобіля та обґрунтовано необхідність підтримки керованого заряджання. Проведено розрахунок основних електричних параметрів пристрою, зокрема зарядної потужності, вихідного зарядного струму, вхідного струму з мережі, параметрів проміжної ланки постійного струму та втрат потужності. Розглянуто режими заряджання тягової акумуляторної батареї та визначено принципи переходу від режиму постійного струму до режиму постійної напруги. Запропоновано алгоритм керованого заряджання, який враховує поточний рівень заряду батареї, температуру акумуляторних модулів, максимальний зарядний струм, дозволений системою BMS, доступну потужність зовнішнього зарядного обладнання та можливі обмеження з боку електричної мережі.

Пояснювальна записка складається з чотирьох розділів і 67 сторінок формату А4 та 7 аркушів формату А1 графічної частини і 7 сторінок додатків.

Ключові слова: електромобіль, бортовий зарядний пристрій, тяговий акумулятор, кероване заряджання, AC/DC-перетворювач, корекція коефіцієнта потужності, DC/DC-перетворювач, система керування батареєю, зарядний струм, зарядна напруга, електробезпека.

ЗМІСТ

РЕФЕРАТ	4
ВСТУП	6
1 ЗАГАЛЬНО-ТЕХНІЧНИЙ РОЗДІЛ	8
1.1 Сучасний стан розвитку електромобільності та зарядної інфраструктури	8
1.2 Роль бортового зарядного пристрою в енергетичній системі електромобіля	13
1.3 Тягові акумуляторні батареї та вимоги до процесу заряджання	17
1.4 Стандарти, режими та принципи керованого заряджання електромобілів	23
1.5 Постановка задач дослідження	26
2 ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ	28
2.1 Вихідні дані та технічні вимоги до бортового зарядного пристрою	28
2.2 Вибір структурної схеми та силової топології ОВС	31
2.3 Розрахунок основних електричних параметрів силової частини	35
2.4 Розрахунок режимів заряджання тягової акумуляторної батареї	39
2.5 Розробка алгоритму керованого заряджання	44
3 КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ	49
3.1 Розробка структурної схеми бортового зарядного пристрою	49
3.2 Вибір елементної бази та основних компонентів пристрою	52
4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ	59
4.1 Основні принципи та функції управління охороною праці під час досліджень електромобіля	59
4.2 Концепція захисту населення і території у разі загрози та виникнення надзвичайних ситуацій	61
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	64
БІБЛІОГРАФІЯ	66
ДОДАТКИ	68

ВСТУП

Сучасний етап розвитку автомобільного транспорту характеризується активним переходом до електричних і гібридних транспортних засобів. Така тенденція зумовлена необхідністю зменшення споживання викопного палива, скорочення викидів шкідливих речовин у довкілля, підвищення енергоефективності транспортних засобів та впровадження нових технологій у сфері електроприводу, акумуляторних батарей і силової електроніки. Електромобіль є складною енергетичною системою, у якій ефективність роботи залежить не лише від тягового електродвигуна та акумуляторної батареї, але й від якості процесу заряджання.

Одним із важливих елементів електромобіля є бортовий зарядний пристрій, який забезпечує заряджання тягової акумуляторної батареї від зовнішньої мережі змінного струму. На відміну від швидкісних зарядних станцій постійного струму, які подають енергію безпосередньо до батареї, бортовий зарядний пристрій виконує перетворення змінної напруги мережі на постійну напругу, необхідну для заряджання акумулятора. Саме цей пристрій визначає ефективність перетворення енергії, стабільність зарядного струму, рівень електробезпеки, електромагнітну сумісність та можливість узгодження процесу заряджання з вимогами системи керування батареєю.

Актуальність теми полягає у необхідності розроблення ефективних технічних рішень для бортових зарядних пристроїв електромобілів, які здатні забезпечувати не лише стандартне заряджання акумуляторної батареї, але й підтримку керованого заряджання. У сучасних умовах заряджання електромобіля повинно враховувати не тільки ємність батареї та доступну потужність мережі, але й рівень заряду, температуру акумуляторних модулів, обмеження системи BMS, стан електричної мережі та вимоги до безпечної експлуатації. Тому кероване заряджання є важливим напрямом удосконалення електромобілів, оскільки воно дозволяє підвищити ресурс тягової батареї, зменшити пікове навантаження на мережу та забезпечити більш раціональне використання електричної енергії.

Метою роботи є розроблення технічних рішень для проектування бортового зарядного пристрою електромобіля, який забезпечує ефективне, безпечне та кероване заряджання тягової акумуляторної батареї від зовнішньої мережі змінного струму.

Для досягнення поставленої мети були визначені такі завдання:

1. Провести аналіз сучасного стану розвитку електромобільності та зарядної інфраструктури.
2. Визначити роль бортового зарядного пристрою в енергетичній системі електромобіля.
3. Розглянути основні типи тягових акумуляторних батарей та вимоги до процесу їх заряджання.

4. Дослідити режими заряджання електромобілів і принципи реалізації керованого заряджання.
5. Сформувати вихідні технічні вимоги до бортового зарядного пристрою електромобіля.
6. Обрати структурну схему та силову топологію бортового зарядного пристрою.
7. Виконати розрахунок основних електричних параметрів силової частини пристрою.
8. Розробити алгоритм керованого заряджання тягової акумуляторної батареї.
9. Запропонувати конструктивні рішення щодо реалізації бортового зарядного пристрою, вибору його основних компонентів, системи захисту та теплового режиму.

1 ЗАГАЛЬНО-ТЕХНІЧНИЙ РОЗДІЛ

1.1 Сучасний стан розвитку електромобільності та зарядної інфраструктури

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

У світовому масштабі ринок електромобілів демонструє стабільну позитивну динаміку [1]. У 2024 році світові продажі електричних автомобілів перевищили 17 млн одиниць, а їхня частка у загальному обсязі продажів нових автомобілів становила понад 20%. Це свідчить про те, що електричні транспортні засоби переходять із категорії нішевої технології до масового сегмента автомобільного ринку. Найвищі темпи розвитку спостерігаються у Китаї, де продажі електромобілів у 2024 році перевищили 11 млн одиниць, що зробило країну найбільшим світовим ринком електротранспорту. Водночас Європейський Союз і США також залишаються важливими центрами розвитку електромобільності, хоча темпи зростання в цих регіонах залежать від державної політики, вартості електромобілів, доступності зарядної інфраструктури та рівня розвитку електромереж.

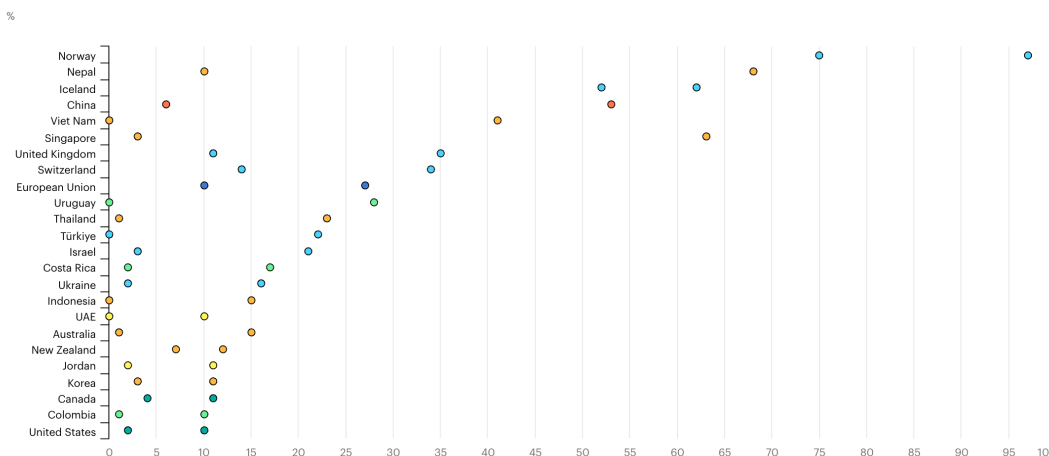


Рисунок 1.1 – Динаміка світових продажів електромобілів за останні роки

Поширення електромобілів тісно пов'язане з розвитком зарядної інфраструктури. На початкових етапах розвитку електромобільності основна

увага приділялася збільшенню запасу ходу транспортних засобів і зменшенню вартості акумуляторних батарей. Однак із розширенням парку електромобілів дедалі більшого значення набуває питання доступності, потужності, надійності та інтелектуальності зарядних систем. Без достатньої кількості зарядних точок і зручних режимів заряджання навіть технічно досконалий електромобіль не може повністю реалізувати свої переваги в повсякденній експлуатації.

У 2024 році у світі було додано понад 1,3 млн публічних зарядних точок, що означає зростання більш ніж на 30% порівняно з попереднім роком. Важливо, що лише кількість зарядних точок, доданих протягом одного 2024 року, приблизно відповідала загальній кількості публічних зарядних точок, які існували у світі у 2020 році. Це демонструє різке прискорення розвитку зарядної інфраструктури та підтверджує, що електромобільність потребує не лише збільшення кількості транспортних засобів, але й масштабного розвитку енергетичної інфраструктури.

Global stock of public charging points by speed, 2020-2025

Open

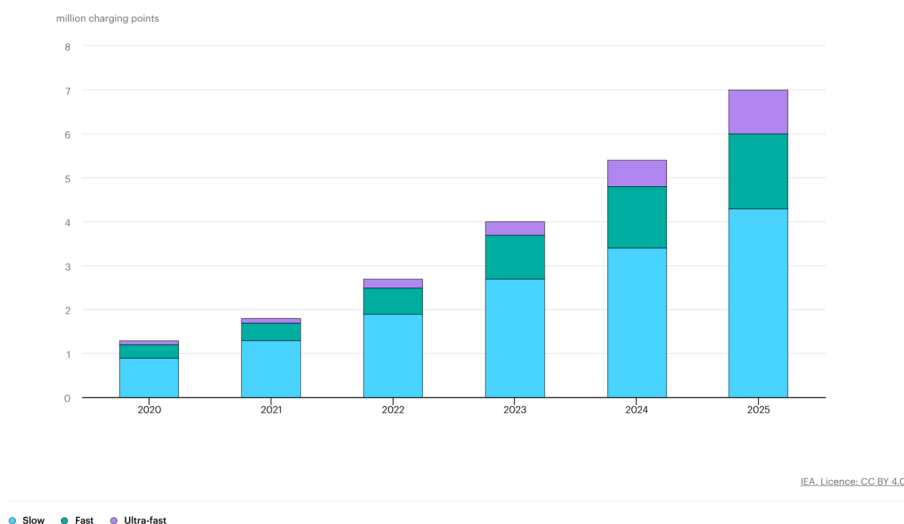


Рисунок 1.2 – Зростання кількості публічних зарядних точок у світі

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

Інший напрям розвитку зарядної інфраструктури пов'язаний зі швидкісними зарядними станціями постійного струму. Такі станції мають значно більшу потужність і дозволяють заряджати тягову акумуляторну батарею за короткий час. У режимі DC-заряджання перетворення змінного струму на постійний виконується не в автомобілі, а у зовнішній зарядній станції, після чого енергія подається безпосередньо до високовольтної батареї через відповідний інтерфейс і систему керування.

Таблиця 1.1 – Основні типи зарядної інфраструктури електромобілів

Тип заряджання	Джерело живлення	Типова потужність	Основна сфера застосування	Особливість для електромобіля
Побутове АС-заряджання	Однофазна мережа 230 В	2,3–3,7 кВт	Домашнє заряджання, гаражі, приватні будинки	Заряджання виконується через бортовий зарядний пристрій
Прискорене АС-заряджання	Однофазна або трифазна мережа	7,4–22 кВт	Паркінги, офіси, торговельні центри, громадські зарядні точки	Потужність заряджання обмежується можливостями ОВС
Швидке DC-заряджання	Промислова мережа через зовнішній перетворювач	50–150 кВт	Магістралі, комерційні зарядні станції, транспортні вузли	Бортовий зарядний пристрій не є основним елементом перетворення
Надшвидке DC-заряджання	Високотужна зарядна станція	150–350 кВт і більше	Далекі поїздки, швидке поповнення запасу ходу	Вимагає батареї, здатної приймати високі зарядні струми
Кероване заряджання	АС або DC-інфраструктура з цифровим керуванням	Залежить від мережі та зарядного пристрою	Розумні мережі, парки електромобілів, комерційні об'єкти	Зарядна потужність змінюється залежно від стану батареї та мережі

Для більшості власників електромобілів основним режимом щоденного заряджання залишається заряджання змінним струмом. Це пояснюється тим, що автомобіль значну частину доби перебуває на стоянці, а тому не завжди потребує швидкісного заряджання. У таких умовах бортовий зарядний пристрій забезпечує перетворення електричної енергії з мережі, стабілізує зарядний струм, обмежує напругу на кінцевому етапі заряджання та взаємодіє із системою керування батареєю. Отже, ефективність АС-заряджання безпосередньо залежить не тільки від зовнішньої зарядної точки, а й від конструкції, потужності та алгоритмів роботи бортового зарядного пристрою.

Сучасна зарядна інфраструктура поступово переходить від простого підключення автомобіля до мережі до інтелектуального керування зарядним процесом [2]. З технічної точки зору зарядна інфраструктура є сукупністю елементів, які мають працювати узгоджено: зарядний пристрій, система захисту та обліку, комунікаційний модуль, іноді локальний контролер керування навантаженням, а також електричне приєднання до мережі. У простому випадку зарядний пристрій працює як нерегульоване навантаження: при підключенні автомобіля він намагається заряджати з максимально можливою потужністю, обмеженою самим зарядним пристроєм і можливостями автомобіля. Проте за зростання кількості одночасних підключень такий підхід швидко стає проблемним, оскільки у години пікового попиту сумарна потужність може перевищити допустимі значення для трансформаторної підстанції, кабельних ліній або захисної апаратури. Тому сучасний стан інфраструктури характеризується переходом від простої установки зарядних точок до впровадження функцій керування навантаженням, коли потужність заряджання розподіляється між автомобілями в часі, а система враховує обмеження мережі та бажаний рівень заряду до заданого часу.

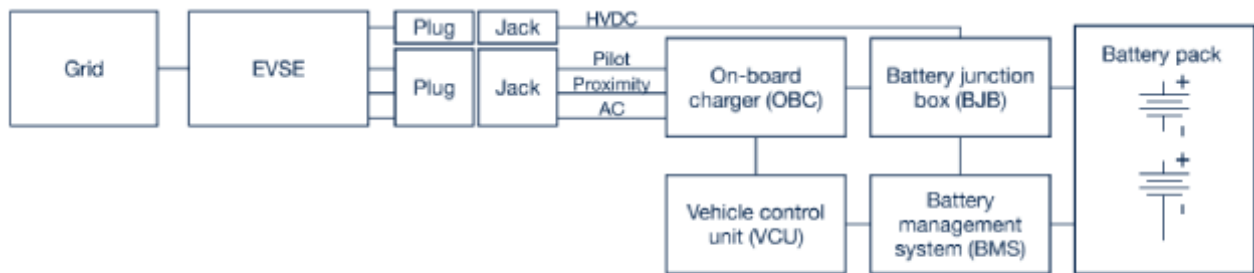


Рисунок 1.3 – Схема взаємодії електромережі, зарядного обладнання, бортового зарядного пристрою, BMS і тягової батареї

В Україні ринок електромобілів також демонструє позитивну динаміку, хоча має свої особливості. У 2025 році кількість зареєстрованих батарейних електричних транспортних засобів перевищила 110 тис. одиниць, з яких основну частку становили легкові електромобілі. Це підтверджує, що електромобільність в Україні розвивається навіть в умовах складної економічної та енергетичної ситуації. Водночас швидке збільшення кількості електромобілів створює додаткові вимоги до зарядної інфраструктури, електричних мереж і технічної підготовки сервісних підприємств, які мають працювати з високовольтними системами електротранспорту.

Особливістю українського ринку є те, що значна частина електромобілів експлуатується в умовах міського або приміського руху, де найбільш зручним є регулярне заряджання від мережі змінного струму. Це означає, що для багатьох власників електромобілів критично важливою є не тільки наявність публічних швидкісних зарядних станцій, але й можливість безпечного заряджання вдома, у гаражі, на паркінгу або на робочому місці. У таких умовах технічний рівень

бортового зарядного пристрою визначає реальну зручність експлуатації електромобіля, оскільки саме він обмежує максимальну потужність АС-заряджання, забезпечує захист батареї та підтримує необхідний зарядний профіль.

Таблиця 1.2 – Основні тенденції розвитку електромобільності та зарядної інфраструктури

Тенденція	Зміст тенденції	Технічне значення для бортового зарядного пристрою
Зростання кількості електромобілів	Збільшується частка BEV і PHEV у структурі автомобільного ринку	Підвищується потреба в ефективних і надійних зарядних системах
Розвиток АС-заряджання	Поширюються домашні, офісні та громадські зарядні точки змінного струму	Бортовий зарядний пристрій стає ключовим елементом щоденного заряджання
Збільшення потужності зарядних систем	Розвиваються зарядні пристрої 7,4 кВт, 11 кВт, 22 кВт і швидкісні DC-станції	Необхідне вдосконалення силової електроніки, охолодження та захисту
Поширення керованого заряджання	Зарядна потужність адаптується до стану мережі, батареї та потреб користувача	ОВС повинен підтримувати динамічне регулювання струму та потужності
Посилення вимог до електробезпеки	Зростає кількість високовольтних транспортних засобів в експлуатації	Потрібні ефективні системи ізоляції, діагностики та аварійного відключення
Інтеграція з цифровими системами	Заряджання пов'язується з BMS, EVSE та системами енергоменеджменту	Необхідна підтримка обміну даними та алгоритмів інтелектуального керування

З технічної точки зору розвиток електромобільності супроводжується зростанням вимог до ефективності, компактності та функціональності бортових зарядних пристроїв. Якщо перші електромобілі часто мали зарядні пристрої невеликої потужності, розраховані переважно на тривале нічне заряджання, то сучасні електромобілі дедалі частіше оснащуються ОВС потужністю 7,4 кВт, 11 кВт або 22 кВт. Збільшення потужності дозволяє скоротити час заряджання, але одночасно підвищує вимоги до силових напівпровідникових елементів, системи охолодження, електромагнітної сумісності, вхідного фільтра та алгоритмів керування.

Важливим напрямом розвитку є підвищення енергоефективності зарядного процесу. Втрати енергії під час перетворення АС/DC призводять до нагрівання силових компонентів, зниження загальної ефективності експлуатації електромобіля та підвищення вимог до системи охолодження. Тому сучасні бортові зарядні пристрої повинні мати високий коефіцієнт корисної дії, високий коефіцієнт потужності та мінімальний рівень гармонічних спотворень вхідного

струму. Це особливо важливо при масовому підключенні електромобілів до розподільчих електромереж, оскільки неякісне споживання струму може негативно впливати на роботу електричної інфраструктури [3].

1.2 Роль бортового зарядного пристрою в енергетичній системі електромобіля

Бортовий зарядний пристрій є одним із основних елементів енергетичної системи електромобіля, оскільки саме він забезпечує можливість заряджання тягової акумуляторної батареї від зовнішньої мережі змінного струму. На відміну від традиційного автомобіля з двигуном внутрішнього згорання, де поповнення запасу енергії відбувається шляхом заправлення паливом, електромобіль потребує електротехнічної системи, яка здатна безпечно приймати електричну енергію з мережі, перетворювати її до необхідних параметрів і передавати до високовольтної батареї. У цьому процесі бортовий зарядний пристрій виконує функцію проміжної ланки між зовнішнім джерелом електроенергії та тяговою акумуляторною батареєю.

У загальній структурі електромобіля бортовий зарядний пристрій розміщується між зарядним роз'ємом змінного струму та високовольтною акумуляторною батареєю. Під час підключення електромобіля до зарядної точки змінного струму зовнішнє зарядне обладнання забезпечує електричне з'єднання, контроль підключення та передачу допустимого струму, однак основне перетворення енергії виконується саме всередині автомобіля. Бортовий зарядний пристрій приймає змінну напругу, виконує її випрямлення, стабілізацію, корекцію коефіцієнта потужності, гальванічну ізоляцію та формування постійної напруги і струму, необхідних для заряджання батареї.

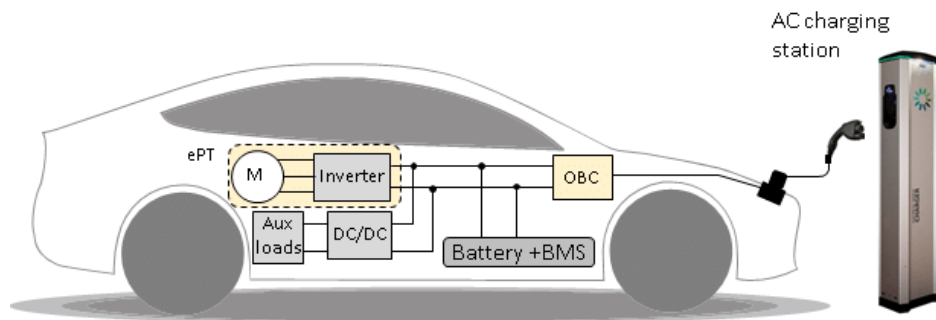


Рисунок 1.4 – Місце бортового зарядного пристрою в енергетичній системі електромобіля

Основна функція бортового зарядного пристрою полягає у перетворенні змінного струму зовнішньої мережі на постійний струм, придатний для заряджання тягової акумуляторної батареї. Оскільки більшість електромереж загального користування працює на змінному струмі, а акумуляторна батарея зберігає енергію у вигляді постійного струму, між ними обов'язково повинен бути силовий перетворювач. У випадку заряджання змінним струмом таким

перетворювачем є саме бортовий зарядний пристрій. Його вихідні параметри мають відповідати поточному стану батареї, зокрема її напрузі, рівню заряду, температурі та допустимому зарядному струму.

Бортовий зарядний пристрій також виконує функцію узгодження параметрів електромережі та тягової батареї. Напруга зовнішньої мережі може бути однофазною або трифазною, а її параметри можуть змінюватися залежно від навантаження, стану електропостачання та якості мережі. Водночас тягові акумуляторні батареї електромобілів мають високовольтну архітектуру, найчастіше з номінальною напругою близько 400 В або 800 В. Бортовий зарядний пристрій повинен забезпечити стабільне перетворення енергії між цими рівнями напруги, не допускаючи перевищення допустимих значень струму, напруги та температури.

Таблиця 1.3 – Основні функції бортового зарядного пристрою в електромобілі

Функція бортового зарядного пристрою	Зміст функції	Значення для роботи електромобіля
Перетворення змінного струму на постійний	Випрямлення напруги зовнішньої мережі та формування постійної напруги на виході	Забезпечує можливість заряджання тягової батареї від мережі змінного струму
Стабілізація зарядного струму	Підтримання заданого струму на основному етапі заряджання	Дозволяє контролювати швидкість заряджання та не перевищувати допустиме навантаження на батарею
Стабілізація зарядної напруги	Обмеження напруги батареї на завершальному етапі заряджання	Запобігає перезарядженню та підвищує безпеку зарядного процесу
Корекція коефіцієнта потужності	Формування якісного споживання струму з мережі	Зменшує реактивне навантаження і гармонічні спотворення
Гальванічна ізоляція	Електричне розділення мережі та високовольтної батареї	Підвищує рівень електробезпеки для користувача і сервісного персоналу
Взаємодія з BMS	Отримання інформації про допустимі параметри заряджання	Дозволяє враховувати стан батареї, SOC, температуру та обмеження за струмом
Захист силових кіл	Відключення або обмеження роботи при аварійних режимах	Запобігає пошкодженню батареї, зарядного пристрою та електричних з'єднань
Підтримка керованого заряджання	Зміна зарядної потужності відповідно до внутрішніх і зовнішніх умов	Забезпечує адаптацію заряджання до стану батареї, мережі та вимог користувача

Окрему роль бортовий зарядний пристрій відіграє у забезпеченні електромагнітної сумісності електромобіля із зовнішньою електромережею.

Силові електронні перетворювачі працюють у режимах високочастотного перемикання, що може створювати гармонічні спотворення струму та електромагнітні завади. Якщо зарядний пристрій не має належної системи фільтрації та корекції коефіцієнта потужності, він може погіршувати якість електроенергії в мережі, створювати додаткове навантаження на трансформатори, кабельні лінії та інше обладнання. Тому сучасні бортові зарядні пристрої обов'язково містять вхідні електромагнітні фільтри та каскади корекції коефіцієнта потужності.

Бортовий зарядний пристрій повинен працювати у тісній взаємодії із системою керування батареєю [4]. Система BMS контролює напругу окремих комірок або модулів батареї, температуру, рівень заряду, стан здоров'я батареї та допустимі межі заряджання. На основі цих даних BMS формує обмеження для зарядного струму і напруги. Бортовий зарядний пристрій, у свою чергу, повинен виконувати ці обмеження і змінювати режим роботи відповідно до команд системи керування батареєю. Така взаємодія є необхідною умовою безпечного заряджання, оскільки перевищення допустимого струму або напруги може призвести до перегріву, прискореної деградації або пошкодження акумуляторних елементів.

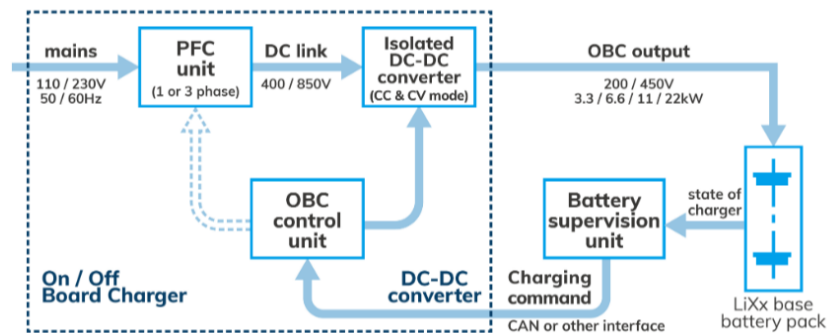


Рисунок 1.5 – Інформаційна взаємодія між бортовим зарядним пристроєм, BMS та зарядним обладнанням

Важливою особливістю сучасного електромобіля є наявність різних режимів заряджання. Якщо автомобіль заряджається від зовнішньої АС-станції або побутової мережі, основним елементом перетворення є бортовий зарядний пристрій. Якщо автомобіль підключається до швидкісної DC-станції, то зовнішня станція подає постійну напругу безпосередньо до батареї, а бортовий зарядний пристрій не бере участі в основному силовому перетворенні.

Таблиця 1.4 – Порівняння ролі бортового зарядного пристрою при АС- і DC-заряджанні

Ознака	АС-заряджання	DC-заряджання
Джерело енергії	Мережа змінного струму через EVSE	Зовнішня швидкісна станція постійного струму

Основне перетворення енергії	Виконується бортовим зарядним пристроєм	Виконується зовнішньою зарядною станцією
Роль ОВС	Є головним силовим перетворювачем	Не виконує основного силового перетворення
Обмеження потужності	Визначається потужністю ОВС і можливостями мережі	Визначається станцією, батареєю та BMS
Типова сфера застосування	Домашнє, офісне, паркувальне зарядження	Швидке зарядження під час поїздок
Вплив на щоденну експлуатацію	Високий, оскільки використовується регулярно	Високий для далеких поїздок, але менш типовий для щоденного зарядження
Вимоги до бортового обладнання	Потужний, ефективний і безпечний ОВС	Надійна BMS, контактори, захист і комунікація зі станцією

Найбільш поширеними для сучасних електромобілів є бортові зарядні пристрої потужністю 3,3 кВт, 6,6–7,4 кВт, 11 кВт і 22 кВт. Пристрої потужністю 3,3 кВт зазвичай застосовуються у компактних електромобілях або старіших моделях і забезпечують тривале зарядження від побутової мережі. Пристрої потужністю 6,6–7,4 кВт характерні для однофазного зарядження та є поширеними в багатьох серійних електромобілях. Бортові зарядні пристрої потужністю 11 кВт зазвичай працюють від трифазної мережі та забезпечують оптимальний баланс між часом зарядження, габаритами пристрою, вартістю і навантаженням на мережу. Пристрої потужністю 22 кВт дозволяють ще більше скоротити час зарядження, однак потребують потужнішої трифазної мережі, складнішої силової частини та ефективнішої системи охолодження.

Таблиця 1.5 – Типові потужності бортових зарядних пристроїв електромобілів

Номинальна потужність ОВС	Тип мережі	Характеристика зарядження	Орієнтовна сфера застосування
3,3 кВт	Однофазна мережа 230 В	Повільне зарядження з невеликим навантаженням на мережу	Компактні електромобілі, базові комплектації, нічне зарядження
6,6–7,4 кВт	Однофазна мережа 230 В	Прискорене побутове зарядження	Домашні зарядні точки, приватні гаражі, міські електромобілі
11 кВт	Трифазна мережа 400 В	Збалансоване зарядження середньої потужності	Сучасні легкові електромобілі, офісні та громадські АС-станції
22 кВт	Трифазна мережа 400 В	Швидке АС-зарядження	Електромобілі з потужним ОВС, комерційні парковки, службовий транспорт

Бортовий зарядний пристрій також впливає на ресурс тягової акумуляторної батареї. Надмірний зарядний струм, часте зарядження до

максимального рівня, перегрів акумуляторних елементів або некоректний перехід між режимами постійного струму і постійної напруги можуть прискорювати деградацію батареї. Тому зарядний пристрій повинен не лише забезпечувати необхідну потужність, але й точно виконувати алгоритм заряджання, узгоджений із хімічним типом батареї та її поточним станом. У цьому полягає одна з ключових переваг керованого заряджання, оскільки воно дозволяє адаптувати зарядний процес до реальних умов експлуатації.

У сучасних електромобілях бортовий зарядний пристрій дедалі частіше розглядається як елемент інтелектуальної системи енергоменеджменту. Його робота може залежати не лише від стану батареї, але й від зовнішніх сигналів, зокрема доступної потужності зарядної точки, тарифу на електроенергію, навантаження локальної мережі або заданого користувачем часу завершення заряджання. У такому випадку зарядний пристрій не працює з постійною максимальною потужністю, а змінює зарядний струм відповідно до поточних умов. Це дозволяє зменшити пікові навантаження, підвищити енергоефективність і забезпечити більш гнучку взаємодію електромобіля з енергетичною інфраструктурою.

1.3 Тягові акумуляторні батареї та вимоги до процесу заряджання

Тяговий акумулятор є основним елементом енергетичної підсистеми електричних і гібридних транспортних засобів, оскільки саме він визначає доступну енергію для руху, допустиму пікову потужність, можливість рекуперації, швидкість заряджання та значною мірою – безпеку і ресурс силової установки. На відміну від стаціонарних систем накопичення енергії, у транспорті батарея працює в умовах високих вібрацій, змінних теплових режимів, широкого діапазону струмів і частих переходів між зарядом і розрядом. Це означає, що вибір типу батареї не може ґрунтуватися лише на енергетичній щільності або вартості: необхідно комплексно враховувати вимоги до питомої потужності, циклічної довговічності, температурної стійкості, керованості BMS, технологічності інтеграції в пакет і відповідності профілю навантажень конкретного класу транспортного засобу.

У сучасних електромобілях тягова акумуляторна батарея є складним технічним об'єктом, який складається з окремих акумуляторних елементів, об'єднаних у модулі, а модулі, у свою чергу, формують батарейний блок. Для отримання необхідної напруги окремі елементи з'єднують послідовно, а для збільшення ємності та допустимого струму застосовують паралельне з'єднання. У результаті формується високовольтна батарея, номінальна напруга якої в більшості сучасних електромобілів становить близько 400 В, а в новіших і більш потужних моделях може досягати 800 В. Така напруга дозволяє передавати значну потужність до тягового електродвигуна та зарядної системи при відносно менших струмах, що знижує втрати в провідниках і силових елементах.



Рисунок 1.6 – Загальна структура тягової акумуляторної батареї електромобіля

Основними параметрами тягової акумуляторної батареї є номінальна напруга, ємність, запас енергії, допустимий зарядний і розрядний струм, температурний діапазон роботи, ресурс циклів заряджання-розряджання, питома енергоємність і рівень безпеки. Енергія, що накопичується в тяговій батареї, може бути визначена за залежністю:

$$E_b = U_b \cdot Q_b \quad (1.1)$$

де E_b – енергія батареї, Вт·год; U_b – номінальна напруга батареї, В; Q_b – електрична ємність батареї, А·год.

У практичних розрахунках для електромобілів енергію батареї зазвичай подають у кВт·год:

$$E_b = \frac{U_b \cdot Q_b}{1000} \quad (1.2)$$

Ця залежність показує, що для збільшення запасу енергії можна підвищувати ємність батареї або її номінальну напругу. Однак обидва підходи мають технічні обмеження. Збільшення ємності призводить до зростання маси, габаритів і вартості батареї, а підвищення напруги потребує складнішої ізоляції, надійніших силових компонентів і підвищених вимог до електробезпеки.

Таблиця 1.6 – Основні параметри тягової акумуляторної батареї електромобіля

Параметр	Позначення	Одиниця вимірювання	Значення для процесу заряджання
Номінальна напруга батареї	U_b	В	Визначає рівень вихідної напруги бортового зарядного пристрою
Ємність батареї	Q_b	А·год	Впливає на кількість енергії, яку потрібно передати під час заряджання
Запас енергії	E_b	кВт·год	Визначає орієнтовний час заряджання та запас ходу
Зарядний струм	I_{ch}	А	Впливає на швидкість заряджання та теплове навантаження батареї

Зарядна потужність	P_{ch}	кВт	Визначає інтенсивність передавання енергії до батареї
Рівень заряду	SOC	%	Показує поточний ступінь зарядженості батареї
Стан здоров'я батареї	SOH	%	Характеризує залишкову ємність і технічний стан батареї
Температура батареї	T_b	°C	Визначає допустимий зарядний струм і безпечність заряджання
Коефіцієнт зарядного струму	C-rate	1/год	Характеризує відношення зарядного струму до ємності батареї

Найбільш поширеними в сучасних електромобілях є літій-іонні акумуляторні батареї. Їхня перевага полягає в поєднанні високої енергетичної щільності з достатньо високою питомою потужністю та прийнятною ефективністю в широкому діапазоні режимів. Однак під терміном літій-іонні батареї приховується ціла група хімічних систем з різними катодними матеріалами та різним балансом характеристик. Вибір конкретної хімії є ключовим для визначення профілю керування батареєю, оскільки різні системи мають різну термічну стабільність, різні граничні напруги, різну чутливість до швидкого заряджання і різні деградаційні механізми.

Батареї типу NMC мають добрий баланс між питомою енергоємністю, потужністю, ресурсом і вартістю. Вони широко застосовуються в електромобілях середнього та високого класу, оскільки дозволяють забезпечити значний запас ходу без надмірного збільшення маси батареї. Такі батареї потребують точного контролю напруги, температури та зарядного струму, оскільки перевищення допустимих меж може призвести до прискореної деградації або погіршення безпеки.

Батареї типу NCA характеризуються високою енергетичною щільністю та здатністю працювати з великими струмами. Вони придатні для електромобілів із підвищеними вимогами до запасу ходу та динамічних характеристик. Разом із тим такі батареї є чутливими до температурного режиму, тому для них особливо важливими є ефективне охолодження, точне балансування елементів і надійна система BMS.

Літій-залізо-фосфатні батареї мають нижчу питому енергоємність, але відзначаються високою термічною стабільністю, довшим ресурсом циклів і вищим рівнем безпеки. Вони менш схильні до термічного розгону, краще витримують багаторазове заряджання і розряджання та мають нижчу вартість завдяки відсутності дорогих матеріалів, таких як кобальт або нікель. Через це LFP-батареї дедалі частіше використовуються в масових електромобілях, міському транспорті та комерційних електричних транспортних засобах.

Процес заряджання тягової акумуляторної батареї повинен виконуватися з урахуванням електрохімічних особливостей акумуляторних елементів. Для літій-іонних батарей неприпустимими є перезарядження, глибокий розряд,

надмірний зарядний струм, заряджання при занадто низькій або занадто високій температурі, а також значний дисбаланс між окремими елементами батареї. Порушення цих умов може спричинити зниження ємності, збільшення внутрішнього опору, прискорене старіння елементів, перегрів або навіть аварійний режим роботи батареї. Тому бортовий зарядний пристрій не може працювати автономно без інформації про стан батареї. Його робота повинна бути узгоджена із системою керування батареєю.

Система керування батареєю виконує функції контролю, захисту та діагностики тягової акумуляторної батареї [5]. Вона вимірює напругу окремих елементів або модулів, контролює температуру в різних зонах батарейного блока, оцінює рівень заряду, визначає стан здоров'я батареї, контролює струм заряджання і розряджання, а також забезпечує балансування елементів. Під час заряджання BMS формує допустимі значення зарядного струму і напруги, які передаються до бортового зарядного пристрою. Якщо температура батареї виходить за допустимі межі або одна з комірок наближається до максимальної напруги, BMS повинна зменшити зарядний струм або припинити заряджання.

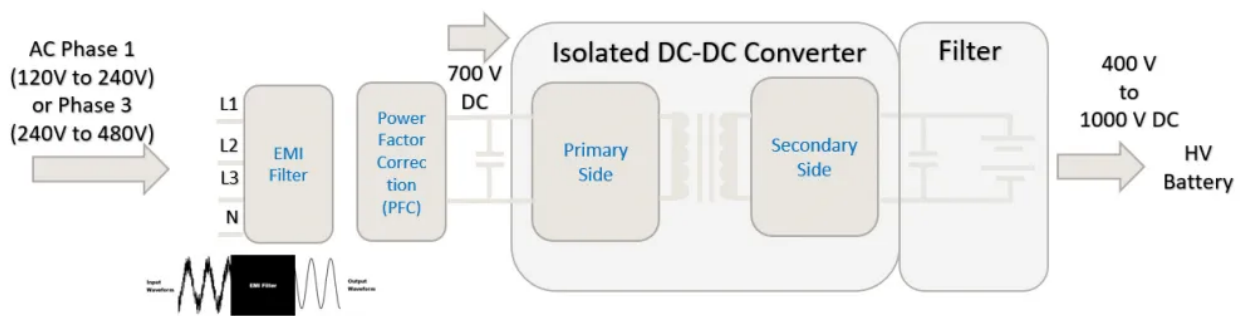


Рисунок 1.7 – Взаємодія тягової акумуляторної батареї, BMS і бортового зарядного пристрою

Основним зарядним профілем для літій-іонних тягових батарей є профіль постійного струму і постійної напруги [6]. На першому етапі заряджання, коли рівень заряду батареї є відносно низьким або середнім, бортовий зарядний пристрій працює в режимі стабілізації струму. У цьому режимі зарядний струм підтримується на заданому рівні, а напруга батареї поступово зростає. Саме цей етап забезпечує основне поповнення запасу енергії, тому він є найбільш важливим з погляду швидкості заряджання. Коли напруга батареї досягає верхнього допустимого значення, зарядний пристрій переходить до режиму стабілізації напруги. У цьому режимі напруга підтримується сталою, а зарядний струм поступово зменшується. Такий процес дозволяє завершити заряджання без перевищення максимально допустимої напруги на акумуляторних елементах. Завершення заряджання зазвичай відбувається тоді, коли зарядний струм знижується до певного мінімального значення або коли система BMS подає команду на припинення зарядного процесу.

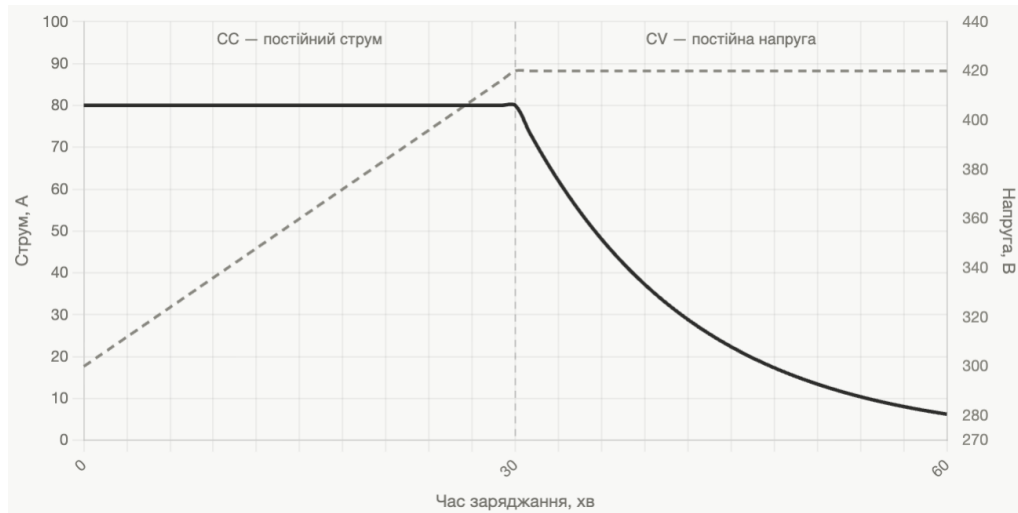


Рисунок 1.8 – Зміна напруги та струму батареї під час заряджання за профілем CC-CV

Орієнтовний час заряджання батареї можна визначити за формулою:

$$t_{ch} = \frac{E_b \cdot \Delta SOC}{P_{ch} \cdot \eta} \quad (1.3)$$

де t_{ch} – час заряджання, год; E_b – повна енергія батареї, кВт·год; ΔSOC – частка ємності, яку необхідно зарядити; P_{ch} – потужність заряджання, кВт; η – коефіцієнт корисної дії зарядного пристрою.

Ця формула дозволяє оцінити тривалість заряджання для різних значень потужності бортового зарядного пристрою. Наприклад, якщо батарея має ємність 60 кВт·год, заряджання виконується з 20 до 80%, а ККД зарядного пристрою становить 0,94, тоді кількість енергії, яку необхідно передати до батареї, становить 36 кВт·год. При потужності заряджання 11 кВт орієнтовний час заряджання можна визначити так:

$$t_{ch} = \frac{60 \cdot 0,6}{11 \cdot 0,94} = 3,48 \text{ год} \quad (1.4)$$

Отже, за заданих умов заряджання батареї від 20 до 80% за допомогою бортового зарядного пристрою потужністю 11 кВт триватиме приблизно 3,5 години. Реальний час може бути дещо більшим, оскільки на завершальному етапі заряджання потужність поступово зменшується через перехід до режиму стабілізації напруги.

Таблиця 1.7 – Орієнтовний час заряджання батареї ємністю 60 кВт·год у діапазоні SOC 20–80%

Потужність заряджання	Енергія, що передається до батареї	ККД зарядного пристрою	Орієнтовний час заряджання
3,7 кВт	36 кВт·год	0,90	10,8 год
7,4 кВт	36 кВт·год	0,92	5,3 год
11 кВт	36 кВт·год	0,94	3,5 год
22 кВт	36 кВт·год	0,94	1,7 год

Зарядний струм батареї залежить від потужності заряджання та поточної напруги батареї. Його можна визначити за залежністю:

$$I_{ch} = \frac{P_{ch}}{U_b} \quad (1.5)$$

де I_{ch} – зарядний струм, А; P_{ch} – зарядна потужність, Вт; U_b – напруга батареї, В.

Для бортового зарядного пристрою потужністю 11 кВт і батареї з напругою 400 В зарядний струм становитиме:

$$I_{ch} = \frac{11000}{400} = 27,5 \text{ А} \quad (1.6)$$

Це значення є орієнтовним, оскільки напруга батареї під час заряджання змінюється. На початку процесу, коли напруга батареї нижча, зарядний струм при тій самій потужності може бути більшим. На завершальному етапі, коли напруга наближається до максимального значення, струм зменшується відповідно до алгоритму заряджання. Тому бортовий зарядний пристрій повинен мати можливість динамічно регулювати вихідний струм і напругу.

Однією з важливих характеристик заряджання є C-rate, тобто відношення зарядного струму до номінальної ємності батареї. Якщо батарея має ємність 150 А·год, а зарядний струм становить 30 А, то заряджання відбувається з інтенсивністю 0,2С. Чим більший C-rate, тим швидше заряджається батарея, але тим вищими є теплові навантаження та ризик прискореної деградації. Для щоденного заряджання від бортового зарядного пристрою зазвичай застосовуються помірні значення зарядного струму, що позитивно впливає на довговічність батареї.

$$C_{rate} = \frac{I_{ch}}{Q_b} \quad (1.7)$$

де C_{rate} – коефіцієнт зарядного струму; I_{ch} – зарядний струм, А; Q_b – ємність батареї, А·год.

Температурний режим є одним із ключових факторів, що визначає допустимі параметри заряджання. Літій-іонні батареї мають обмежений температурний діапазон, у якому заряджання є безпечним і ефективним. За низьких температур зростає внутрішній опір акумуляторних елементів, погіршується приймання заряду та підвищується ризик небажаних електрохімічних процесів. За високих температур прискорюється деградація матеріалів, зростає ризик перегріву та знижується ресурс батареї. Тому зарядний пристрій повинен враховувати температуру батареї та, за необхідності, зменшувати зарядний струм або тимчасово блокувати заряджання.

Крім температури, важливим фактором є рівень заряду батареї. У середньому діапазоні SOC батарея здатна приймати заряд з відносно високою потужністю [7]. При наближенні до високого рівня заряду зарядна потужність повинна зменшуватися, оскільки елементи батареї досягають верхньої межі допустимої напруги. Саме тому заряджання від 20 до 80% зазвичай відбувається

значно швидше, ніж заряджання від 80 до 100%. У практичній експлуатації це означає, що для щоденного використання часто доцільно підтримувати батарею в середньому діапазоні заряду, що сприяє збільшенню її ресурсу.

Окремого значення набуває балансування акумуляторних елементів. Навіть у межах одного батарейного блока окремі комірки можуть мати незначні відмінності за ємністю, внутрішнім опором і швидкістю заряджання. Якщо ці відмінності не компенсувати, окремі елементи можуть досягати максимальної напруги раніше за інші, що обмежує повну доступну ємність батареї та підвищує ризик перезарядження. Система BMS виконує балансування елементів, а бортовий зарядний пристрій повинен забезпечувати достатньо плавне та контрольоване завершення зарядного процесу, щоб BMS могла вирівняти стан окремих комірок.

У процесі заряджання тягової батареї важливу роль відіграє правильне завершення зарядного процесу. Заряджання повинно припинитися не лише після досягнення заданого рівня SOC, але й у разі виникнення аварійних або граничних умов. До таких умов належать перевищення максимальної напруги окремої комірки, перегрів батареї, надмірний зарядний струм, несправність датчиків, втрата зв'язку з BMS, виявлення витоку струму або некоректне підключення зарядного обладнання. У всіх цих випадках бортовий зарядний пристрій повинен перейти в безпечний стан і припинити передавання енергії до батареї.

1.4 Стандарти, режими та принципи керованого заряджання електромобілів

Основа нормативного регулювання заряджання електромобілів становлять міжнародні стандарти, які визначають вимоги до зарядних систем, роз'ємів, режимів заряджання, електричної безпеки та цифрової комунікації. Одним із базових стандартів є IEC 61851, який описує загальні вимоги до *conductive charging system*, тобто систем заряджання електромобілів через провідникове електричне з'єднання. Цей стандарт визначає режими заряджання, вимоги до взаємодії між електромобілем і зарядним обладнанням, а також принципи контролю допустимого струму. Для роз'ємів і зарядних інтерфейсів важливим є стандарт IEC 62196, який регламентує конструкцію, електричні параметри та призначення зарядних з'єднувачів. Для сучасних інтелектуальних систем заряджання особливе значення має ISO 15118, який визначає цифрову комунікацію між електромобілем і зарядною інфраструктурою, зокрема можливість автоматичної ідентифікації, обміну параметрами заряджання, підтримки керованого заряджання та перспективних двонапрямних режимів обміну енергією.

Таблиця 1.8 – Основні стандарти, що регламентують заряджання електромобілів

Стандарт	Основне призначення
IEC 61851	Визначає загальні вимоги до провідникових систем заряджання електромобілів і режими заряджання
IEC 62196	Регламентує типи зарядних роз'ємів, вилок, розеток і з'єднувачів
ISO 15118	Описує цифровий обмін даними між електромобілем і зарядною інфраструктурою
SAE J1772	Визначає вимоги до заряджання електромобілів у північноамериканській практиці
OCPP	Описує обмін даними між зарядною станцією та центральною системою керування

Відповідно до принципів заряджання електромобілів розрізняють декілька основних режимів, які відрізняються способом підключення, рівнем безпеки, наявністю комунікації та місцем розташування силового перетворювача. У найпростішому випадку електромобіль може підключатися до звичайної побутової розетки, однак такий спосіб має обмеження за потужністю і рівнем контролю. Більш безпечним і технічно правильним є заряджання через спеціалізоване зарядне обладнання змінного струму, яке забезпечує контроль підключення, заземлення, допустимого струму і стану зарядного процесу. Для швидкого заряджання використовується обладнання постійного струму, в якому основне силове перетворення виконується зовнішньою зарядною станцією.

Таблиця 1.9 – Основні режими заряджання електромобілів

Режим заряджання	Характеристика режиму	Роль бортового зарядного пристрою
Mode 1	Підключення до звичайної мережі змінного струму без спеціального зарядного обладнання	Виконує перетворення AC/DC, але рівень контролю з боку інфраструктури мінімальний
Mode 2	Заряджання від побутової мережі через кабель із вбудованим блоком захисту та контролю	ОБС виконує основне перетворення енергії, а зовнішній блок підвищує безпеку підключення
Mode 3	Заряджання від спеціалізованої AC-зарядної станції або настінного зарядного пристрою	ОБС є головним силовим перетворювачем, а EVSE задає допустимий струм і контролює підключення
Mode 4	Швидке заряджання постійним струмом від зовнішньої DC-станції	Основне перетворення виконується зовнішньою станцією, а ОБС не бере участі в силовому заряджанні

Під час AC-заряджання зовнішнє зарядне обладнання не перетворює енергію до параметрів батареї, а виконує функцію керованого інтерфейсу між електромережею та електромобілем. Воно повідомляє автомобілю про максимальний допустимий струм, контролює стан підключення, забезпечує захисне відключення у разі несправності та не допускає подачу напруги до

моменту підтвердження готовності автомобіля до заряджання. Основне перетворення змінного струму на постійний у цьому випадку виконується бортовим зарядним пристроєм. Тому потужність АС-заряджання обмежується не лише можливостями зовнішньої зарядної точки, але й номінальною потужністю ОВС. Важливим елементом взаємодії електромобіля з АС-зарядним обладнанням є сигнальні лінії Control Pilot і Proximity Pilot. Лінія Control Pilot використовується для обміну базовими сигналами між зарядним обладнанням і автомобілем [2]. За її допомогою зарядна точка визначає факт підключення електромобіля, повідомляє про допустимий струм і контролює готовність до заряджання. Лінія Proximity Pilot використовується для визначення наявності зарядного кабелю та його допустимого струмового навантаження. Такий підхід дозволяє уникнути ситуацій, коли автомобіль намагається споживати більший струм, ніж може безпечно передати кабель або зарядна точка.

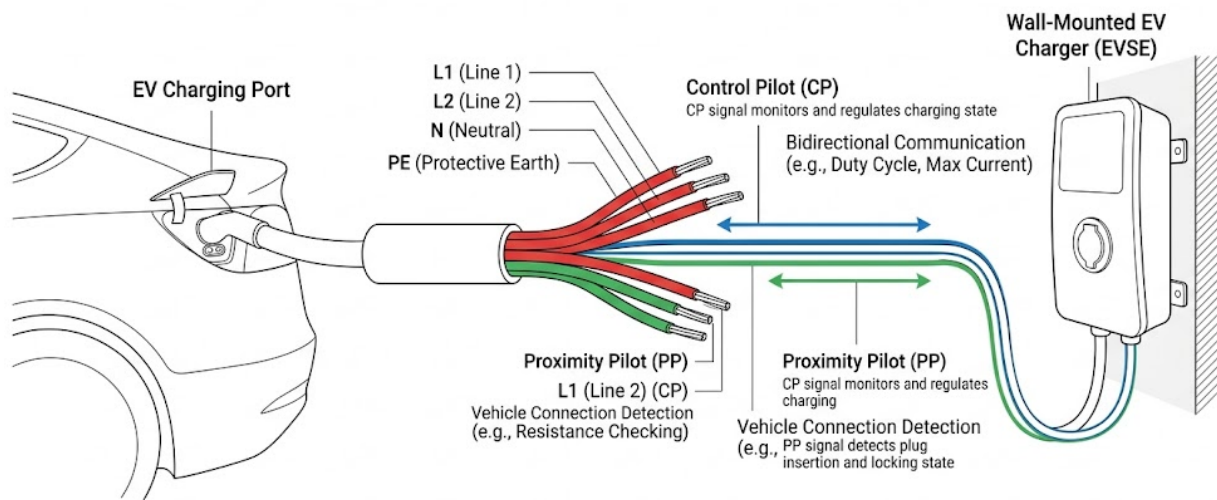


Рисунок 1.9 – Схема взаємодії електромобіля із зарядним обладнанням змінного струму

З технічної точки зору керуване заряджання можна розглядати як процес динамічного визначення допустимого зарядного струму. Це значення формується з урахуванням кількох обмежень: максимальної потужності зовнішньої зарядної точки, допустимого струму зарядного кабелю, поточної температури батареї, рівня заряду, допустимого струму за даними BMS, технічних можливостей бортового зарядного пристрою та зовнішніх команд системи енергоменеджменту. Фактичний зарядний струм повинен вибиратися як найменше з усіх допустимих значень, оскільки саме такий підхід забезпечує безпечну роботу всієї системи.

У спрощеному вигляді це можна подати залежністю:

$$I_{ch} = \min(I_{OBC}, I_{EVSE}, I_{BMS}, I_{cable}, I_{grid}) \quad (1.8)$$

де I_{ch} – фактичний зарядний струм; I_{OBC} – максимальний струм, який може забезпечити бортовий зарядний пристрій; I_{EVSE} – струм, дозволений зарядним обладнанням; I_{BMS} – струм, дозволений системою керування батареєю; I_{cable} –

допустимий струм зарядного кабелю; I_{grid} – струм, дозволений з урахуванням обмежень електромережі.

Ця залежність показує, що навіть потужний бортовий зарядний пристрій не завжди працює на максимальній потужності. Якщо будь-який елемент системи має нижче допустиме обмеження, зарядний струм повинен бути зменшений. Такий принцип є основою безпечного і керованого заряджання.

Кероване заряджання може реалізовуватися на різних рівнях. На рівні бортового зарядного пристрою виконується безпосереднє регулювання струму і напруги відповідно до команд керування. На рівні BMS визначаються допустимі межі заряджання з урахуванням стану батареї. На рівні EVSE задається максимальний струм, який може бути переданий через зарядну точку і кабель. На рівні енергоменеджменту можуть формуватися додаткові обмеження, пов'язані з навантаженням будинку, підприємства або локальної електромережі. Усі ці рівні повинні працювати узгоджено, оскільки некоректна взаємодія між ними може призвести до перевантаження, неефективного заряджання або аварійного відключення.

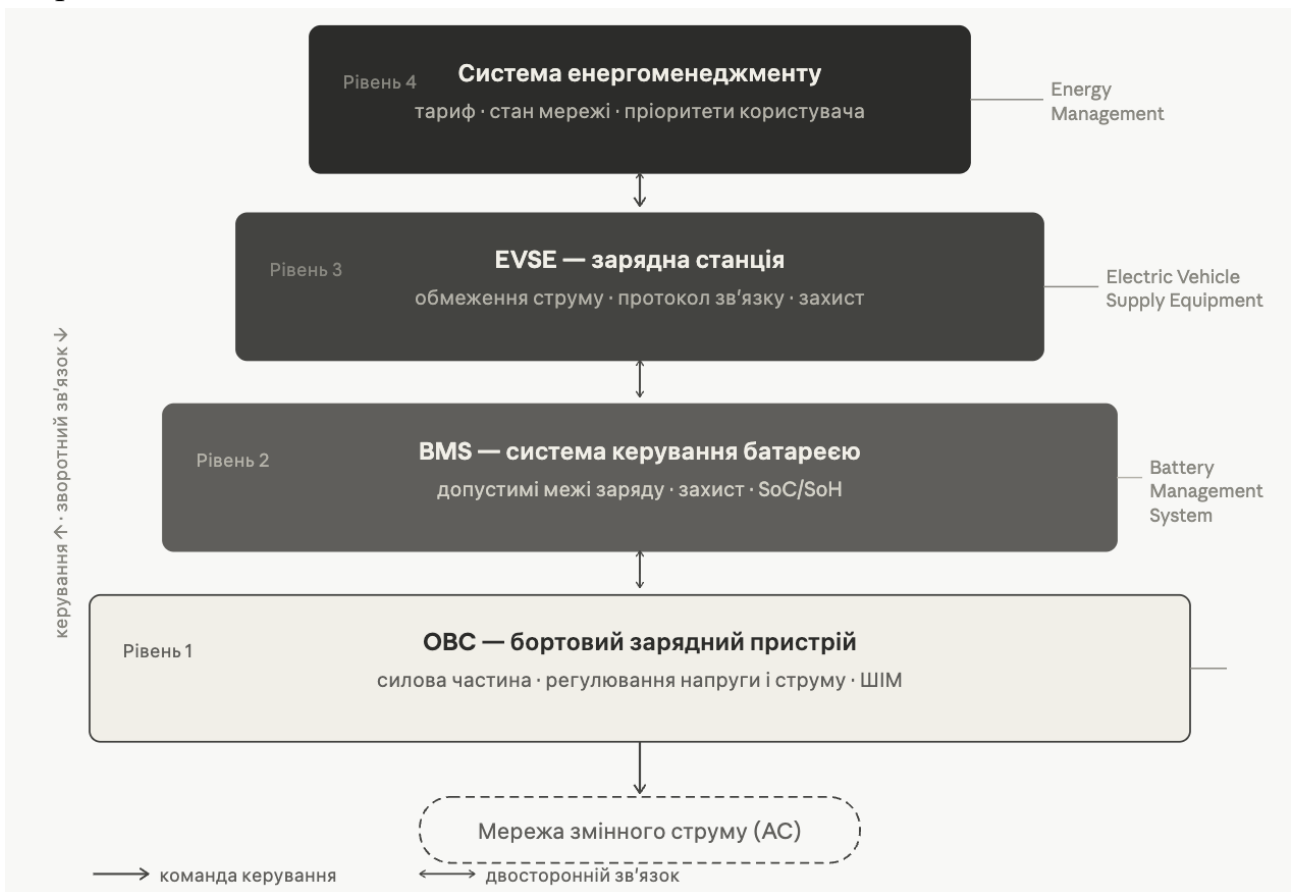


Рисунок 1.10 – Ієрархія керування процесом заряджання електромобіля

1.5 Постановка задач дослідження

Проведений аналіз сучасного стану електромобільності, зарядної інфраструктури, тягових акумуляторних батарей та режимів заряджання показує, що ефективність експлуатації електромобіля значною мірою залежить від якості

роботи його бортового зарядного пристрою. Під час заряджання від мережі змінного струму саме цей пристрій забезпечує перетворення електричної енергії, узгодження параметрів зовнішньої мережі з вимогами тягової акумуляторної батареї, стабілізацію зарядного струму і напруги, а також виконання захисних функцій. Тому бортовий зарядний пристрій не можна розглядати лише як допоміжний електронний модуль, оскільки він є важливою частиною високовольтної енергетичної системи електромобіля.

Водночас проектування бортового зарядного пристрою пов'язане з низкою технічних обмежень. Пристрій повинен мати достатню потужність для практично зручного заряджання, але при цьому залишатися компактним, енергоефективним, безпечним і придатним для розміщення в конструкції електромобіля. Його силова частина повинна забезпечувати високий коефіцієнт корисної дії, корекцію коефіцієнта потужності, гальванічну ізоляцію, стабільну роботу в широкому діапазоні вхідних і вихідних параметрів, а також захист від аварійних режимів. Крім того, бортовий зарядний пристрій повинен взаємодіяти із системою BMS, яка визначає допустимі режими заряджання тягової батареї.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі дослідження:

1. Провести аналіз сучасного стану розвитку електромобільності та зарядної інфраструктури.
2. Визначити роль бортового зарядного пристрою в енергетичній системі електромобіля.
3. Розглянути основні типи тягових акумуляторних батарей та вимоги до процесу їх заряджання.
4. Дослідити режими заряджання електромобілів і принципи реалізації керованого заряджання.
5. Сформувати вихідні технічні вимоги до бортового зарядного пристрою електромобіля.
6. Обрати структурну схему та силову топологію бортового зарядного пристрою.
7. Виконати розрахунок основних електричних параметрів силової частини пристрою.
8. Розробити алгоритм керованого заряджання тягової акумуляторної батареї.
9. Запропонувати конструктивні рішення щодо реалізації бортового зарядного пристрою, вибору його основних компонентів, системи захисту та теплового режиму.

2 ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ

2.1 Вихідні дані та технічні вимоги до бортового зарядного пристрою

Проектування бортового зарядного пристрою електромобіля повинно починатися з формування вихідних даних, які визначають основні електричні, конструктивні та експлуатаційні параметри майбутнього пристрою. На цьому етапі необхідно встановити тип електромобіля, напругу та ємність тягової акумуляторної батареї, номінальну потужність заряджання, параметри зовнішньої електромережі, очікуваний коефіцієнт корисної дії, допустимі межі зарядного струму і напруги, а також вимоги до керування та захисту. Для розрахунку приймається електромобіль із високовольтною тяговою акумуляторною батареєю номінальною напругою 400 В. Така архітектура є типовою для значної частини сучасних легкових електромобілів і дозволяє реалізувати бортовий зарядний пристрій середньої потужності без надмірного ускладнення силової частини [8]. Як розрахункову ємність батареї доцільно прийняти 60 кВт·год, оскільки це значення відповідає електромобілю середнього класу та дозволяє виконати наочний розрахунок часу заряджання, зарядного струму і потужності.

Номінальна потужність бортового зарядного пристрою приймається на рівні 11 кВт. Такий варіант є технічно обґрунтованим, оскільки він забезпечує достатньо швидке заряджання від трифазної мережі змінного струму, не потребує надмірно великих струмів у силових колах і може бути реалізований у межах конструктивних обмежень легкового електромобіля. Потужність 11 кВт також є компромісною між повільним однофазним заряджанням потужністю 3,7–7,4 кВт і більш потужним трифазним АС-заряджанням на 22 кВт, яке потребує складнішої елементної бази, ефективнішого охолодження та вищих вимог до мережі живлення.

Таблиця 2.1 – Вихідні дані для проектування бортового зарядного пристрою

Параметр	Позначення	Прийняте значення
Тип транспортного засобу	–	BEV
Тип зарядного пристрою	–	Бортовий АС/DC
Номінальна напруга батареї	U_b	400 В
Діапазон напруги батареї	$U_{b.min} - U_{b.max}$	300–450 В
Ємність батареї	E_b	60 кВт·год
Номінальна потужність заряджання	P_{ch}	11 кВт
Вхідна напруга	U_{in}	3×400 В, 50 Гц
Очікуваний ККД	η	0,94
Коефіцієнт потужності	$\cos\varphi$	не менше 0,95
Основний режим заряджання	–	CC-CV
Тип керування	–	Кероване заряджання

Прийнятий діапазон вихідної напруги 300–450 В враховує зміну напруги тягової акумуляторної батареї під час заряджання. На початковому етапі, коли

рівень заряду батареї є нижчим, її напруга також є меншою. У процесі заряджання напруга поступово зростає і наближається до верхньої допустимої межі. Тому бортовий зарядний пристрій не може мати фіксовану вихідну напругу, а повинен забезпечувати регульований діапазон роботи. Це особливо важливо для реалізації зарядного профілю CC-CV, у якому спочатку підтримується сталий струм, а після досягнення граничної напруги батареї підтримується стала напруга з поступовим зменшенням струму.

Для визначення основних струмових навантажень необхідно оцінити вихідний зарядний струм. За номінальної потужності заряджання 11 кВт і напруги батареї 400 В зарядний струм становитиме:

$$I_{ch} = \frac{P_{ch}}{U_b} \quad (2.1)$$

$$I_{ch} = \frac{11000}{400} = 27,5 \text{ А}$$

Отримане значення показує, що для батареї з номінальною напругою 400 В бортовий зарядний пристрій потужністю 11 кВт повинен забезпечувати зарядний струм приблизно 27,5 А. Оскільки напруга батареї змінюється в процесі заряджання, максимальний струм може бути дещо більшим при нижчій напрузі батареї. Наприклад, за напруги 300 В і тієї ж потужності зарядний струм може досягати:

$$I_{ch.max} = \frac{11000}{300} = 36,7 \text{ А}$$

Отже, силові елементи, вихідний фільтр, датчики струму, контактори та провідники вихідного кола необхідно обирати з урахуванням максимального можливого зарядного струму, а не лише номінального значення при 400 В. Для подальших розрахунків доцільно прийняти максимальний вихідний струм на рівні 40 А, що забезпечує певний запас за струмовим навантаженням.

Таблиця 2.2 – Розрахункові вихідні параметри бортового зарядного пристрою

Параметр	Позначення	Розрахункове значення
Номінальна потужність заряджання	P_{ch}	11 кВт
Номінальна напруга батареї	U_b	400 В
Номінальний зарядний струм	I_{ch}	27,5 А
Мінімальна розрахункова напруга батареї	$U_{b.min}$	300 В
Максимальний розрахунковий зарядний струм	$I_{ch.max}$	36,7 А
Прийнятий максимальний струм із запасом	$I_{out.max}$	40 А
Максимальна напруга батареї	$U_{b.max}$	450 В
Основний профіль заряджання	–	CC-CV

Вхідні параметри пристрою визначаються типом електромережі, від якої буде виконуватися заряджання. Для бортового зарядного пристрою потужністю 11 кВт доцільним є живлення від трифазної мережі 400 В частотою 50 Гц. У такій мережі навантаження розподіляється між трьома фазами, що дозволяє зменшити струм у кожній фазі порівняно з однофазним заряджанням тієї ж потужності.

Орієнтовний вхідний струм однієї фази для трифазної мережі можна визначити за формулою:

$$I_{in} = \frac{P_{ch}}{\sqrt{3} \cdot U_{LL} \cdot \eta \cdot \cos\varphi} \quad (2.2)$$

де I_{in} – вхідний струм однієї фази, А; P_{ch} – вихідна потужність зарядного пристрою, Вт; U_{LL} – лінійна напруга трифазної мережі, В; η – коефіцієнт корисної дії зарядного пристрою; $\cos\varphi$ – коефіцієнт потужності.

Для прийнятих вихідних даних:

$$I_{in} = \frac{11000}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0,94 \cdot 0,95} = 17,8 \text{ А}$$

Таким чином, при потужності 11 кВт вхідний струм становитиме приблизно 18 А на фазу. Це значення необхідно враховувати під час вибору вхідного фільтра, випрямляча, силових ключів, кабельних з'єднань, запобіжників і пристроїв захисту. Для забезпечення надійності елементи вхідного кола повинні мати запас за струмом, тому їх доцільно обирати на струм не менше 20–25 А.

Бортовий зарядний пристрій повинен відповідати не лише розрахунковим електричним параметрам, але й загальним технічним вимогам до автомобільної силової електроніки. Насамперед він повинен мати високий коефіцієнт корисної дії, оскільки втрати енергії під час заряджання призводять до нагрівання компонентів, збільшення навантаження на систему охолодження і зниження загальної ефективності експлуатації електромобіля. Для пристрою потужністю 11 кВт доцільно прийняти цільовий ККД не нижче 94%, що є реалістичним показником для сучасних зарядних пристроїв із якісною силовою елементною базою.

Важливою вимогою є гальванічна ізоляція між мережею змінного струму та високовольтною батареєю [8]. Вона необхідна для підвищення електробезпеки, захисту користувача, сервісного персоналу та електронних систем автомобіля. Ізоляція може бути реалізована за допомогою високочастотного трансформатора в складі DC/DC-перетворювача. Крім того, пристрій повинен мати контроль ізоляції, захист від витоку струму, перенапруги, перевантаження, короткого замикання та перегріву.

Окремо необхідно визначити вимоги до керованого заряджання. У межах цієї роботи кероване заряджання розглядається як здатність бортового зарядного пристрою змінювати зарядний струм і потужність залежно від поточного стану батареї, обмежень зарядного обладнання та стану електромережі. Це означає, що пристрій не повинен працювати лише за фіксованим значенням потужності. Його алгоритм має передбачати зменшення струму при високому рівні заряду, підвищеній або зниженій температурі батареї, обмеженні доступної потужності EVSE, перегріві силових елементів або надходженні команди від системи керування.

Для реалізації керованого заряджання фактичний зарядний струм доцільно визначати як мінімальне значення серед кількох допустимих обмежень:

$$I_{ch} = \min(I_{OBC}, I_{BMS}, I_{EVSE}, I_{grid}, I_{thermal}) \quad (2.3)$$

де I_{OBC} – струм, який може забезпечити бортовий зарядний пристрій; I_{BMS} – струм, дозволений системою керування батареєю; I_{EVSE} – струм, дозволений зовнішнім зарядним обладнанням; I_{grid} – струм, допустимий з урахуванням стану електромережі; $I_{thermal}$ – струм, обмежений тепловим режимом пристрою.

Такий принцип дозволяє забезпечити узгоджену роботу всіх елементів зарядної системи. Якщо батарея здатна приймати великий струм, але зарядне обладнання або електромережа мають нижче обмеження, зарядний пристрій повинен працювати відповідно до меншого значення. Якщо зовнішня мережа дозволяє високу потужність, але батарея перебуває при несприятливій температурі або високому SOC, зарядний струм також повинен бути знижений. Таким чином, кероване заряджання підвищує безпечність процесу, знижує навантаження на батарею та забезпечує кращу адаптацію електромобіля до реальних умов експлуатації.

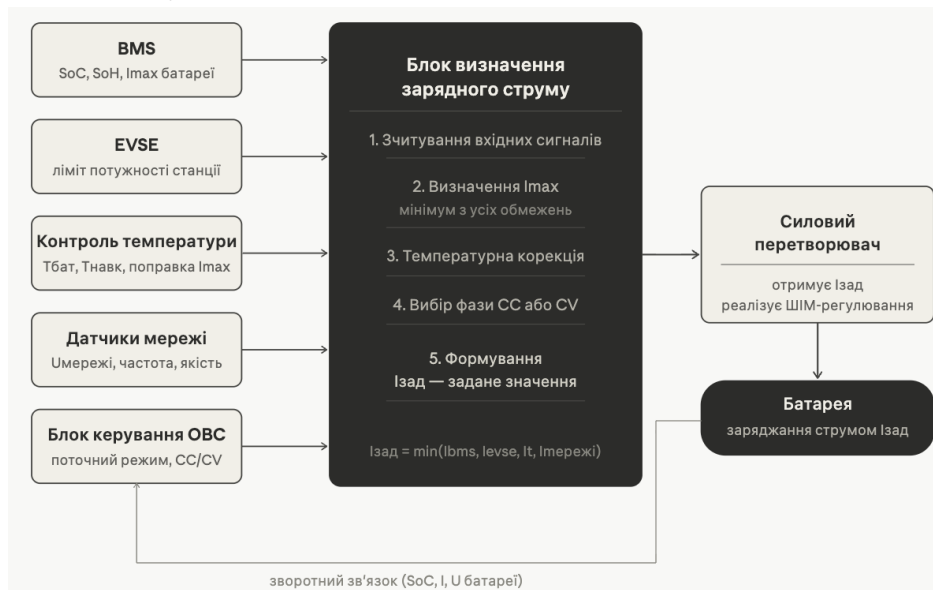


Рисунок 2.1 – Формування допустимого зарядного струму в системі керованого заряджання

2.2 Вибір структурної схеми та силової топології ОВС

Вибір структурної схеми бортового зарядного пристрою є одним із ключових етапів його проектування, оскільки саме структура пристрою визначає спосіб перетворення електричної енергії, рівень енергоефективності, електробезпеку, можливість керування зарядним процесом і сумісність із тяговою акумуляторною батареєю електромобіля [9]. Бортовий зарядний пристрій повинен забезпечувати перетворення енергії від мережі змінного струму до високовольтної батареї, стабілізувати зарядний струм і напругу,

підтримувати зарядний профіль CC-CV, обмежувати потужність відповідно до команд системи BMS та забезпечувати захист від аварійних режимів.

Для прийнятих у роботі вихідних даних доцільно обрати структурну схему бортового зарядного пристрою потужністю 11 кВт, призначеного для роботи від трифазної мережі змінного струму 3×400 В і заряджання тягової акумуляторної батареї з номінальною напругою 400 В. Такий зарядний пристрій повинен мати вхідний фільтр, випрямляч із корекцією коефіцієнта потужності, проміжну ланку постійного струму, ізольований DC/DC-перетворювач, вихідний фільтр, датчики струму і напруги, блок керування та систему захисту. Наявність цих функціональних вузлів дозволяє забезпечити якісне перетворення енергії, електричну ізоляцію між мережею і батареєю, регулювання зарядних параметрів та взаємодію із системою керування батареєю.



Рисунок 2.2 – Структурна схема бортового зарядного пристрою електромобіля

Першим функціональним вузлом бортового зарядного пристрою є вхідний блок захисту. Він призначений для безпечного підключення пристрою до зовнішньої мережі змінного струму та захисту силових кіл від небезпечних режимів. До складу цього блока можуть входити запобіжники, варистори, обмежувачі імпульсних перенапруг, реле або контактори, а також засоби контролю правильності підключення. Його основне завдання полягає в тому, щоб запобігти пошкодженню зарядного пристрою у разі перенапруги, короткого замикання, помилкового підключення або появи імпульсних завад у мережі.

Після вхідного захисту встановлюється електромагнітний фільтр. Необхідність його застосування пояснюється тим, що силові електронні перетворювачі працюють у режимі високочастотного перемикачання і можуть створювати електромагнітні завади, які поширюються як у напрямку мережі, так і в напрямку внутрішніх електронних систем автомобіля. ЕМІ-фільтр зменшує рівень високочастотних завад, покращує електромагнітну сумісність зарядного пристрою та знижує негативний вплив силового перетворювача на зовнішню електромережу. Для автомобільного застосування це особливо важливо,

оскільки в електромобілі одночасно працює значна кількість електронних блоків керування, датчиків і комунікаційних систем.

Наступним основним вузлом є вхідний AC/DC-каскад. Його функція полягає у випрямленні змінної напруги трифазної мережі та формуванні стабілізованої проміжної напруги постійного струму. Для зарядного пристрою потужністю 11 кВт звичайний некерований випрямляч є недостатньо ефективним рішенням, оскільки він може створювати значні гармонічні спотворення струму та погіршувати коефіцієнт потужності. Тому доцільно застосувати активний випрямляч або PFC-каскад, який забезпечує корекцію коефіцієнта потужності, формує якісне споживання струму з мережі та стабілізує напругу проміжної DC-ланки.

PFC-каскад є важливим елементом структури ОВС, оскільки він забезпечує узгодження зарядного пристрою з електромережею. Його робота полягає в тому, що вхідний струм формується максимально наближеним до синусоїдального та узгодженим за фазою з напругою мережі [10]. Завдяки цьому зменшується реактивне навантаження, знижуються втрати в електромережі та підвищується якість споживання електроенергії. Для трифазного зарядного пристрою потужністю 11 кВт застосування PFC-каскаду є технічно обґрунтованим, оскільки пристрій працює з достатньо великими струмами і повинен відповідати вимогам електромагнітної сумісності.

Після PFC-каскаду розміщується проміжна ланка постійного струму. Вона виконує роль енергетичного буфера між вхідним випрямлячем і вихідним DC/DC-перетворювачем. До її складу входять конденсатори, які згладжують пульсації напруги, забезпечують короткочасний запас енергії та стабілізують роботу наступного перетворювального каскаду. Для трифазної мережі 400 В напруга проміжної DC-ланки може прийматися в межах приблизно 650–750 В, що дозволяє ефективно реалізувати подальше перетворення до діапазону напруги тягової батареї 300–450 В.

Вихідний силовий каскад доцільно виконати у вигляді ізольованого DC/DC-перетворювача. Для вихідного DC/DC-каскаду можуть застосовуватися різні силові топології: фазозсувний повномостовий перетворювач, резонансний LLC-перетворювач або Dual Active Bridge. Кожна з цих топологій має свої переваги та обмеження. Фазозсувний повномостовий перетворювач є достатньо поширеним рішенням для середніх і високих потужностей, має відносно зрозумілу структуру та дозволяє реалізувати гальванічну ізоляцію. LLC-перетворювач забезпечує високий ККД завдяки м'якому перемиканню силових ключів, що зменшує комутаційні втрати та теплове навантаження. Dual Active Bridge є перспективною топологією для двонапрямних зарядних пристроїв, оскільки дозволяє передавати енергію в обох напрямках, але має складнішу систему керування.

З урахуванням прийнятої потужності 11 кВт, вимог до високого ККД, компактності, гальванічної ізоляції та роботи в режимі заряджання батареї доцільно обрати структуру з вхідним PFC-каскадом і ізольованим резонансним LLC DC/DC-перетворювачем. Така топологія добре відповідає задачі односпрямованого бортового зарядного пристрою, оскільки дозволяє забезпечити ефективне перетворення енергії від мережі до батареї, зменшити комутаційні втрати та спростити тепловий режим силових елементів. У межах цієї роботи основна увага приділяється саме заряджанню батареї від мережі, тому застосування односпрямованої схеми є достатнім і технічно обґрунтованим.

Вибрана структурна схема має два основні силові каскади. Перший каскад виконує випрямлення змінної напруги мережі та корекцію коефіцієнта потужності. Другий каскад виконує ізольоване перетворення постійної напруги проміжної ланки у регульовану напругу заряджання батареї. Такий поділ функцій дозволяє окремо керувати якістю споживання енергії з мережі та параметрами заряджання батареї.

Таблиця 2.3 – Функціональні блоки вибраної структурної схеми ОВС

Блок структурної схеми	Основне призначення
Зарядний роз'єм	Забезпечує фізичне підключення електромобіля до зовнішнього зарядного обладнання
Вхідний захист	Захищає пристрій від перенапруги, короткого замикання та помилкових режимів підключення
ЕМП-фільтр	Зменшує електромагнітні завади та покращує сумісність із мережею
PFC-каскад	Забезпечує випрямлення напруги, високий коефіцієнт потужності та стабілізацію DC-ланки
Проміжна DC-ланка	Згладжує пульсації та створює енергетичний буфер між каскадами
Ізольований LLC DC/DC-перетворювач	Перетворює напругу DC-ланки до рівня батареї та забезпечує гальванічну ізоляцію
Вихідний фільтр	Зменшує пульсації зарядного струму і напруги на вході батареї
Датчики струму і напруги	Забезпечують вимірювання параметрів для системи керування та захисту
Мікроконтролер ОВС	Реалізує алгоритми керування PFC, DC/DC-каскадом і зарядним процесом
Інтерфейс із BMS	Забезпечує обмін даними про SOC, температуру, допустимий струм і напругу
Система охолодження	Відводить тепло від силових компонентів і підтримує допустимий температурний режим
Система захисту	Виявляє аварійні режими та переводить пристрій у безпечний стан

Важливою перевагою вибраної структури є можливість реалізації керованого заряджання. Мікроконтролер бортового зарядного пристрою отримує інформацію про допустимий зарядний струм від BMS, про максимально доступний струм від зарядного обладнання EVSE, а також дані від власних датчиків температури, струму і напруги. На основі цих даних формується задане значення зарядного струму, яке реалізується через керування вихідним DC/DC-перетворювачем. Якщо батарея наближається до верхньої межі напруги, пристрій переходить із режиму стабілізації струму до режиму стабілізації напруги. Якщо температура батареї або силових елементів зростає понад допустиме значення, зарядний струм зменшується або заряджання припиняється.

2.3 Розрахунок основних електричних параметрів силової частини

Розрахунок основних електричних параметрів силової частини бортового зарядного пристрою виконується на основі вихідних даних, прийнятих у попередньому підрозділі. У роботі розглядається бортовий зарядний пристрій потужністю 11 кВт, призначений для заряджання тягової акумуляторної батареї електромобіля номінальною напругою 400 В від трифазної мережі змінного струму 3×400 В частотою 50 Гц. Основною задачею розрахунку є визначення струмових і напругових навантажень у силових колах пристрою, параметрів проміжної DC-ланки, орієнтовних втрат потужності та вимог до вибору силових компонентів. Ці параметри необхідні для подальшого вибору напівпровідникових ключів, конденсаторів, дроселів, трансформатора, провідників, запобіжників і системи охолодження. Вихідними для розрахунку приймаються параметри в таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 – Вихідні дані для розрахунку силової частини бортового зарядного пристрою

Параметр	Позначення	Значення
Номінальна потужність заряджання	P_{ch}	11 кВт
Номінальна напруга батареї	U_b	400 В
Мінімальна напруга батареї	$U_{b.min}$	300 В
Максимальна напруга батареї	$U_{b.max}$	450 В
Вхідна напруга мережі	U_{LL}	400 В
Частота мережі	f	50 Гц
Очікуваний ККД	η	0,94
Коефіцієнт потужності	$\cos\varphi$	0,95
Прийнята напруга DC-ланки	U_{dc}	700 В

Насамперед визначається зарядний струм на виході бортового зарядного пристрою. За номінальної напруги батареї 400 В і потужності заряджання 11 кВт струм становить:

$$I_{ch} = \frac{P_{ch}}{U_b} \quad (2.4)$$

$$I_{ch} = \frac{11000}{400} = 27,5 \text{ А}$$

Отже, у номінальному режимі бортовий зарядний пристрій повинен забезпечувати зарядний струм приблизно 27,5 А. Однак під час заряджання напруга батареї змінюється. На початковому етапі, коли напруга батареї може бути нижчою, для передавання тієї ж потужності потрібен більший струм. За мінімальної напруги батареї 300 В максимальний розрахунковий зарядний струм дорівнює:

$$I_{ch.max} = \frac{P_{ch}}{U_{b.min}} \quad (2.5)$$

$$I_{ch.max} = \frac{11000}{300} = 36,7 \text{ А}$$

З урахуванням запасу за струмом для подальшого вибору силових елементів, датчиків і провідників доцільно прийняти максимальний вихідний струм бортового зарядного пристрою на рівні 40 А. Такий запас дозволяє врахувати короткочасні перехідні процеси, похибки вимірювання, пульсації струму та можливі відхилення параметрів батареї.

Далі визначається вхідна потужність, яку зарядний пристрій споживає з електромережі. Оскільки частина енергії втрачається в силових напівпровідникових елементах, магнітних компонентах, фільтрах і провідниках, вхідна потужність буде більшою за вихідну. Її можна визначити за формулою:

$$P_{in} = \frac{P_{ch}}{\eta} \quad (2.6)$$

$$P_{in} = \frac{11000}{0,94} = 11702 \text{ Вт}$$

Таким чином, для забезпечення вихідної зарядної потужності 11 кВт пристрій повинен споживати з мережі приблизно 11,7 кВт. Різниця між вхідною та вихідною потужністю становить втрати у зарядному пристрої:

$$P_{loss} = P_{in} - P_{ch} \quad (2.7)$$

$$P_{loss} = 11702 - 11000 = 702 \text{ Вт}$$

Отримане значення показує, що при ККД 94% у силовій частині зарядного пристрою виділяється близько 700 Вт теплової потужності. Це достатньо суттєве значення, тому для ОВС потужністю 11 кВт необхідно передбачити ефективну систему тепловідведення.

Орієнтовний вхідний струм однієї фази для трифазної мережі визначається за формулою:

$$I_{in} = \frac{P_{ch}}{\sqrt{3} \cdot U_{LL} \cdot \eta \cdot \cos\varphi} \quad (2.8)$$

$$I_{in} = \frac{11000}{1,732 \cdot 400 \cdot 0,94 \cdot 0,95} = 17,8 \text{ А}$$

Отже, при номінальній потужності заряджання вхідний струм становить приблизно 18 А на фазу. Для практичного вибору елементів вхідного кола необхідно враховувати запас за струмом, тому вхідні провідники, запобіжники,

контактори, елементи ЕМІ-фільтра та силові ключі PFC-каскаду доцільно обирати на струм не менше 20–25 А.

Важливим елементом силової частини є проміжна ланка постійного струму. Вона розміщується між вхідним PFC-каскадом і ізольованим DC/DC-перетворювачем та виконує функцію енергетичного буфера [11]. Для трифазної мережі 400 В після активного випрямлення та корекції коефіцієнта потужності доцільно прийняти напругу DC-ланки на рівні 700 В. Таке значення забезпечує достатній запас для стабільної роботи DC/DC-перетворювача в усьому діапазоні напруги батареї 300–450 В. Ємність конденсаторів DC-ланки повинна бути достатньою для згладжування пульсацій напруги та забезпечення стабільної роботи силового перетворювача. Орієнтовно її можна визначити за залежністю:

$$C_{dc} = \frac{P_{ch}}{2 \cdot f_r \cdot U_{dc} \cdot \Delta U_{dc}} \quad (2.9)$$

де C_{dc} – ємність конденсаторів DC-ланки, Ф; P_{ch} – потужність заряджання, Вт; f_r – частота пульсацій, Гц; U_{dc} – напруга проміжної ланки, В; ΔU_{dc} – допустима амплітуда пульсацій напруги, В.

Для трифазного випрямлення частота пульсацій основної складової становить 300 Гц. Приймаємо допустимі пульсації напруги DC-ланки на рівні 5% від 700 В:

$$\Delta U_{dc} = 0,05 \cdot 700 = 35 \text{ В}$$

Тоді орієнтовна ємність DC-ланки становитиме:

$$C_{dc} = \frac{11000}{2 \cdot 300 \cdot 700 \cdot 35} = 0,000748 \text{ Ф} = 748 \text{ мкФ}$$

З урахуванням запасу та реальних умов роботи доцільно прийняти сумарну ємність конденсаторів проміжної ланки на рівні 800–1000 мкФ із робочою напругою не нижче 800 В. У практичній реалізації така ємність може бути набрана декількома конденсаторами, з'єднаними паралельно або послідовно-паралельно, що дозволяє забезпечити необхідну напругу, допустимий струм пульсацій і теплову стійкість.



Рисунок 2.3 – Розрахункова структура силової частини бортового зарядного пристрою

Наступним етапом є оцінка параметрів вихідного фільтра. Його основним завданням є зменшення пульсацій зарядного струму, які виникають унаслідок високочастотної роботи DC/DC-перетворювача. Для тягової акумуляторної

батареї надмірні пульсації струму є небажаними, оскільки вони можуть збільшувати теплове навантаження на акумуляторні елементи та створювати додаткові електромагнітні завади. У розрахунку приймаємо допустиму пульсацію зарядного струму на рівні 10% від максимального струму:

$$\begin{aligned}\Delta I_{out} &= 0,1 \cdot I_{out.max} \\ \Delta I_{out} &= 0,1 \cdot 40 = 4 \text{ А}\end{aligned}\quad (2.10)$$

Отже, вихідний фільтр повинен забезпечувати згладжування зарядного струму так, щоб амплітуда його пульсацій не перевищувала приблизно 4 А. У практичній реалізації параметри вихідного дроселя та конденсатора залежать від частоти перемикання DC/DC-перетворювача, обраної топології, режиму керування та допустимого рівня електромагнітних завад. Для попереднього проектування можна прийняти, що вихідний фільтр повинен бути розрахований на постійний струм не менше 40 А і напругу не менше 450 В.

Окремо необхідно оцінити вимоги до силових напівпровідникових елементів. У PFC-каскаді ключі та діоди повинні витримувати напругу DC-ланки, яка приймається на рівні 700 В. З урахуванням комутаційних перенапруг і необхідного запасу за напругою доцільно застосовувати силові елементи з допустимою напругою не нижче 900–1200 В. Для DC/DC-перетворювача вимоги до напруги ключів також визначаються рівнем DC-ланки та особливостями топології. З огляду на це для високовольтної частини ОВС доцільно використовувати напівпровідникові елементи класу 1200 В.

Струмове навантаження силових елементів визначається потужністю пристрою та режимом роботи. На вході пристрою розрахунковий струм становить близько 18 А на фазу, а на виході максимальний зарядний струм досягає 40 А. Тому силові ключі, діоди, дроселі, трансформаторні обмотки та провідники повинні мати запас за струмом. Для попереднього проектування можна прийняти коефіцієнт запасу 1,25–1,5. У такому разі елементи вихідного кола доцільно розраховувати на струм не менше 50–60 А.

Таблиця 2.5 – Вимоги до елементів силової частини

Елемент силової частини	Основний розрахунковий параметр	Рекомендоване значення з урахуванням запасу
Вхідні провідники та захист	Струм однієї фази 17,8 А	не менше 20–25 А
Ключі PFC-каскаду	Напруга DC-ланки 700 В	клас напруги 900–1200 В
Конденсатори DC-ланки	700 В, 748 мкФ	800–1000 мкФ, не нижче 800 В
Ключі DC/DC-перетворювача	Напруга DC-ланки 700 В	клас напруги 900–1200 В
Вихідний фільтр	Струм до 40 А, напруга до 450 В	не менше 50 А, не менше 500 В

Датчик вихідного струму	Максимальний струм 40 А	діапазон вимірювання 0–50 А або 0–60 А
Вихідні контактори	Максимальний зарядний струм 40 А	не менше 50–60 А при напрузі до 500 В

Під час проектування силової частини важливо також оцінити теплове навантаження [12]. Раніше було визначено, що сумарні втрати потужності при ККД 94% становлять приблизно 702 Вт. Якщо прийняти, що частина цих втрат припадає на PFC-каскад, частина – на DC/DC-перетворювач, а частина – на магнітні компоненти та провідники, то кожен із цих вузлів потребує організованого тепловідведення. Для пристрою потужністю 11 кВт природного охолодження зазвичай недостатньо, тому доцільно передбачити примусове повітряне або рідинне охолодження залежно від конструкції електромобіля. Орієнтовний розподіл втрат можна прийняти таким: 35% втрат припадає на PFC-каскад, 45% – на DC/DC-перетворювач, 10% – на магнітні елементи, 10% – на провідники, фільтри та допоміжні кола. Тоді втрати в основних вузлах становитимуть:

$$P_{PFC} = 0,35 \cdot 702 = 246 \text{ Вт}$$

$$P_{DCDC} = 0,45 \cdot 702 = 316 \text{ Вт}$$

$$P_{mag} = 0,10 \cdot 702 = 70 \text{ Вт}$$

$$P_{aux} = 0,10 \cdot 702 = 70 \text{ Вт}$$

Результати виконаного розрахунку показують, що для заряджання тягової акумуляторної батареї номінальною напругою 400 В бортовий зарядний пристрій потужністю 11 кВт повинен забезпечувати номінальний зарядний струм 27,5 А і максимальний струм до 40 А при зниженій напрузі батареї. При живленні від трифазної мережі 400 В вхідний струм становить приблизно 18 А на фазу. Напруга проміжної DC-ланки приймається на рівні 700 В, а її орієнтовна ємність повинна становити не менше 748 мкФ, тому з урахуванням запасу доцільно прийняти 800–1000 мкФ. Сумарні втрати потужності при ККД 94% становлять приблизно 700 Вт, що обумовлює необхідність ефективної системи охолодження та контролю температури.

2.4 Розрахунок режимів заряджання тягової акумуляторної батареї

Розрахунок режимів заряджання тягової акумуляторної батареї необхідний для визначення того, як змінюються зарядний струм, напруга, потужність і тривалість процесу заряджання під час роботи бортового зарядного пристрою [13]. На відміну від простого електричного навантаження, акумуляторна батарея не може заряджатися з довільними параметрами. Її зарядний режим повинен відповідати електрохімічним особливостям акумуляторних елементів, допустимим межам напруги, струму, температури та вимогам системи керування батареєю. Тому бортовий зарядний пристрій має не лише передавати енергію до

батареї, а й забезпечувати регульований процес заряджання відповідно до поточного стану батареї.

У межах цієї роботи розглядається заряджання тягової акумуляторної батареї номінальною енергоємністю 60 кВт·год і номінальною напругою 400 В за допомогою бортового зарядного пристрою потужністю 11 кВт. Діапазон робочої напруги батареї приймається від 300 до 450 В. Заряджання виконується за профілем постійного струму і постійної напруги, який є основним для літій-іонних тягових акумуляторних батарей. На першому етапі бортовий зарядний пристрій підтримує зарядний струм на заданому рівні, а напруга батареї поступово зростає. Після досягнення верхньої допустимої напруги зарядний пристрій переходить до режиму стабілізації напруги, при якому зарядний струм поступово зменшується. Для попереднього розрахунку приймається, що заряджання виконується у найбільш практично важливому діапазоні від 20 до 80% SOC.

Кількість енергії, яку необхідно передати до батареї під час заряджання в заданому діапазоні SOC, визначається за формулою:

$$E_{ch} = E_b \cdot \Delta SOC \quad (2.11)$$

де E_{ch} – енергія, яку необхідно передати до батареї, кВт·год; E_b – повна енергоємність батареї, кВт·год; ΔSOC – зміна рівня заряду батареї у відносних одиницях.

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

$$\Delta SOC = 0,8 - 0,2 = 0,6$$

$$E_{ch} = 60 \cdot 0,6 = 36 \text{ кВт}\backslash\text{год}$$

Отже, для заряджання батареї від 20 до 80% необхідно передати до неї приблизно 36 кВт·год електричної енергії. З урахуванням втрат у бортовому зарядному пристрої кількість енергії, спожитої з мережі, буде більшою. Якщо коефіцієнт корисної дії зарядного пристрою приймається на рівні 0,94, тоді енергія, спожита з мережі, становитиме:

$$E_{grid} = \frac{E_{ch}}{\eta} \quad (2.12)$$

$$E_{grid} = \frac{36}{0,94} = 38,3 \text{ кВт}\backslash\text{год}$$

Це означає, що для фактичного поповнення заряду батареї на 36 кВт·год електромобіль споживає з мережі приблизно 38,3 кВт·год. Різниця між цими значеннями становить втрати енергії у силових перетворювачах, фільтрах, провідниках і допоміжних колах бортового зарядного пристрою.

Орієнтовна тривалість заряджання визначається за формулою:

$$t_{ch} = \frac{E_{ch}}{P_{ch}} \quad (2.13)$$

де t_{ch} – час заряджання, год; E_{ch} – енергія, що передається до батареї, кВт·год; P_{ch} – зарядна потужність, кВт.

Для заряджання від 20 до 80% при потужності 11 кВт:

$$t_{ch} = \frac{36}{11} = 3,27 \text{ год}$$

Якщо врахувати, що частина процесу заряджання може відбуватися зі зниженою потужністю, особливо при наближенні до 80% SOC або за наявності температурних обмежень, практичний час заряджання доцільно прийняти на рівні 3,4–3,6 год. Такий результат показує, що бортовий зарядний пристрій потужністю 11 кВт забезпечує достатньо зручний режим щоденного заряджання електромобіля середнього класу.

Таблиця 2.6 – Розрахунок енергії та часу заряджання батареї в різних діапазонах SOC

Діапазон заряджання	Зміна SOC	Енергія, передана до батареї	Енергія, спожита з мережі при $\eta = 0,94$	Орієнтовний час при 11 кВт
20–80%	0,60	36 кВт·год	38,3 кВт·год	3,3–3,6 год
10–80%	0,70	42 кВт·год	44,7 кВт·год	3,8–4,1 год
10–90%	0,80	48 кВт·год	51,1 кВт·год	4,4–4,8 год
0–100%	1,00	60 кВт·год	63,8 кВт·год	5,5–6,5 год

Наведені значення є орієнтовними, оскільки реальний час заряджання залежить від температури батареї, допустимого струму за даними BMS, рівня напруги батареї, обмежень зарядної точки та алгоритму завершення заряджання. Особливо це стосується діапазону 80–100% SOC, де зарядна потужність поступово зменшується через перехід до режиму стабілізації напруги. Тому повне заряджання до 100% завжди триває непропорційно довше, ніж заряджання в середньому діапазоні SOC.

Для оцінки зарядного струму в різних точках процесу заряджання використовується залежність:

$$I_{ch} = \frac{P_{ch}}{U_b} \quad (2.14)$$

де I_{ch} – зарядний струм, А; P_{ch} – зарядна потужність, Вт; U_b – поточна напруга батареї, В.

Оскільки напруга батареї під час заряджання змінюється від нижчого до вищого значення, при сталій потужності зарядний струм буде зменшуватися зі зростанням напруги. Для прийнятого діапазону напруги батареї 300–450 В можна визначити характерні значення зарядного струму.

Таблиця 2.7 – Зарядний струм при різній нарузі батареї та потужності 11 кВт

Напруга батареї	Зарядна потужність	Розрахунковий зарядний струм
300 В	11 кВт	36,7 А
350 В	11 кВт	31,4 А
400 В	11 кВт	27,5 А
450 В	11 кВт	24,4 А

З таблиці видно, що найбільший зарядний струм виникає на початковому етапі заряджання, коли напруга батареї є найнижчою. Саме цей режим є визначальним для вибору вихідних силових елементів, провідників, датчиків струму та системи захисту. У попередньому підрозділі для розрахунку було прийнято максимальний вихідний струм 40 А, що забезпечує необхідний запас відносно розрахункового значення 36,7 А.

У режимі постійного струму бортовий зарядний пристрій підтримує зарядний струм на заданому рівні, який визначається не лише номінальною потужністю пристрою, а й обмеженнями системи BMS та зовнішньої зарядної інфраструктури. Для батареї напругою 400 В і потужності 11 кВт номінальний зарядний струм становить 27,5 А. Якщо BMS дозволяє такий струм, а температура батареї перебуває в допустимих межах, зарядний пристрій може працювати в номінальному режимі. Якщо ж батарея холодна, перегріта або має високий рівень заряду, допустимий струм зменшується.

На завершальному етапі заряджання пристрій переходить до режиму постійної напруги. Для розрахункової батареї верхню межу напруги прийнято на рівні 450 В. У цьому режимі бортовий зарядний пристрій підтримує напругу на рівні:

$$U_{CV} = U_{b.max} = 450 \text{ В}$$

При цьому зарядний струм поступово зменшується. Завершення заряджання може відбуватися тоді, коли струм знижується до мінімального порогового значення, наприклад до 5–10% від максимального зарядного струму, або коли система BMS формує команду на припинення заряджання. Якщо прийняти поріг завершення заряджання на рівні 10% від максимального струму 40 А, то:

$$\begin{aligned} I_{end} &= 0,1 \cdot I_{out.max} \\ I_{end} &= 0,1 \cdot 40 = 4 \text{ А} \end{aligned} \quad (2.15)$$

Отже, заряджання можна вважати завершеним, коли у режимі стабілізації напруги зарядний струм зменшується приблизно до 4 А або коли BMS визначає досягнення потрібного рівня заряду.

Режим керованого заряджання передбачає, що фактичний зарядний струм визначається як мінімальне значення серед усіх допустимих обмежень. Це дозволяє враховувати стан батареї, обмеження бортового зарядного пристрою, можливості зарядної точки та стан електричної мережі:

$$I_{ch} = \min(I_{OBC}, I_{BMS}, I_{EVSE}, I_{grid}, I_{thermal}) \quad (2.16)$$

Якщо, наприклад, бортовий зарядний пристрій може забезпечити 40 А, але система BMS через підвищену температуру батареї дозволяє лише 22 А, фактичний зарядний струм повинен бути обмежений до 22 А. При напрузі батареї 400 В фактична зарядна потужність у такому випадку становитиме:

$$P_{ch.lim} = U_b \cdot I_{ch} \quad (2.17)$$

$$P_{ch.lim} = 400 \cdot 22 = 8800 \text{ Вт} = 8,8 \text{ кВт}$$

За такого обмеження час заряджання від 20 до 80% збільшиться:

$$t_{ch.lim} = \frac{36}{8,8} = 4,09 \text{ год}$$

Таким чином, зменшення зарядного струму через температурні або мережеві обмеження безпосередньо збільшує тривалість заряджання. Проте такий режим є необхідним для захисту батареї та забезпечення безпечної роботи всієї зарядної системи.

Температура батареї є одним із ключових факторів, що впливає на допустимий зарядний струм [14]. При низькій температурі батарея гірше приймає заряд через зростання внутрішнього опору акумуляторних елементів. У такому випадку BMS повинна обмежити зарядний струм або активувати попередній підігрів батареї. При підвищеній температурі зарядний струм також обмежується, оскільки подальше заряджання високою потужністю може прискорити деградацію батареї або призвести до небезпечного перегріву. Тому в алгоритмі заряджання доцільно передбачити температурне зниження потужності.

Таблиця 2.8 – Обмеження зарядного струму залежно від температури батареї

Температура батареї	Допустимий режим заряджання	Орієнтовне обмеження струму
Нижче 0 °C	Заряджання небажане без підігріву	0–20% від номінального струму
0–10 °C	Заряджання зі зниженим струмом	30–50% від номінального струму
10–35 °C	Нормальний режим заряджання	100% номінального струму
35–45 °C	Заряджання з обмеженням потужності	50–70% номінального струму
Понад 45 °C	Заряджання має бути припинене або суттєво обмежене	0–20% від номінального струму

Окрім температури, на режим заряджання впливає рівень SOC. У середньому діапазоні SOC батарея може приймати заряд із більшою потужністю. При наближенні до високого рівня заряду допустимий струм поступово зменшується, оскільки напруга окремих комірок наближається до максимально допустимого значення. Для керованого заряджання це означає, що зарядний пристрій повинен змінювати режим роботи не стрибкоподібно, а плавно, щоб уникнути різких змін струму та перехідних процесів.

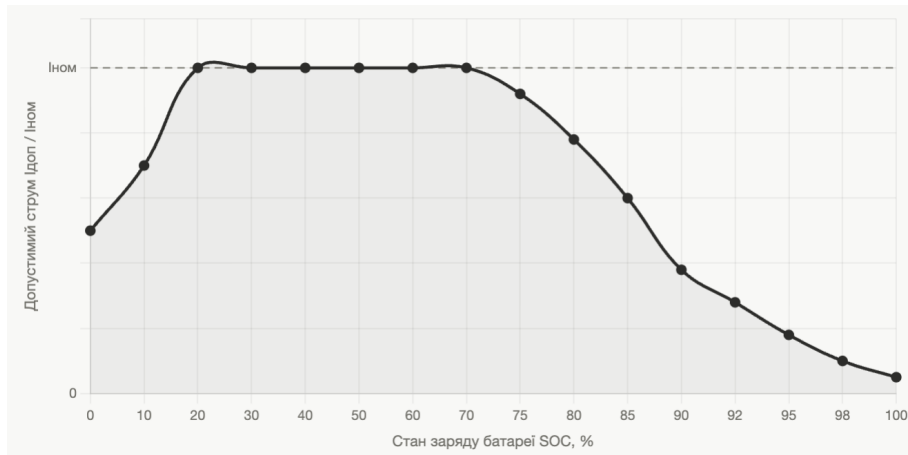


Рисунок 2.5 – Рекомендована залежність допустимого зарядного струму від SOC батареї

Для практичного алгоритму можна прийняти спрощену залежність зарядного струму від SOC, наведену в таблиці 2.9. Вона не описує конкретну хімію окремого виробника батареї, але є придатною для попереднього інженерного розрахунку та пояснення принципу керованого заряджання.

Таблиця 2.9 – Спрощений профіль обмеження зарядного струму залежно від SOC

Діапазон SOC	Режим заряджання	Відносний зарядний струм
0–20%	Попереднє заряджання або м'який старт	30–70%
20–70%	Основний режим постійного струму	100%
70–85%	Плавне зменшення струму	70–100%
85–95%	Перехід до режиму постійної напруги	30–70%
95–100%	Завершення заряджання	менше 30%

На основі виконаних розрахунків можна визначити, що для батареї ємністю 60 кВт·год бортовий зарядний пристрій потужністю 11 кВт забезпечує ефективний режим заряджання в середньому діапазоні SOC. Заряджання від 20 до 80% потребує передавання до батареї 36 кВт·год енергії та триває приблизно 3,3–3,6 год у номінальному режимі. При цьому зарядний струм змінюється залежно від напруги батареї: від 36,7 А при 300 В до 24,4 А при 450 В. Для безпечної роботи максимальний вихідний струм пристрою прийнято на рівні 40 А.

2.5 Розробка алгоритму керованого заряджання

У межах цієї роботи алгоритм керованого заряджання розробляється для бортового зарядного пристрою потужністю 11 кВт, який працює від трифазної мережі змінного струму та заряджає тягову акумуляторну батарею номінальною напругою 400 В. Основним режимом заряджання є профіль CC-CV, тобто заряджання постійним струмом із подальшим переходом до режиму постійної напруги. Водночас алгоритм повинен передбачати можливість зменшення струму при несприятливій температурі батареї, високому рівні SOC, обмеженні

потужності з боку EVSE, перегріві силових елементів або виникненні аварійних сигналів (рис. 2.6).

На першому етапі алгоритм повинен виконати перевірку факту підключення електромобіля до зовнішнього зарядного обладнання. Після підключення зарядного кабелю система повинна визначити наявність сигналів Control Pilot і Proximity Pilot, перевірити допустимий струм кабелю, стан заземлення, готовність EVSE до подачі енергії та відсутність початкових аварійних сигналів. До моменту завершення цієї перевірки силові контактори високовольтної системи не повинні замикатися, а зарядний пристрій не повинен передавати енергію до батареї.

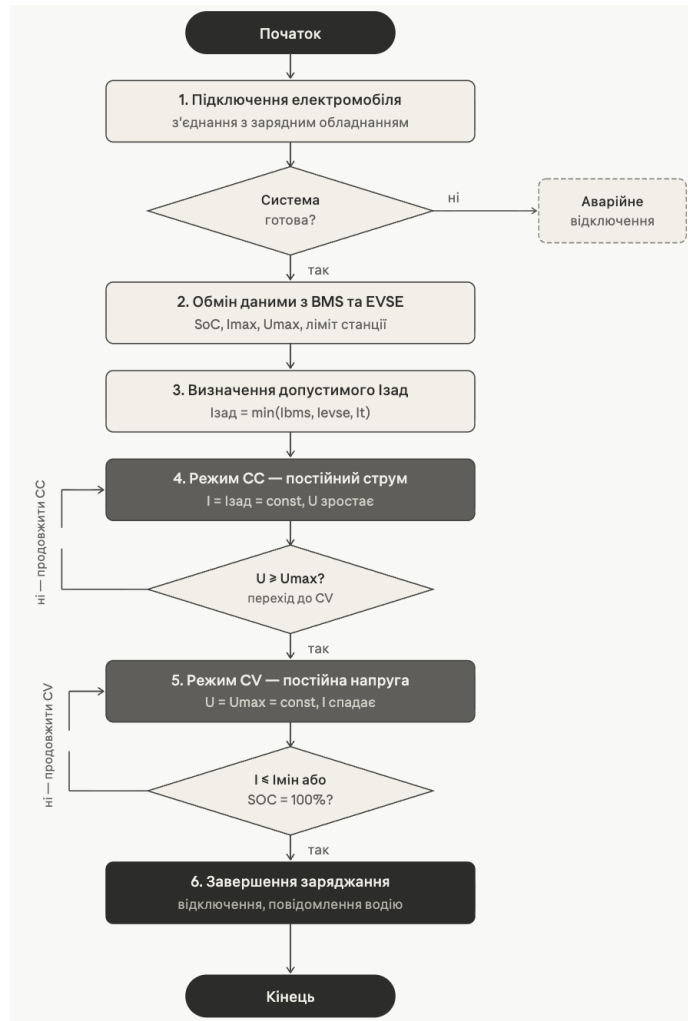


Рисунок 2.6 – Узагальнена структура алгоритму керованого заряджання тягової акумуляторної батареї

Після підтвердження правильного підключення виконується початкова діагностика бортового зарядного пристрою. На цьому етапі перевіряється стан вхідного захисту, напруга мережі, справність датчиків струму і напруги, температура силових компонентів, стан ізоляції, напруга проміжної DC-ланки та готовність мікроконтролера до керування силовими каскадами. Якщо хоча б один із контрольованих параметрів перебуває поза допустимими межами,

алгоритм повинен заблокувати запуск заряджання і сформувати відповідний сигнал несправності.

Наступним етапом є обмін даними із системою керування батареєю. BMS передає до блока керування бортового зарядного пристрою інформацію про поточний рівень заряду батареї, температуру акумуляторних модулів, максимальну допустиму напругу, максимальний зарядний струм, стан балансування комірок і наявність аварійних або попереджувальних сигналів. Ці дані є визначальними для вибору режиму заряджання, оскільки саме BMS має пріоритет у питаннях безпечної експлуатації тягової акумуляторної батареї.

Паралельно із цим зарядний пристрій повинен враховувати обмеження зовнішнього зарядного обладнання. EVSE задає максимальний струм, який може бути переданий через зарядний кабель і зарядну точку. Якщо зарядне обладнання або локальна електромережа дозволяють струм, менший за можливості самого ОВС, бортовий зарядний пристрій повинен обмежити споживання відповідно до цього значення. Такий принцип запобігає перевантаженню зарядної точки, кабелю та електромережі.

Фактичний зарядний струм визначається як мінімальне значення серед усіх допустимих обмежень:

$$I_{set} = \min(I_{OVC}, I_{BMS}, I_{EVSE}, I_{grid}, I_{thermal}) \quad (2.18)$$

де I_{set} – заданий зарядний струм; I_{OVC} – максимальний струм, який може забезпечити бортовий зарядний пристрій; I_{BMS} – струм, дозволений системою керування батареєю; I_{EVSE} – струм, дозволений зарядним обладнанням; I_{grid} – струм, допустимий з урахуванням стану електромережі; $I_{thermal}$ – струм, обмежений тепловим станом батареї або силових елементів зарядного пристрою.

Після визначення допустимого зарядного струму алгоритм запускає режим постійного струму. У цьому режимі бортовий зарядний пристрій підтримує заданий струм I_{set} , а напруга батареї поступово зростає. Контур керування DC/DC-перетворювачем повинен забезпечувати плавне наростання струму, щоб уникнути різких перехідних процесів, стрибків напруги та надмірного навантаження на акумуляторні елементи. Для цього доцільно передбачити м'який старт, при якому зарядний струм збільшується від нуля до заданого значення протягом короткого контрольованого інтервалу часу.

У процесі заряджання алгоритм повинен безперервно контролювати напругу батареї. Коли напруга досягає верхнього допустимого значення, прийнятого для розрахункової батареї на рівні 450 В, зарядний пристрій переходить із режиму постійного струму до режиму постійної напруги. У цьому режимі вихідна напруга підтримується сталою, а зарядний струм поступово зменшується. Такий перехід є необхідним для запобігання перезарядженню акумуляторних елементів і забезпечення безпечного завершення зарядного процесу.

Умову переходу до режиму постійної напруги можна подати так:

$$U_b \geq U_{CV} \quad (2.19)$$

де U_b – поточна напруга батареї; U_{CV} – гранична напруга переходу до режиму постійної напруги.

Для прийнятих вихідних даних:

$$U_{CV} = 450 \text{ В}$$

Після переходу до режиму CV зарядний струм поступово зменшується. Заряджання вважається завершеним, коли струм знижується до встановленого мінімального значення або коли BMS подає команду завершення заряджання. У попередньому підрозділі було прийнято, що поріг завершення може становити 10% від максимального струму 40 А, тобто приблизно 4 А:

$$I_{end} = 0,1 \cdot I_{out.max} = 4 \text{ А}$$

Отже, алгоритм може завершувати заряджання за умовою:

$$I_{ch} \leq I_{end} \quad (2.20)$$

або за командою BMS, якщо система керування батареєю визначає, що батарея досягла заданого рівня заряду або потребує припинення заряджання з інших причин.

Особливістю керованого заряджання є необхідність постійного перерахунку заданого струму. Наприклад, якщо на початку заряджання батарея перебуває в нормальному температурному діапазоні та має SOC 30%, зарядний пристрій може працювати з номінальною потужністю. Якщо під час заряджання температура батареї підвищується або SOC наближається до 80–90%, BMS може зменшити допустимий струм. У такому випадку ОВС повинен плавно знизити зарядну потужність, не перериваючи процес, якщо аварійних умов немає. Для реалізації такого принципу в алгоритмі доцільно використовувати періодичне оновлення заданого струму:

$$I_{set}(t) = \min(I_{OBC}(t), I_{BMS}(t), I_{EVSE}(t), I_{grid}(t), I_{thermal}(t)) \quad (2.21)$$

Тут усі обмеження розглядаються як функції часу, оскільки вони можуть змінюватися в процесі заряджання. Наприклад, I_{BMS} може зменшуватися при зростанні SOC або температури батареї, I_{EVSE} може змінюватися при динамічному розподілі потужності між кількома електромобілями, а $I_{thermal}$ може зменшуватися при перегріві силових компонентів зарядного пристрою.

Аварійний режим є обов'язковою частиною алгоритму керованого заряджання. До умов аварійного припинення заряджання належать перевищення максимальної напруги батареї, перевищення допустимого зарядного струму, перегрів батареї або силових елементів, різке падіння напруги мережі, перенапруга в DC-ланці, коротке замикання, втрата ізоляції, несправність датчиків, втрата зв'язку з BMS або некоректний стан сигналів зарядного обладнання. У разі виникнення таких умов зарядний пристрій повинен негайно

зменшити струм до нуля, вимкнути силові ключі, розімкнути контактори за встановленою послідовністю та сформувати код помилки для діагностики.

У запропонованому алгоритмі важливим є принцип пріоритету безпеки. Це означає, що за будь-якого конфлікту між бажаною швидкістю заряджання та обмеженнями безпеки перевага надається безпечному режиму. Наприклад, якщо користувач задав швидке завершення заряджання, але батарея має підвищену температуру, зарядний пристрій повинен зменшити струм, навіть якщо це збільшить тривалість процесу.

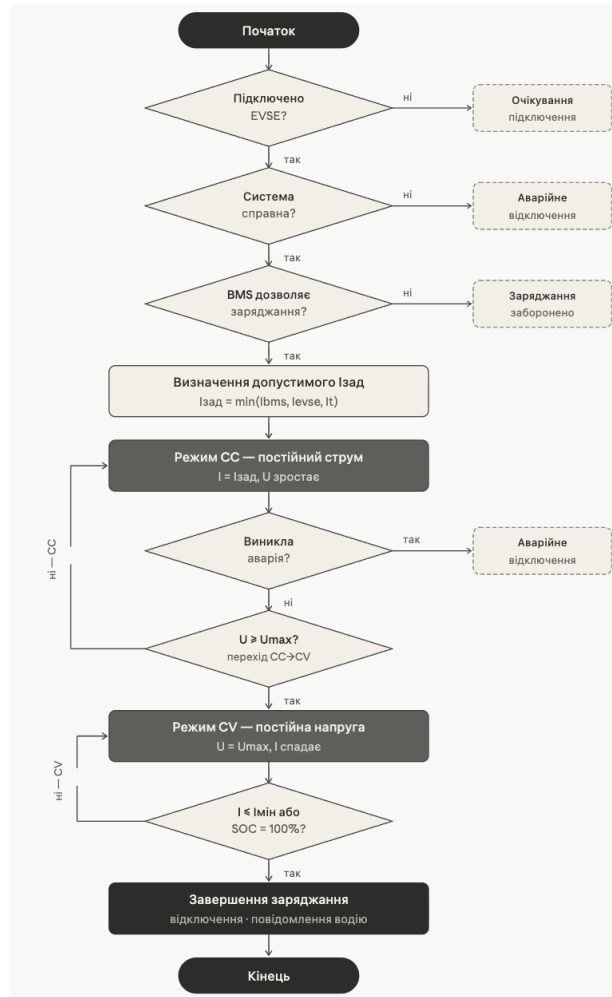


Рисунок 2.7 – Блок-схема алгоритму роботи бортового зарядного пристрою в режимі керованого заряджання

Алгоритм керованого заряджання також повинен забезпечувати роботу в режимі часткового навантаження. Це важливо, оскільки реальна зарядна потужність може бути нижчою за номінальні 11 кВт. Причинами можуть бути обмеження домашньої мережі, робота кількох електромобілів від однієї зарядної інфраструктури, висока температура силових елементів або бажання користувача заряджати батарею повільніше для зменшення її деградації. Тому ОВС повинен стабільно працювати не лише в номінальному режимі, але й при зниженій потужності, наприклад 3,7 кВт, 5,5 кВт або 7,4 кВт.

3 КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

3.1 Розробка структурної схеми бортового зарядного пристрою

Бортовий зарядний пристрій електромобіля призначений для перетворення електричної енергії, що надходить від зовнішньої мережі змінного струму, у постійний струм із параметрами, необхідними для заряджання тягової акумуляторної батареї. Для розрахункового варіанта приймається пристрій потужністю 11 кВт, який працює від трифазної мережі 3×400 В і забезпечує заряджання батареї номінальною напругою 400 В у діапазоні 300–450 В. З урахуванням цих параметрів структурна схема повинна забезпечувати стабільну роботу силової частини, контроль зарядного струму і напруги, взаємодію з BMS та безпечне відключення у разі виникнення аварійних режимів.

Загальна структурна схема бортового зарядного пристрою складається з декількох основних функціональних груп. До першої групи належать вхідні елементи, які забезпечують підключення пристрою до зарядної інфраструктури та захист від небезпечних режимів з боку мережі. До другої групи належить силова перетворювальна частина, яка виконує випрямлення, корекцію коефіцієнта потужності, стабілізацію проміжної напруги та перетворення її до рівня тягової батареї. Третя група включає вимірювальні, керуючі та комунікаційні елементи. Четверта група охоплює систему захисту, охолодження та діагностики.

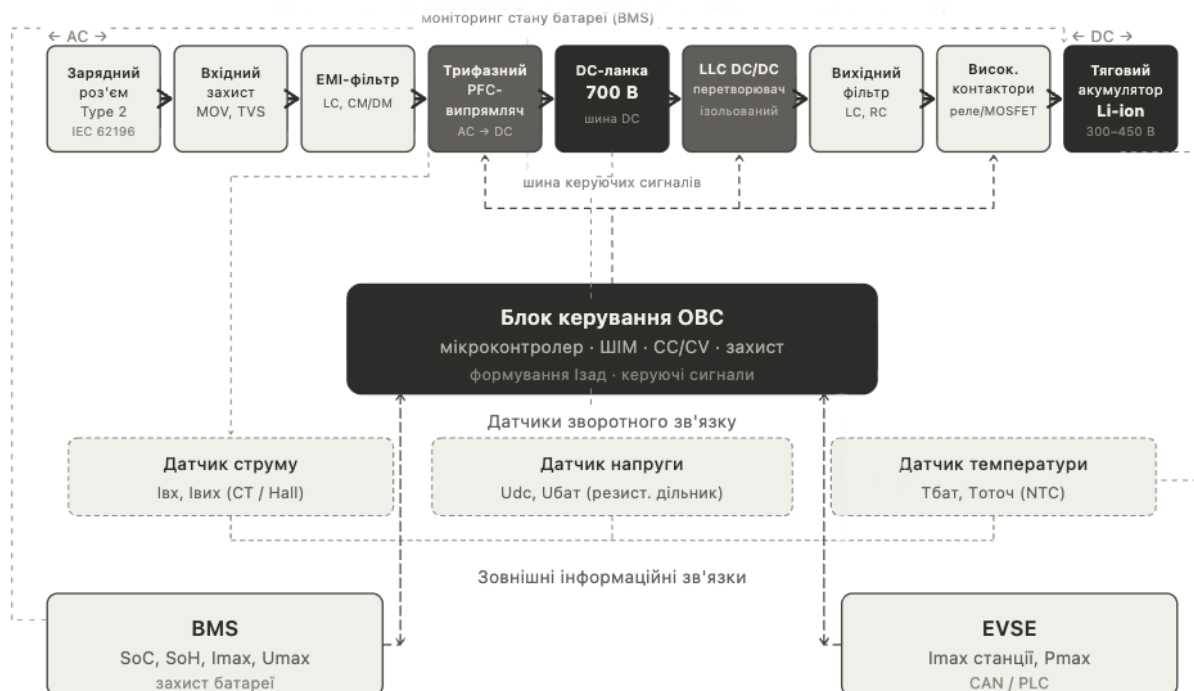


Рисунок 3.1 – Структурна схема бортового зарядного пристрою електромобіля

Першим елементом структурної схеми є зарядний роз'єм, через який електромобіль підключається до зовнішнього зарядного обладнання змінного струму. Для європейської практики найбільш типовим є застосування роз'єму

Type 2, який підтримує однофазне і трифазне АС-зарядження. Через цей роз'єм до автомобіля передаються силові провідники, захисний провідник, а також сигнальні лінії Control Pilot і Proximity Pilot. Силові контакти забезпечують передавання енергії, а сигнальні лінії використовуються для визначення факту підключення, допустимого струму зарядного кабелю та готовності зарядного обладнання до роботи.

Після зарядного роз'єму встановлюється блок вхідного захисту. Його завдання полягає у захисті зарядного пристрою від перенапруги, короткого замикання, імпульсних завад, неправильного підключення та аварійних режимів у зовнішній мережі. До складу цього блока доцільно включити плавкі запобіжники або автоматичні захисні елементи, варистори для обмеження перенапруг, контактор або силове реле для комутації живлення, а також ланцюг попереднього заряду конденсаторів проміжної DC-ланки. Попередній заряд потрібний для зменшення пускового струму, який може виникнути під час підключення розряджених конденсаторів до випрямляча.

Наступним блоком є вхідний ЕМІ-фільтр. Його застосування є необхідним через імпульсний характер роботи силових перетворювачів. Без відповідної фільтрації високочастотні завади можуть проникати в електромережу або впливати на інші електронні системи електромобіля. ЕМІ-фільтр повинен зменшувати як диференційні, так і синфазні завади. Для бортового зарядного пристрою потужністю 11 кВт фільтр повинен бути розрахований на вхідний струм не менше 20–25 А на фазу з урахуванням запасу.

Основним вхідним силовим каскадом є трифазний випрямляч із корекцією коефіцієнта потужності. Він виконує перетворення змінної напруги мережі у постійну напругу проміжної ланки та забезпечує якісне споживання струму з мережі. На відміну від простого діодного випрямляча, активний PFC-каскад дозволяє сформуванню вхідний струм, близький до синусоїдального, і зменшити реактивну складову потужності.

Після PFC-каскаду розташовується проміжна ланка постійного струму. У прийнятому розрахунковому варіанті її напруга становить приблизно 700 В. DC-ланка виконує роль енергетичного буфера між вхідним і вихідним перетворювальними каскадами, згладжує пульсації та забезпечує стабільне живлення DC/DC-перетворювача. До складу проміжної ланки входять високовольтні конденсатори, балансувальні резистори, коло попереднього заряду та датчик напруги. За результатами розрахунку сумарна ємність DC-ланки повинна становити орієнтовно 800–1000 мкФ при робочій напрузі не нижче 800 В.

Вихідним силовим каскадом є ізольований LLC DC/DC-перетворювач. Його функція полягає у перетворенні напруги проміжної ланки до регульованої напруги зарядження батареї в діапазоні 300–450 В. Важливою перевагою LLC-перетворювача є можливість роботи з м'яким перемиканням силових ключів, що

зменшує комутаційні втрати та підвищує ККД. Крім того, наявність височастотного трансформатора забезпечує гальванічну ізоляцію між мережею змінного струму та високовольтною батареєю, що є необхідною умовою електробезпеки.

Після DC/DC-перетворювача встановлюється вихідний фільтр. Його призначенням є згладжування пульсацій зарядного струму і напруги перед подачею енергії до тягової акумуляторної батареї. Надмірні пульсації зарядного струму можуть негативно впливати на акумуляторні елементи, підвищувати їх теплове навантаження та створювати додаткові електромагнітні завади. Тому вихідний фільтр повинен бути розрахований на максимальний струм до 40 А і напругу до 450 В із відповідним запасом.

Між вихідним каскадом зарядного пристрою та тяговою акумуляторною батареєю розташовуються високовольтні контактори та елементи захисту. Контактори забезпечують підключення або відключення батареї від зарядного пристрою за командою BMS або блока керування ОВС. У разі виникнення аварійного режиму контактори повинні розімкнути силове коло та припинити передавання енергії. Для безпечної роботи контакторів необхідно передбачити правильну послідовність їх увімкнення та вимкнення, а також контроль залипання контактів.

Керування бортовим зарядним пристроєм виконується електронним блоком керування, який отримує сигнали від датчиків і формує керуючі імпульси для силових ключів. До основних вхідних сигналів належать напруга мережі, струм фаз, напруга DC-ланки, вихідна напруга, зарядний струм, температура силових ключів, температура трансформатора, стан зарядного кабелю та сигнали від BMS. На основі цих даних блок керування визначає поточний режим роботи, підтримує необхідний зарядний струм або напругу та реалізує обмеження при небезпечних або граничних умовах.



Рисунок 3.2 – Силові та інформаційні зв'язки в структурі бортового зарядного пристрою

Для забезпечення керованого заряджання структурна схема повинна передбачати можливість регулювання вихідного струму в реальному часі.

Фактичне задане значення струму формується з урахуванням обмежень бортового зарядного пристрою, BMS, EVSE, електромережі та теплового стану силових елементів. У режимі постійного струму блок керування підтримує заданий струм на виході DC/DC-перетворювача. Після досягнення граничної напруги батареї пристрій переходить до режиму постійної напруги, у якому струм поступово зменшується до значення завершення заряджання.

Важливим елементом структурної схеми є система температурного контролю. У бортовому зарядному пристрої необхідно контролювати температуру силових ключів PFC-каскаду, ключів DC/DC-перетворювача, високочастотного трансформатора, дроселів і, за потреби, конденсаторів DC-ланки. Якщо температура одного з вузлів наближається до допустимої межі, блок керування повинен зменшити зарядну потужність. Якщо температура продовжує зростати, заряджання має бути припинене. Такий принцип дозволяє запобігти пошкодженню силових компонентів і підвищити надійність пристрою.

Система охолодження може бути повітряною або рідинною. Для пристрою потужністю 11 кВт, у якому орієнтовні втрати потужності становлять близько 700 Вт, природного охолодження недостатньо. Тому доцільно передбачити примусове охолодження з використанням вентилятора або підключення до рідинного контуру терморегулювання електромобіля. Вибір конкретного варіанта залежить від конструювання автомобіля, доступного простору, вимог до шуму, герметичності та теплового навантаження.

Захисні функції структурної схеми повинні охоплювати всі основні небезпечні режими. До них належать перевищення вхідної або вихідної напруги, перевищення зарядного струму, коротке замикання, перегрів силових елементів, втрата ізоляції, несправність датчиків, втрата зв'язку з BMS, некоректний стан зарядного кабелю та відмова системи охолодження. У разі виникнення таких умов блок керування повинен знизити потужність або повністю припинити заряджання. Для критичних несправностей необхідним є негайне вимкнення силових ключів і розмикання високовольтних контакторів.

Конструктивно бортовий зарядний пристрій повинен бути виконаний у герметизованому корпусі, придатному для роботи в умовах автомобільної експлуатації. Корпус повинен забезпечувати механічний захист, відведення тепла, електричну ізоляцію, захист від пилу і вологи, а також стійкість до вібрацій. У середині корпусу доцільно розділити силову та низьковольтну керуючу частини, щоб зменшити вплив електромагнітних завад на мікроконтролер, датчики та комунікаційні лінії.

3.2 Вибір елементної бази та основних компонентів пристрою

Вибір елементної бази бортового зарядного пристрою виконується на основі попередньо прийнятих розрахункових параметрів: номінальна потужність пристрою становить 11 кВт, вхідна мережа трифазна 3×400 В, напруга проміжної

DC-ланки – близько 700 В, діапазон вихідної напруги для заряджання тягової батареї – 300–450 В, максимальний вихідний зарядний струм – до 40 А. З урахуванням запасу силові елементи вихідного кола доцільно обирати на струм не менше 50–60 А, а напівпровідникові елементи високовольтної частини – на клас напруги 900–1200 В.

Для проєктованого зарядного пристрою доцільно застосувати компонентну базу, яка вже використовується або може використовуватися в силовій електроніці електромобілів, зарядних пристроях, інверторах, DC/DC-перетворювачах та інших високовольтних системах. Основними критеріями вибору є допустима напруга, допустимий струм, теплові характеристики, комутаційні втрати, можливість роботи на підвищеній частоті, наявність ізоляції для сигнальних і керуючих кіл, сумісність із автомобільними вимогами та доступність компонентів у серійному виробництві.

Для силових ключів PFC-каскаду та DC/DC-перетворювача обрано SiC MOSFET Wolfspeed C3M0032120K [15]. Цей транзистор має клас напруги 1200 В і опір відкритого каналу 32 мОм, що відповідає вимогам роботи з DC-ланкою близько 700 В і забезпечує достатній запас за напругою. Виконання в корпусі TO-247-4 із окремим виводом драйверного джерела є доцільним для зменшення впливу паразитних індуктивностей під час швидкого перемикавання. Для зарядного пристрою потужністю 11 кВт такий клас ключів є раціональним, оскільки дозволяє зменшити комутаційні втрати, підвищити ККД і знизити теплове навантаження на систему охолодження.

У PFC-каскаді доцільно застосувати шість транзисторів Wolfspeed C3M0032120K для реалізації трифазного активного випрямляча. Така схема дозволяє не лише випрямляти напругу мережі, але й керувати формою вхідного струму, забезпечуючи високий коефіцієнт потужності. У DC/DC-каскаді на основі LLC-перетворювача доцільно використати чотири аналогічні SiC MOSFET у повномостовій схемі первинної сторони. Для синхронного випрямлення на вторинній стороні також можуть застосовуватися SiC MOSFET або швидкодіючі діоди відповідного класу, однак для спрощення конструкції в межах цієї роботи доцільно прийняти діодний вихідний випрямляч із подальшим вихідним LC-фільтром.

Таблиця 3.1 – Вибір силових напівпровідникових елементів

Вузол пристрою	Обраний компонент	Основні параметри
PFC-каскад	Wolfspeed C3M0032120K	SiC MOSFET, 1200 В, 32 мОм, TO-247-4
Первинна сторона LLC DC/DC	Wolfspeed C3M0032120K	SiC MOSFET, 1200 В, 32 мОм
Вторинний випрямляч DC/DC	Wolfspeed C3D10065A	SiC Schottky diode, 650 В, 10 А

Альтернативний вторинної сторони	варіант	C3M0032120K синхронному випрямленні	у	1200 В SiC MOSFET
-------------------------------------	---------	--	---	-------------------

Для керування силовими SiC MOSFET обрано ізолюваний драйвер Texas Instruments UCC21750-Q1 [16]. Цей драйвер призначений для керування SiC MOSFET та IGBT, має посилену ізоляцію 5,7 кВ RMS, піковий струм керування до ± 10 А, високу стійкість до синфазних перешкод і захисні функції, зокрема швидкий DESAT-захист. Такі характеристики є важливими для високовольтного бортового зарядного пристрою, оскільки силові ключі працюють із напругою DC-ланки близько 700 В і високими швидкостями перемикання.

Для цифрового керування зарядним пристроєм доцільно використати мікроконтролер Texas Instruments TMS320F28379D із сімейства C2000 [17]. Цей контролер орієнтований на задачі цифрового керування силовою електронікою, має 32-бітну архітектуру, підтримує високошвидкісні PWM-канали, багатоканальні АЦП, апаратні модулі для задач реального часу та комунікаційні інтерфейси. Для ОВС він може виконувати керування PFC-каскадом, LLC DC/DC-перетворювачем, обробляти сигнали датчиків, реалізовувати алгоритм CC-CV і підтримувати взаємодію з BMS через CAN.

Таблиця 3.2 – Вибір елементів системи керування

Вузол	Обраний компонент	Основні параметри
Центральний контролер	Texas Instruments TMS320F28379D	32-бітний real-time MCU, PWM, ADC, CAN
Драйвери SiC MOSFET	Texas Instruments UCC21750-Q1	Ізолюваний драйвер, 5,7 кВ RMS, ± 10 А
Ізольоване живлення драйверів	Murata MGJ2D121505SC	Ізолюваний DC/DC для драйверів затворів
CAN-трансивер	Texas Instruments TCAN1042-Q1	Automotive CAN FD transceiver

Для вимірювання вихідного зарядного струму обрано датчик LEM HAS 50-S [18]. Цей датчик призначений для вимірювання постійного, змінного та імпульсного струму з гальванічним розділенням між силовим і вимірювальним колом. Номінальний первинний струм для HAS 50-S становить 50 А, а діапазон вимірювання – до ± 150 А, що забезпечує достатній запас для максимального зарядного струму 40 А. Живлення датчика виконується від ± 15 В, а гальванічне розділення є важливим для безпечного зчитування сигналу мікроконтролером.

Для вимірювання вхідних фазних струмів можна застосувати датчики LEM HAS 50-S або компактніші датчики серії HASS 50-S. Оскільки розрахунковий вхідний струм становить близько 18 А на фазу, номінал 50 А забезпечує достатній запас. Для вимірювання напруги DC-ланки та вихідної напруги батареї доцільно застосувати резистивні високовольтні подільники з ізолюваним підсилювачем, наприклад Texas Instruments AMC1311-Q1 або аналогічний ізолюваний підсилювач для високовольтних вимірювань.

Таблиця 3.3 – Вибір датчиків і вимірювальних елементів

Контрольований параметр	Обраний компонент	Діапазон / параметр
Вихідний зарядний струм	LEM HAS 50-S	50 А номінально, до ± 150 А
Вхідні фазні струми	LEM HAS 50-S або HASS 50-S	50 А номінально
Напруга DC-ланки	HV-подільник + ТІ АМС1311-Q1	До 700–800 В
Вихідна напруга батареї	HV-подільник + ТІ АМС1311-Q1	До 450–500 В
Температура силових ключів	NTC 10 кОм, Murata NCP18XH103F03RB	Контроль локального нагріву

Для проміжної DC-ланки обрано плівкові конденсатори TDK B32778G9506K000 [19]. Один такий конденсатор має ємність 50 мкФ і номінальну напругу 900 В DC. Оскільки за розрахунком потрібна сумарна ємність 800–1000 мкФ, доцільно використати 20 конденсаторів, з'єднаних паралельно. У такому випадку сумарна ємність становитиме:

$$C_{dc.sum} = 20 \cdot 50 = 1000 \text{ мкФ}$$

Робоча напруга 900 В забезпечує необхідний запас відносно прийнятої напруги DC-ланки 700 В. Плівкові конденсатори є доцільними для DC-link застосувань, оскільки вони мають кращу стійкість до пульсацій струму та більший ресурс порівняно з електролітичними конденсаторами.

Для вхідного ЕМІ-фільтра доцільно застосувати трифазний фільтр Schaffner FN3258-30-33 [20]. Серія FN3258 призначена для трифазних систем, має виконання для напруги до $3 \times 480/277$ В AC, а модель на 30 А забезпечує достатній запас відносно розрахункового струму 17,8 А на фазу. Використання готового промислового ЕМІ-фільтра спрощує конструкцію пристрою та дозволяє зменшити рівень високочастотних завад на вході зарядного пристрою.

Таблиця 3.4 – Вибір компонентів вхідного кола та DC-ланки

Вузол	Обраний компонент	Основні параметри
Вхідний ЕМІ-фільтр	Schaffner FN3258-30-33	3-фазний фільтр, 30 А, до $3 \times 480/277$ В AC
Конденсатори DC-ланки	TDK B32778G9506K000	50 мкФ, 900 В DC
Коло попереднього заряду	Vishay RH050 100R	100 Ом, 50 Вт
Реле попереднього заряду	TE Connectivity EV200	HV DC relay/contactator
Вхідний варисторний захист	EPCOS/TDK B72220S	MOV для AC-мережі

Для захисту вхідного високовольтного кола доцільно застосувати запобіжник Eaton Bussmann EV10-50. Серія EV10 призначена для електромобільних допоміжних систем і має виконання до 500 В DC зі струмовими номіналами до 50 А. Для зарядного пристрою з максимальним вихідним струмом 40 А запобіжник на 50 А є логічним вибором, оскільки забезпечує запас для номінального режиму, але залишається придатним для захисту вхідного кола від надструму.

Для комутації високовольтного вихідного кола обрано контактор TE Connectivity EVC 250 [21]. Його номінальна напруга становить 450 В DC, максимальна комутувана напруга – до 500 В DC, а допустимий тривалий струм – 250 А при 85 °С. Для зарядного пристрою з вихідним струмом до 40 А цей контактор має значний запас, але його застосування обґрунтоване автомобільним призначенням, роботою у високовольтних системах електромобілів і здатністю безпечно комутувати DC-навантаження.

Таблиця 3.5 – Вибір компонентів вихідного високовольтного кола

Вузол	Обраний компонент	Основні параметри
Вихідний запобіжник HV-	Eaton Bussmann EV10-50	500 В DC, 50 А
Вихідний контактор	TE Connectivity EVC 250	450 В DC, до 500 В DC, 250 А
Датчик вихідного струму	LEM HAS 50-S	50 А номінально
Вихідний фільтр	Дросель 50 А + плівковий конденсатор 500 В	Пульсації струму до 10%
Роз'єм до батареї	Amphenol PowerLok	HV automotive connector

Для високочастотного трансформатора LLC-перетворювача доцільно прийняти трансформатор як індивідуально розрахований компонент на феритовому осерді. Для потужності 11 кВт доцільно застосувати феритове осердя великого типорозміру, наприклад TDK/EPCOS E70 або E80, з обмотками із ліцендрату або мідної шини. Трансформатор повинен забезпечувати гальванічну ізоляцію між первинною стороною DC-ланки 700 В і вторинною стороною батареї 300–450 В, а також мати конструкцію, придатну для ефективного відведення тепла.

Для вихідного дроселя також доцільно застосувати індивідуально розрахований компонент, оскільки його індуктивність залежить від частоти роботи LLC-перетворювача, допустимих пульсацій струму та параметрів вихідного фільтра. Основною вимогою є допустимий постійний струм не менше 50 А і робоча напруга ізоляції не менше 500 В. Як магнітопровід можуть використовуватися порошкові або феритові осердя з повітряним зазором, які не входять у насичення при максимальному струмі заряджання.

Підсумковий вибір елементної бази наведено в таблиці 3.6.

Таблиця 3.6 – Підсумкова специфікація основних компонентів бортового зарядного пристрою

№	Вузол	Обраний компонент	Кількість	Основні параметри
1	Силові ключі PFC	Wolfspeed C3M0032120K	6	SiC MOSFET, 1200 В, 32 мОм

2	Силові ключі LLC	Wolfspeed C3M0032120K	4	SiC MOSFET, 1200 В, TO-247-4
3	Драйвери ключів	TI UCC21750-Q1	10	Ізольований драйвер, 5,7 кВ RMS, ±10 А
4	Мікроконтролер	TI TMS320F28379D	1	Real-time MCU, PWM, ADC, CAN
5	Датчик вихідного струму	LEM HAS 50-S	1	50 А номінально, до ±150 А
6	Датчики фазних струмів	LEM HAS 50-S	3	50 А номінально
7	DC-link конденсатори	TDK B32778G9506K000	20	50 мкФ, 900 В DC, сумарно 1000 мкФ
8	ЕМІ-фільтр	Schaffner FN3258-30-33	1	3-фазний, 30 А
9	Вихідний HV-запобіжник	Eaton Bussmann EV10-50	1	500 В DC, 50 А
10	Вихідний контактор	TE Connectivity EVC 250	1–2	450 В DC, до 500 В DC, 250 А
11	CAN-трансивер	TI TCAN1042-Q1	1	Automotive CAN/CAN FD
12	Температурні датчики	Murata NCP18XH103F03RB	4–6	NTC 10 кОм
13	Трансформатор LLC	Індивідуальний на TDK/EPCOS E70/E80	1	11 кВт, HV-ізоляція
14	Вихідний дросель	Індивідуальний	1	Не менше 50 А, ізоляція не менше 500 В

Для комплексної оцінки доцільно порівняти запропонований пристрій із аналогічними пристроями меншої та більшої потужності. Порівняння з базовим варіантом зарядного пристрою меншої потужності 7,4 кВт показує, що такий пристрій може працювати від однофазної мережі, але забезпечує довший час заряджання. У порівнянні з ним розроблений ОВС потужністю 11 кВт має кращий баланс між швидкістю заряджання та складністю конструкції. В той же час він не є таким габаритним і дорогим, як 22 кВт ОВС, але забезпечує значно кращу швидкість заряджання порівняно з однофазними рішеннями.

Таблиця 3.7 – Порівняння запропонованого ОВС 11 кВт із типовими варіантами АС-заряджання

Параметр	ОВС 7,4 кВт	Запропонований ОВС 11 кВт	ОВС 22 кВт
Тип мережі	Однофазна 230 В	Трифазна 400 В	Трифазна 400 В
Орієнтовний час заряджання 20–80% для 60 кВт·год	близько 5 год	3,3–3,6 год	близько 1,7–2 год

Вхідний струм	Високий струм в одній фазі	Рівномірне навантаження трьох фаз	Високе трифазне навантаження
Складність силової частини	Нижча	Середня	Вища
Вимоги до охолодження	Помірні	Підвищені	Високі
Габарити і вартість	Нижчі	Збалансовані	Вищі
Практична доцільність	Базове домашнє заряджання	Оптимальний варіант для сучасного BEV	Доцільно для преміальних або комерційних EV

Порівняння показує, що потужність 11 кВт є раціональною для бортового зарядного пристрою легкового електромобіля середнього класу. Вона забезпечує помітне скорочення часу заряджання порівняно з однофазними пристроями, але не потребує таких високих струмових навантажень і тепловідведення, як пристрої на 22 кВт. Крім того, трифазне живлення дозволяє рівномірніше розподіляти навантаження між фазами, що є перевагою для електромережі.

Оцінка експлуатаційної ефективності також підтверджує доцільність запропонованої архітектури. У щоденних умовах електромобіль найчастіше заряджається не від 0 до 100%, а в частковому діапазоні SOC. Для такого сценарію ОВС 11 кВт дозволяє відновити значну частину запасу ходу протягом декількох годин стоянки. Це відповідає типовим сценаріям заряджання вдома вночі, на робочому місці або на громадському паркінгу.

4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ

4.1 Основні принципи та функції управління охороною праці під час досліджень електромобіля

Проведення досліджень електромобіля пов'язане з підвищеним рівнем небезпеки, оскільки в його конструкції поєднуються високовольтні електричні кола, силова електроніка, тягові акумуляторні батареї, електродвигуни, системи охолодження, зарядні пристрої та електронні блоки керування. На відміну від традиційного автомобіля з двигуном внутрішнього згоряння, електромобіль містить високовольтну енергетичну систему, напруга якої у більшості сучасних моделей становить близько 400 В, а в окремих конструкціях може досягати 800 В. Такий рівень напруги є потенційно небезпечним для людини, тому будь-які дослідження, діагностування, вимірювання або технічне обслуговування електромобіля повинні виконуватися з дотриманням вимог охорони праці, електробезпеки та виробничої дисципліни.

Управління охороною праці під час досліджень електромобіля полягає в організації таких умов роботи, за яких ризик травмування персоналу, пошкодження обладнання або виникнення аварійної ситуації зводиться до мінімально можливого рівня [22]. Це досягається шляхом правильного планування робіт, допуску до них підготовленого персоналу, застосування засобів індивідуального захисту, контролю технічного стану обладнання, дотримання порядку знеструмлення високовольтної системи, використання справного вимірювального інструменту та своєчасного реагування на небезпечні відхилення в роботі електромобіля.

Основними небезпечними факторами під час дослідження електромобіля є ураження електричним струмом, виникнення електричної дуги, коротке замикання у високовольтному колі, перегрів силових елементів, пошкодження ізоляції, витік струму на корпус, займання акумуляторної батареї або елементів силової електроніки, а також механічні травми під час роботи з вузлами автомобіля. Особливу небезпеку становлять роботи, пов'язані з відкриттям корпусу бортового зарядного пристрою, вимірюванням напруги в DC-ланці, перевіркою силових ключів, роботою з батарейними контактами та підключенням зовнішнього зарядного обладнання.

Першим принципом управління охороною праці під час досліджень електромобіля є пріоритет безпеки над швидкістю виконання робіт. Це означає, що жодні вимірювання або експериментальні операції не повинні виконуватися, якщо не підтверджено безпечний стан високовольтної системи. Перед початком робіт необхідно визначити, які вузли електромобіля перебувають під напругою, які елементи можуть зберігати залишковий заряд, які роз'єми або кабелі не можна від'єднувати без попереднього знеструмлення, а також які засоби захисту повинні використовуватися персоналом.

Другим принципом є допуск до роботи лише підготовленого персоналу. Працівник, який виконує дослідження електромобіля або його бортового зарядного пристрою, повинен знати будову високовольтної системи, принцип роботи тягової батареї, призначення BMS, особливості зарядного пристрою, порядок аварійного відключення та правила надання першої допомоги при ураженні електричним струмом. Непідготовлений персонал не повинен виконувати операції з високовольтними компонентами, навіть якщо система здається вимкненою.

Третім принципом є попередня ідентифікація небезпек. Перед проведенням дослідження необхідно визначити, які саме операції виконуватимуться: підключення зарядного пристрою до мережі, вимірювання вхідних струмів, контроль напруги DC-ланки, перевірка режиму CC-CV, тестування алгоритму керованого заряджання або аналіз роботи системи охолодження. Для кожної операції потрібно визначити можливі небезпечні фактори та заходи їх усунення. Такий підхід дозволяє не реагувати на небезпеку після її виникнення, а запобігати їй на етапі підготовки.

Четвертим принципом є обов'язкове знеструмлення високовольтної системи перед проведенням робіт, які не потребують активного живлення. Після вимкнення електромобіля необхідно від'єднати зовнішнє зарядне обладнання, вимкнути запалювання або сервісний режим, розімкнути високовольтні контактори, за потреби від'єднати сервісний розмикач батареї та витримати час, необхідний для розряду конденсаторів. Після цього обов'язково виконується перевірка відсутності напруги придатним для цього вимірювальним приладом. Лише після підтвердження безпечного рівня напруги допускається виконання робіт.

П'ятим принципом є застосування засобів індивідуального захисту та спеціального інструменту. Під час роботи з високовольтними системами електромобіля необхідно використовувати діелектричні рукавиці, захисні окуляри або щиток, спецодяг, діелектричне взуття або ізолювальний килимок. Інструмент повинен мати ізольовані ручки та бути призначеним для роботи в електроустановках відповідної напруги. Використання пошкоджених рукавиць, інструменту з порушеною ізоляцією або вимірювальних щупів із дефектами є неприпустимим.

Функції управління охороною праці під час досліджень електромобіля можна поділити на організаційні, технічні, контрольні та навчально-профілактичні [23]. Організаційні функції передбачають планування робіт, визначення відповідальних осіб, підготовку інструкцій, встановлення порядку допуску до роботи та обмеження доступу сторонніх осіб до зони дослідження. Технічні функції пов'язані з підготовкою обладнання, перевіркою справності інструментів, знеструмленням високовольтної системи, встановленням захисних пристроїв і контролем параметрів роботи. Контрольні функції полягають у

постійному нагляді за дотриманням правил безпеки, перевірці стану робочого місця та фіксації небезпечних відхилень. Навчально-профілактичні функції включають інструктаж персоналу, розбір можливих аварійних ситуацій і формування навичок безпечної роботи з електромобілями.

Під час дослідження бортового зарядного пристрою особливе значення має правильна організація робочого місця. Робоча зона повинна бути сухою, чистою, достатньо освітленою та вільною від сторонніх предметів. Забороняється розміщувати біля високовольтних кіл металеві предмети, рідини, легкозаймісті матеріали або інструмент, який не використовується в роботі. У зоні дослідження повинні бути розміщені попереджувальні знаки про наявність високої напруги, а доступ сторонніх осіб має бути обмежений. Якщо виконується заряджання або тестування під напругою, працівник повинен перебувати на безпечній відстані від відкритих струмопровідних частин.

Перед початком експериментального дослідження необхідно виконати підготовчу перевірку електромобіля та зарядного обладнання. Перевіряється цілісність зарядного кабелю, стан роз'ємів, наявність заземлення, справність захисного вимкнення, відсутність механічних пошкоджень високовольтних кабелів, стан корпусу бортового зарядного пристрою та наявність аварійних повідомлень у системі BMS. Якщо виявлено пошкодження ізоляції, сліди перегріву, запах гару, деформацію корпусу батареї або помилки високовольтної системи, дослідження повинно бути припинене до усунення несправностей.

У процесі досліджень особливо небезпечними є вимірювання в силових колах бортового зарядного пристрою. Вимірювання напруги DC-ланки, вихідної напруги батареї або струму заряджання повинні виконуватися тільки справними приладами, розрахованими на відповідний клас напруги. Вимірювальні щупи повинні мати захисні кожухи, а підключення приладів бажано виконувати при знеструмленій системі з подальшим дистанційним або контрольованим запуском. Забороняється торкатися відкритих контактів, змінювати схему підключення під напругою або від'єднувати силові провідники під час активного заряджання.

4.2 Концепція захисту населення і території у разі загрози та виникнення надзвичайних ситуацій

Указ Президента України від 26 березня 1999 року No 284/99 затвердив концепцію захисту населення та території у разі загрози та виникнення надзвичайних ситуацій.

Концепція описує загальні цілі та завдання захисту громадян, які проживають на території України, земельного, водного та повітряного простору в межах держави, об'єктів виробничого та соціального призначення, а також довкілля від надзвичайних ситуацій [24].

Виникнення надзвичайної ситуації та її класифікація Щодня в світі фіксуються тисячі подій, які порушують нормальне життя та діяльність людей. Ці події можуть призвести до смерті або значних матеріальних втрат. Такі ситуації називають надзвичайними.

Загальні характеристики НС

- наявність або загроза смерті людей або значне погіршення умов життєдіяльності людей
- загострення економічних проблем
- значне погіршення навколишнього середовища.
- аварії, катастрофи, стихійні лиха та інші події, такі як епідемії, терористичні акти, збройні конфлікти тощо, є типовими причинами надзвичайних ситуацій.

Аварії поділяються на дві групи:

1) До I категорії належать аварії, внаслідок яких загинуло 5 або травмовано 10 і більше осіб; відбувся викид отруйних, радіоактивних або біологічно небезпечних речовин у санітарно-захисну зону підприємства; концентрація забруднюючих речовин у навколишньому середовищі зросла більш як у 10 разів; зруйновано будівлі, споруди чи основні конструкції об'єкта, що поставило життя і здоров'я значної кількості працівників.

2) До II категорії належать аварії, які призвели до: загибелі або травмування від 5 до 10 осіб; руйнування будівлі, споруди чи основних конструкцій об'єкта, що поставило життя чи здоров'я працівників цеху, дільниці (враховуються цехи, дільниці з більш ніж 100 працівниками).

До категорії аварій не належать порушення технологічних процесів, робота устаткування, тимчасові зупинки виробництва через спрацювання автоматичних захисних блокувань або інші локальні порушення роботи цехів, дільниць або окремих об'єктів, падіння опор і обрив дротів ліній електропередач.

Як правило, більша площа охоплюється більшою кількістю людей, які тікають від надзвичайної ситуації. І навпаки, більше людей страждають від катастрофи чи стихійного лиха на більшій території. З цієї причини класифікації надзвичайних ситуацій за масштабом зазвичай базуються на територіальному принципі. За цим принципом надзвичайні ситуації поділяються на локальні, об'єктові, місцеві, регіональні, загальнодержавні (національні), континентальні та глобальні.

Надзвичайні ситуації соціально-політичного характеру – це ситуації, пов'язані з діями, які є терористичними або антиконституційними, наприклад, здійснення або реальна загроза терористичного акту (збройний напад, захоплення і затримання важливих об'єктів, ядерних установок і матеріалів, систем зв'язку та телекомунікацій, напад чи замах на екіпаж повітряного чи морського судна), викрадення (спроба викрадення) чи знищення суден [25].

Надзвичайні ситуації воєнного характеру – це ситуації, у яких застосування зброї масового ураження або звичайних засобів ураження призводить до вторинних факторів ураження населення. Ці фактори включають руйнування транспортних і інженерних комунікацій, атомних і гідроелектричних станцій, складів і сховищ радіоактивних і токсичних речовин і відходів, нафтопродуктів, вибухівки, сильнодіючих отруйних речовин, токсичних відход

Зовнішні та внутрішні загрози для життєво важливих інтересів громадян, держав і суспільств поділяються на зовнішні та внутрішні. Ці загрози виникають під час надзвичайних ситуацій техногенного та природного походження, а також воєнних конфліктів.

Основними завданнями під час надзвичайних ситуацій є захист населення та територій:

- розробка та впровадження законодавства, дотримання державних технічних правил і стандартів щодо захисту населення та територій від надзвичайних ситуацій;
- забезпечити готовність органів управління, сил і засобів реагування на надзвичайні ситуації;
- розробка та забезпечення планів реагування на надзвичайні ситуації;
- збирання та обробка даних про надзвичайні ситуації;
- передбачення та оцінка наслідків надзвичайної ситуації;
- оповіщення людей про загрозу або надзвичайну ситуацію;
- забезпечення персонального захисту та безкоштовної медичної допомоги;
- рятувальні та інші невідкладні операції, щоб зменшити наслідки надзвичайної ситуації та допомогти постраждалим;
- забезпечення соціального захисту населення;
- розробка та підтримка цільових і науково-технічних програм, спрямованих на запобігання надзвичайним ситуаціям і забезпечення сталого функціонування підприємств, установ, організацій незалежно від форм власності та підпорядкування, а також підвідомчих їм об'єктів виробничого та соціального захисту;
- міжнародна співпраця щодо захисту населення від надзвичайних ситуацій.

У разі надзвичайної ситуації необхідно вжити спеціальних заходів, щоб захистити населення та зменшити втрати та шкоду економіці. Він складається з повідомлень і інформування, спостереження та контролю, укриття в захисних спорудах, евакуації та інженерного, медичного, біологічного та радіаційного захисту.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

В результаті виконання роботи було послідовно розглянуто комплекс питань, пов'язаних із проектуванням бортового зарядного пристрою електромобіля з підтримкою керованого заряджання.

У загально-технічному розділі проаналізовано сучасний стан розвитку електромобільності та зарядної інфраструктури, визначено роль бортового зарядного пристрою в енергетичній системі електромобіля, розглянуто особливості тягових акумуляторних батарей і встановлено основні вимоги до процесу їх заряджання. Показано, що під час заряджання від мережі змінного струму саме бортовий зарядний пристрій є основним силовим елементом, який забезпечує перетворення електричної енергії, стабілізацію зарядного струму та напруги, взаємодію з системою керування батареєю і захист високовольтної системи електромобіля.

У технологічному розділі сформовано вихідні дані для проектування бортового зарядного пристрою потужністю 11 кВт, призначеного для заряджання тягової акумуляторної батареї номінальною напругою 400 В і енергоємністю 60 кВт·год. Прийнято діапазон вихідної напруги 300–450 В, максимальний вихідний струм до 40 А, живлення від трифазної мережі 3×400 В, напругу проміжної DC-ланки на рівні 700 В та очікуваний коефіцієнт корисної дії 94%. Виконані розрахунки показали, що при номінальній напрузі батареї 400 В зарядний струм становить 27,5 А, а при мінімальній напрузі 300 В може досягати 36,7 А, тому прийняття максимального струму 40 А є технічно обґрунтованим. У результаті розрахунку силової частини визначено, що для забезпечення вихідної потужності 11 кВт зарядний пристрій споживає з мережі приблизно 11,7 кВт, а сумарні втрати потужності становлять близько 702 Вт. Це підтвердило необхідність застосування ефективної системи охолодження та силової елементної бази з низькими втратами. Для проміжної DC-ланки обґрунтовано застосування конденсаторів сумарною ємністю близько 800–1000 мкФ із робочою напругою не нижче 800 В. Розрахунок режимів заряджання показав, що для батареї ємністю 60 кВт·год заряджання в діапазоні 20–80% потребує передавання 36 кВт·год енергії і при потужності 11 кВт триває орієнтовно 3,3–3,6 год, що є прийнятним для щоденної експлуатації електромобіля. На основі аналізу можливих силових топологій обрано двокаскадну структуру бортового зарядного пристрою, яка включає вхідний PFC-каскад, проміжну ланку постійного струму та ізольований LLC DC/DC-перетворювач. Така структура забезпечує корекцію коефіцієнта потужності, стабілізацію DC-ланки, гальванічну ізоляцію між мережею і батареєю, регулювання вихідної напруги та струму, а також можливість реалізації зарядного профілю CC-CV. Для реалізації керованого заряджання запропоновано алгоритм, у якому фактичний зарядний струм визначається як мінімальне значення серед обмежень бортового

зарядного пристрою, системи BMS, зарядного обладнання EVSE, електромережі та теплового стану силових компонентів.

У конструкторському розділі розроблено структурну схему бортового зарядного пристрою, яка включає зарядний роз'єм Type 2, блок вхідного захисту, ЕМІ-фільтр, PFC-каскад, проміжну DC-ланку, ізольований LLC DC/DC-перетворювач, вихідний фільтр, високовольтні контактори, датчики струму, напруги й температури, блок керування, інтерфейс взаємодії з BMS та систему охолодження. Для основних компонентів пристрою виконано вибір елементної бази із зазначенням конкретних моделей. Зокрема, для силових каскадів запропоновано використання SiC MOSFET Wolfspeed C3M0032120K класу 1200 В, для керування ключами – ізольовані драйвери Texas Instruments UCC21750-Q1, для цифрового керування – мікроконтролер TMS320F28379D, для вимірювання струму – датчики LEM HAS 50-S, для DC-ланки – плівкові конденсатори TDK V32778G9506K000, для вхідної фільтрації – Schaffner FN3258-30-33, а для захисту вихідного високовольтного кола – запобіжник Eaton Bussmann EV10-50 і контактор TE Connectivity EVC 250. Оцінка ефективності запропонованого рішення показала, що бортовий зарядний пристрій потужністю 11 кВт є раціональним варіантом для електромобіля середнього класу з батареєю номінальною напругою 400 В. Порівняно з однофазними зарядними пристроями потужністю 3,7–7,4 кВт він забезпечує суттєве скорочення часу заряджання, а порівняно з потужнішими ОВС на 22 кВт має менші вимоги до габаритів, вартості, тепловідведення та струмового навантаження. Застосування трифазного живлення дозволяє рівномірніше розподілити навантаження між фазами, а використання PFC-каскаду зменшує негативний вплив зарядного пристрою на електромережу.

У роботі також розглянуто питання безпеки життєдіяльності та охорони праці під час експлуатації, діагностування і технічного обслуговування високовольтних зарядних систем електромобіля. Визначено основні небезпечні фактори, до яких належать ураження електричним струмом, електрична дуга, залишковий заряд конденсаторів DC-ланки, перегрів силових елементів, пошкодження ізоляції, коротке замикання та аварійні режими тягової акумуляторної батареї. Запропоновано заходи захисту персоналу, вимоги до знеструмлення високовольтної системи, використання ізольованого інструменту, контролю відсутності напруги, застосування засобів індивідуального захисту та дій у разі виникнення аварійної ситуації.

БІБЛІОГРАФІЯ

1. International Energy Agency. (2026). Global EV Outlook 2026. IEA. <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2026>
2. International Electrotechnical Commission. (2017). IEC 61851-1:2017: Electric vehicle conductive charging system–Part 1: General requirements. IEC. <https://webstore.iec.ch/en/publication/33644>
3. International Organization for Standardization. (2022). ISO 15118-20:2022: Road vehicles–Vehicle to grid communication interface–Part 20: 2nd generation network layer and application layer requirements. ISO. <https://www.iso.org/standard/77845.html>
4. Charging Interface Initiative e.V. (2019). Design guide for Combined Charging System V7. CharIN. https://www.charin.global/media/pages/technology/ccs-specification/c07034e41e-1626949173/design_guide_combined_charging_system_v7.pdf
5. Liu, K., Li, K., Peng, Q., & Zhang, C. (2019). A brief review on key technologies in the battery management system of electric vehicles. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 14, 47–64. <https://doi.org/10.1007/s11465-018-0516-8>
6. Chen, C., Li, X., Jiang, J., & Gao, W. (2021). Charging optimization for Li-ion battery in electric vehicles: A review. Technical University of Munich. https://mediatum.ub.tum.de/doc/1637857/tsbt29cm76d048mqyuy6814kv.Charging_Optimization_for_Li-ion_Battery_in_Electric_Vehicles_A_Review.pdf
7. Lyashuk, O., Mironov, D., Maruschak, P., Dzyura, V., & Shevchuk, V. (2026). Mathematical Modeling and Comparative Evaluation of PI and PID Speed Controllers for Electric Vehicle Traction Systems. *Modelling*, 7(3), 100. <https://doi.org/10.3390/modelling7030100>
8. Dar, A. R., et al. (2024). On-board chargers for electric vehicles: A comprehensive review. *Energies*, 17(18), 4534. <https://doi.org/10.3390/en17184534>
9. Türksoy, Ö., & Teke, A. (2018). Overview of battery charger topologies in plug-in electric and hybrid electric vehicles. *Proceedings of the 2018 International Conference on Clean Electrical Power*.
10. Texas Instruments. (2020). Power topologies in electric vehicle charging stations (Application Report SLLA497). Texas Instruments. <https://www.ti.com/lit/pdf/slla497>
11. Zeb, K., et al. (2025). A systematic review of topologies, control strategies, and power converters for electric vehicle chargers. *e-Prime: Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211467X25002093>
12. Sadeghian, O., et al. (2022). A comprehensive review on electric vehicles smart charging: Solutions, strategies, technologies, and challenges. Nottingham Trent University. https://irep.ntu.ac.uk/id/eprint/46790/1/1578272_Vahidinasab.pdf

13. Kumar, P., et al. (2025). A comprehensive review of vehicle-to-grid integration in energy systems. Energy Reports. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590174524003428>
14. Leijon, J., et al. (2025). Charging strategies and battery ageing for electric vehicles. DiVA Portal. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2%3A1927303/FULLTEXT01.pdf>
15. Wolfspeed. (2024). C3M0032120K: 1200 V, 32 mΩ, discrete silicon carbide MOSFET: Data sheet. Wolfspeed. https://assets.wolfspeed.com/uploads/2024/01/Wolfspeed_C3M0032120K_data_sheet.pdf
16. Texas Instruments. (2025). UCC21750-Q1: 10-A source/sink reinforced isolated single channel gate driver for SiC/IGBT with active protection: Data sheet. Texas Instruments. <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ucc21750-q1.pdf>
17. Texas Instruments. (2025). TMS320F2837xD dual-core real-time microcontrollers: Data sheet. Texas Instruments. <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tms320f28379d.pdf>
18. LEM. (2022). Current transducer HAS 50 ... 600-S: Data sheet. LEM. https://www.lem.com/sites/default/files/products_datasheets/has_50_600-s_v16.pdf
19. TDK Electronics. (2025). B32778G9506K000: Capacitors for DC link. TDK. https://product.tdk.com/en/search/capacitor/film/dc-link/info?part_no=B32778G9506K000
20. Schaffner. (2025). FN3258-30-33: 3-phase EMC/RFI filter: Data sheet. Schaffner. <https://inova.by/downloads/4470/FN3258.-Datasheet-%28EN%2C-29%2C-2025%29.pdf>
21. TE Connectivity. (n.d.). EVC 250 main contactor: High voltage automotive main contactor. TE Connectivity. <https://www.te.com/en/products/relays-and-contactors/contactors/automotive-contactors/evc-250-main-contactor-evc-250.html>
22. Охорона праці на автомобільному транспорті : навчальний посібник / Пістун І. П., Хом'як Й. В., Хом'як В. В. - 2-ге вид., стер. - Суми : Університетська книга, 2015. - 374 с.
23. Охорона праці в галузі та цивільний захист: навчальний посібник / Ю. А. Гасило, О. А. Крюковська. К. О. Левчук, Р. Я. Романюк. – Кам'янське : ДДТУ, 2017. – 369 с.
24. Техноекологія та цивільна безпека. Частина «Цивільна безпека»: навч. посібник / В.С. Стручок – Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2022. – 156 с.
25. Безпека в надзвичайних ситуаціях : навч. посібник для студентів ЗВО України : у 2 ч. Ч. 1: Надзвичайні ситуації / М. Л. Лисиченко, В. В. Вамболь, С. О. Вамболь, М. М. Кірієнко, І. А. Черепньов, В. М. Власовець ; за ред. М. Л. Лисиченка ; ХНТУСГ. – Харків : ТОВ “ПромАрт”, 2021. – 202 с.