ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА

НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ, ІНФОРМАЦІЙНОЇ
ТА ТРАНСПОРТНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

Кафедра електричного транспорту

АНАЛІЗ БОРТОВИХ ЗАРЯДНИХ ПРИСТРОЇВ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ЇХ РОБОТИ

Бакалаврська кваліфікаційна робота

Здобувач:
Віталій КАСЯНОВ
гр. СТ2023-1у

Керівник:
Наталя ЛУКАШОВА
доцент, к.т.н.

Харків – 2026

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА
імені О. М. Бекетова

Навчально-науковий інститут енергетичної, інформаційної та транспортної інфраструктури
Кафедра електричного транспорту
Освітньо-кваліфікаційний рівень бакалавр
Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
Освітня програма Електромеханіка

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ЕТ
_____ Микола ХВОРОСТ
«_19_» _червня_ 2026 р.

ЗАВДАННЯ

до бакалаврської кваліфікаційної роботи

Касянову Віталію Вікторовичу
прізвище, ім'я, по батькові

1. **Тема роботи**: Аналіз бортових зарядних пристроїв електромобілів для визначення показників їх роботи

керівник бакалаврської кваліфікаційної роботи к.т.н., доцент Наталя ЛУКАШОВА

затверджені наказом університету від «22» травня 2026 р. № 440-03

2. Строк подання студентом бакалаврської кваліфікаційної роботи 15.06.2026 р.

3. Вихідні дані до бакалаврської кваліфікаційної роботи *Матеріал переддипломної практики. Технічні характеристики та паспортні параметри бортових зарядних пристроїв. Дані про рівні та режими заряджання електромобілів. Науково-технічна література з розрахунку енергоефективності силових перетворювачів.*

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)
1. Технічні особливості бортових зарядних пристроїв електромобілів.
2. Використання бортових зарядних пристроїв електромобілів для оцінки їх продуктивності та ефективності.
3. Розрахунок основних показників роботи бортового зарядного пристрою.
4. Охорона праці.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових слайдів) *Класифікація рівнів та способів заряджання електромобілів. Структура інтеграції та принципові схеми бортових зарядних пристроїв. Алгоритми керування в режимах G2V та V2G. Цільові показники енергоефективності та конструктивні параметри перетворювачів.*

6. Консультанти розділів бакалаврської кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Основна частина	*Наталя ЛУКАШОВА, доц.*		
Антиплагіат	*Вікторія ЛЕВЧЕНКО, інж.*		
Нормоконтроль	*Вячеслав ШАВКУН, доц.*		

7. Дата видачі завдання 11.05.2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів бакалаврської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	*Стан питання*	11.05 − 24.05.2026	
2	*Розробка технічного завдання*	25.05 − 31.05.2026	
3	*Розрахункова частина*	01.05 − 07.06.2026	
4	*Охорона праці*	08.06 − 11.06.2026	
5	*Оформлення паперового та електронного варіантів роботи*	12.06 − 16.06.2026	
6	*Підготовка доповіді та презентації*	17.06 − 20.06.2026	

Здобувач _____ Віталій КАСЯНОВ
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник бакалаврської кваліфікаційної роботи _____ Наталя ЛУКАШОВА
(підпис) (прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

У бакалаврській кваліфікаційній роботі на тему «Використання бортових зарядних пристроїв електромобілів для визначення показників їх роботи» проаналізовано сучасні технічні рішення бортових зарядних пристроїв, розглянуто принципи їх побудови та функціонування.

Розглянуто можливість використання бортових зарядних пристроїв як інструменту для оцінювання експлуатаційних показників електромобіля, визначення ефективності перетворення енергії та оптимізації процесу заряджання. Виконано розрахунок основних параметрів роботи бортових зарядних пристроїв. Окремий розділ присвячено питанням охорони праці при роботі з лабораторним стендом бортового зарядного пристрою.

Ключові слова: електромобіль, бортовий зарядний пристрій, ефективність, коефіцієнт корисної дії, зарядна інфраструктура, двонаправлена зарядка, енергетичні показники.

ЗМІСТ

стор

ВСТУП 7

1 Технічні особливості бортових зарядних пристроїв електромобілів ……. 9

1.1 Роль бортових зарядних пристроїв у системі електроживлення електромобіля…… 9

1.2 Класифікація та технічні характеристики бортових зарядних пристроїв електромобілів……. 11

1.3 Показники продуктивності та ефективності бортових зарядних пристроїв…… 14

1.4 Фактори, що впливають на ефективність роботи бортових зарядних пристроїв……... 16

1.5 Порівняльний аналіз сучасних технічних рішень бортових зарядних пристроїв……... 18

2 Використання бортових зарядних пристроїв електромобілів для оцінки їх продуктивності та ефективності……. 21

2.1 Зарядна інфраструктура……... 21

2.2 Відповідні стандарти для електромобілів…….. 29

2.3 Конструктивні аспекти та цільові показники ефективності……. 31

2.4 Сучасні виклики та перспективні напрями розвитку бортових зарядних пристроїв електромобілів……... 33

3 Розрахунок основних показників роботи бортового зарядного пристрою…….. 37

3.1 Вихідні дані для розрахунку…… 37

3.2 Розрахунок струмів у трифазній мережі……. 37

3.3 Розрахунок потужності та ККД у режимі G2V…….. 38

3.4 Розрахунок ланки постійного струму…….. 39

3.5 Розрахунок втрат у силових ключах…… 39

3.6 Розрахунок ефективності у режимі V2G……. 41

3.7 Оцінка продуктивності заряджання…… 41
3.8 Порівняльна оцінка режимів G2V та V2G…….. 41
4 Охорона праці…… 44
4.1 Вступ…… 44
4.2 Аналіз небезпечних та шкідливих факторів…… 44
4.3 Організаційно-технічні заходи по забезпеченню безпеки…….. 46
4.4 Висновки по розділу……... 47
Висновки…….. 48
Список використаних джерел…… 49

ВСТУП

Стрімкий розвиток електромобільності є однією з ключових тенденцій трансформації сучасної енергетики та транспортної галузі. Зростання частки електричного транспорту обумовлене необхідністю зменшення викидів парникових газів, підвищення енергоефективності та інтеграції відновлюваних джерел енергії в енергетичні системи. У структурі електромобіля одним із визначальних елементів, що впливає на його експлуатаційні характеристики, є бортовий зарядний пристрій.

Бортовий зарядний пристрій забезпечує перетворення змінного струму мережі у постійний струм, необхідний для заряджання тягової акумуляторної батареї. Від його технічних параметрів залежать швидкість заряджання, втрати енергії, теплові режими роботи та довговічність акумулятора. Крім того, сучасні тенденції розвитку передбачають використання двонаправлених бортових зарядних пристроїв, що дозволяють реалізувати режими взаємодії з мережею Vehicle-to-Grid, підвищуючи гнучкість енергосистеми.

Актуальність теми зумовлена зростанням вимог до енергоефективності електромобілів та необхідністю об’єктивної оцінки показників їх роботи. Використання бортових зарядних пристроїв як інструменту аналізу продуктивності дозволяє визначати реальні втрати енергії, ефективність перетворення та вплив режимів заряджання на загальні експлуатаційні характеристики транспортного засобу. Це є важливим як з технічної, так і з економічної точки зору.

Метою роботи є аналіз технічних особливостей бортових зарядних пристроїв електромобілів та визначення показників їх продуктивності та ефективності.

Для досягнення поставленої мети у роботі вирішуються такі завдання:

1. Проаналізувати технічні особливості бортових зарядних пристроїв електромобілів.

2. Визначити продуктивність та ефективність бортових зарядних пристроїв електромобілів.

3. Розрахувати основні показники роботи бортового зарядного пристрою.

4. Розробити заходи з охорони праці при роботі з лабораторним стендом бортового зарядного пристрою.

1 ТЕХНІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ БОРТОВИХ ЗАРЯДНИХ ПРИСТРОЇВ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ

1.1. Роль бортових зарядних пристроїв у системі електроживлення електромобіля

Сучасний електромобіль являє собою складну електротехнічну систему, ефективність якої безпосередньо залежить від якості перетворення та передачі енергії між зовнішньою мережею та накопичувачем. Одним із центральних вузлів цієї системи є бортовий зарядний пристрій, який виконує функцію інтерфейсу між джерелом змінного струму та тяговою акумуляторною батареєю, що працює на постійному струмі.

У загальній архітектурі силового ланцюга електромобіля бортовий зарядний пристрій займає позицію між вхідним роз’ємом зарядки та шиною постійного струму високої напруги. На відміну від зовнішніх станцій швидкої зарядки, де силова електроніка винесена за межі авто, бортовий зарядний пристрій інтегрований у конструкцію транспортного засобу. Це обумовлює жорсткі обмеження щодо його габаритів, маси та тепловиділення, оскільки будь-яке збільшення ваги пристрою негативно впливає на запас ходу автомобіля [1]. Типова схема розташування бортового зарядного пристрою у структурі електромобіля наведена на рисунку 1.1.

Рисунок 1.1 – Узагальнена структурна схема силової частини

Типова структура бортового зарядного пристрою включає дворівневу схему перетворення. Перший ступінь – це коректор коефіцієнта потужності, який мінімізує гармонійні спотворення в мережі та забезпечує споживання енергії з коефіцієнтом, близьким до одиниці. Другий ступінь – ізольований DC/DC перетворювач, що забезпечує гальванічну розв'язку між високовольтною батареєю та електромережею, що є ключовим фактором електробезпеки користувача [2].

Бортовий зарядний пристрій не є автономним регулятором; його робота повністю підпорядкована командам системи керування батареєю. Взаємодія здійснюється через цифрову шину CAN, по якій у реальному часі передаються дані про стан кожного осередку батареї (рис. 1.2).

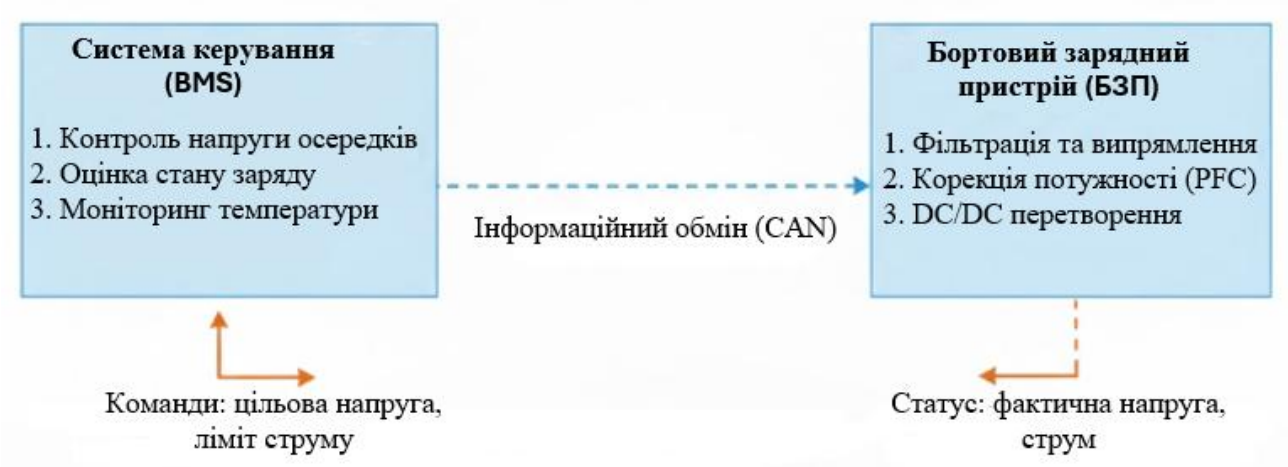

Рисунок 1.2 – Схема інформаційної взаємодії між системою керування та бортовим зарядним пристроєм через шину CAN

Процес взаємодії можна розділити на кілька етапів:

1. Ініціалізація. BMS перевіряє цілісність ізоляції та температуру батареї, після чого дає дозвіл бортовому зарядному пристрою на замикання контакторів.

2. Динамічне керування. Бортовий зарядний пристрій отримує від системи керування уставки щодо максимально допустимої напруги та струму. Якщо в процесі заряджання один з осередків досягає критичної напруги або

температури, система керування надсилає команду на зниження потужності або повну зупинку процесу [3].

Ефективність функціонування бортового зарядного пристрою визначається алгоритмами керування силовими ключами. Основним стандартом для літій-іонних акумуляторів є двоетапний протокол CC/CV (рис. 1.3).

Режим Constant Current. На початковому етапі, коли рівень заряду низький, БЗП працює як джерело стабільного струму. Це дозволяє максимально швидко накопичувати енергію без перевищення термічних лімітів батареї.

Режим Constant Voltage. Коли напруга на батареї досягає заданої межі, пристрій переходить у режим стабілізації напруги. При цьому струм експоненціально знижується, що забезпечує «дозарядку» батареї до 100% без ризику деградації хімічного складу [4].

1.2. Класифікація та технічні характеристики бортових зарядних пристроїв електромобілів

Розвиток електромобільності зумовив суттєву еволюцію бортових зарядних пристроїв як за конструктивними рішеннями, так і за технічними параметрами. З метою систематизації існуючих технічних рішень доцільно навести класифікацію бортових зарядних пристроїв за основними ознаками: типом підключення до мережі, рівнем потужності, архітектурою силової частини та функціональними можливостями.

За типом живильної мережі бортові зарядні пристрої поділяються на однофазні та трифазні. Однофазні бортові зарядні пристрої працюють від стандартної побутової мережі напругою 220-230 В та застосовуються переважно в легкових електромобілях малого і середнього класу. Їх номінальна потужність зазвичай становить 3,3-7,4 кВт. Трифазні бортові зарядні пристрої використовують мережу 380-400 В і дозволяють реалізувати потужності 11-22 кВт, що забезпечує суттєве скорочення часу заряджання тягової

акумуляторної батареї [5]. Збільшення потужності, однак, супроводжується підвищеними вимогами до систем охолодження та електромагнітної сумісності.

За рівнем вихідної потужності бортові зарядні пристрої умовно поділяють на малопотужні (до 3,7 кВт), середньої потужності (3,7-11 кВт) та підвищеної потужності (понад 11 кВт). У сучасних моделях електромобілів спостерігається тенденція до зростання встановленої потужності бортових зарядних пристроїв, що обумовлено збільшенням ємності акумуляторних батарей та вимогами користувачів щодо скорочення часу заряджання [6].

З точки зору схемотехнічної реалізації більшість сучасних бортових зарядних пристроїв мають дворівневу структуру перетворення енергії, яка включає вхідний AC/DC перетворювач із корекцією коефіцієнта потужності та ізольований DC/DC перетворювач. На рисунку 1.3 наведено узагальнену класифікацію архітектур бортових зарядних пристроїв.

Рисунок 1.3 – Класифікація бортових зарядних пристроїв за основними ознаками

У сучасних рішеннях широко застосовуються схеми активного коректора коефіцієнта потужності типу Boost, Totem-Pole та Vienna Rectifier, що дозволяють досягати високих значень коефіцієнта потужності ($\cos\varphi > 0{,}95$) і знижувати рівень гармонічних спотворень струму відповідно до вимог стандартів IEC 61000. Другий каскад перетворення зазвичай реалізується за схемами LLC-резонансного перетворювача або фазозсувного повного мосту, що забезпечує високий ККД та гальванічну розв’язку.

Однією з ключових технічних характеристик бортових зарядних пристроїв є коефіцієнт корисної дії. У сучасних комерційних рішеннях ККД досягає 93-96 % у номінальному режимі навантаження [6,7]. Водночас при частковому навантаженні спостерігається зниження ефективності через збільшення відносних втрат у силових ключах та магнітопроводах. Тому оцінка енергетичних показників повинна здійснюватися в широкому діапазоні навантажень.

Важливим параметром є також щільність потужності (Вт/л), що визначає масогабаритні показники пристрою. Підвищення цього показника досягається шляхом застосування високочастотного перетворення та використання напівпровідникових приладів на основі карбіду кремнію та нітриду галію, які характеризуються меншими комутаційними втратами та вищими допустимими робочими температурами.

Окремим напрямом класифікації є функціональні можливості бортових зарядних пристроїв. Традиційні пристрої реалізують односторонню передачу енергії Grid-to-Vehicle (G2V). Проте сучасні концепції розвитку електротранспорту передбачають використання двонапрямлених бортових зарядних пристроїв, здатних працювати в режимах Vehicle-to-Grid (V2G) або Vehicle-to-Load (V2L). У такому випадку бортові зарядні пристрої виконує функції інвертора та бере участь у регулюванні параметрів електричної мережі [8]. Це суттєво підвищує вимоги до систем керування та стабільності роботи пристрою

Таким чином, класифікація бортових зарядних пристроїв відображає їх багатофункціональність і різноманітність технічних рішень. Основними тенденціями розвитку є підвищення ККД, збільшення щільності потужності, інтеграція двонапрямлених режимів роботи та використання широкозонних напівпровідників. Проведений аналіз дозволяє сформувати критерії оцінювання продуктивності бортових зарядних пристроїв, що будуть використані в наступних підрозділах для визначення напрямів удосконалення їх технічних характеристик.

1.3. Показники продуктивності та ефективності бортових зарядних пристроїв

Оцінка продуктивності та ефективності бортових зарядних пристроїв електромобілів здійснюється на основі системи технічних та енергетичних показників, що характеризують якість перетворення електричної енергії, стабільність роботи та відповідність нормативним вимогам. Комплексний аналіз цих параметрів дозволяє визначити рівень технологічної досконалості бортових зарядних пристроїв та сформувати критерії їх оптимізації.

Одним із ключових показників є коефіцієнт корисної дії, який визначається як відношення вихідної потужності до вхідної:

$$\eta = \frac{P_{вих}}{P_{вх}} \cdot 100\%, \qquad (1.1)$$

де $P_{вих}$ – потужність, що передається до тягової акумуляторної батареї;

$P_{вх}$ – потужність, споживана з електричної мережі.

У сучасних бортових зарядних пристроях ККД у номінальному режимі досягає 93-96 %, що зумовлено застосуванням активних схем корекції коефіцієнта потужності та високочастотних ізольованих DC/DC перетворювачів. Проте ефективність суттєво залежить від рівня навантаження: при роботі на частковій потужності спостерігається зростання відносних втрат у силових ключах і магнітних елементах [9].

Другим важливим параметром є коефіцієнт потужності, який характеризує ефективність споживання енергії з мережі змінного струму. Для сучасних бортових зарядних пристроїв із активною корекцією коефіцієнта потужності його значення перевищує 0,95, що відповідає вимогам стандартів електромагнітної сумісності IEC 61000-3-2. Низький коефіцієнт потужності

призводить до додаткових втрат у мережі та перевантаження розподільчої інфраструктури.

Важливою характеристикою є також рівень гармонічних спотворень струму, який визначається як відношення середньоквадратичного значення гармонічних складових до основної гармоніки. Зменшення рівеня гармонічних спотворень струму досягається шляхом застосування активних схем коректора коефіцієнта потужності та високочастотного широтно-імпульсного керування [10].

Окрім енергетичних параметрів, суттєве значення мають масогабаритні показники. Щільність потужності та питома потужність визначають ступінь інтеграції бортових зарядних пристроїв у транспортний засіб. Підвищення робочої частоти перетворення дозволяє зменшити габарити магнітних елементів і конденсаторів, однак супроводжується зростанням комутаційних втрат, що потребує застосування широкозонних напівпровідників.

Окремо слід розглядати теплову ефективність, яка визначається співвідношенням втрат потужності до площі теплообміну. Надлишкові теплові втрати знижують загальний ККД системи та прискорюють деградацію компонентів. Тому сучасні бортові зарядні пристрої оснащуються системами примусового повітряного або рідинного охолодження.

Продуктивність бортового зарядного пристрою також характеризується часом заряджання тягової батареї, який можна оцінити як:

$$t = \frac{E_{бат}}{P_{еф}}, \tag{1.2}$$

де $E_{бат}$ – енергетична ємність батареї;

$P_{еф}$ – ефективна потужність заряджання з урахуванням втрат.

Таким чином, зростання ККД безпосередньо впливає на скорочення часу заряджання та зменшення експлуатаційних витрат.

Комплексна оцінка продуктивності бортових зарядних пристроїв повинна враховувати сукупність наведених показників: ККД, коефіцієнт потужності, рівень гармонічних спотворень, щільність потужності та теплові характеристики. Аналіз цих параметрів дозволяє визначити технічні обмеження сучасних рішень і сформувати критерії їх удосконалення.

1.4. Фактори, що впливають на ефективність роботи бортових зарядних пристроїв

Ефективність бортового зарядного пристрою визначається сукупністю конструктивних, технічних та експлуатаційних факторів, які безпосередньо впливають на величину енергетичних втрат, стабільність роботи та ресурс силових компонентів. Аналіз цих чинників дозволяє виявити основні обмеження сучасних технічних рішень та окреслити напрями їх удосконалення.

Одним із ключових факторів є вибір топології силового перетворювача. У вхідному каскаді AC/DC найбільш поширеними є активні схеми корекції коефіцієнта потужності типу Boost PFC, Totem-Pole та Vienna Rectifier. Кожна з них має свої переваги та недоліки. Наприклад, класична схема Boost PFC відзначається простотою реалізації, проте характеризується підвищеними втратами на діодах випрямлення. Схема Totem-Pole дозволяє зменшити провідникові втрати завдяки заміні діодів активними ключами, однак потребує складнішої системи керування та застосування швидкодіючих напівпровідників. Порівняльну характеристику впливу топології на втрати наведено на рисунку 1.4.

Рисунок 1.4 – Вплив схеми AC/DC перетворювача на енергетичні втрати

Не менш важливим фактором є тип силових напівпровідникових приладів. Традиційні кремнієві транзистори мають відносно високі комутаційні втрати при роботі на підвищених частотах. Застосування приладів на основі карбіду кремнію та нітриду галію дозволяє значно зменшити як провідникові, так і комутаційні втрати, підвищити робочу частоту та зменшити габарити магнітних компонентів. Разом із тим, використання широкозонних напівпровідників підвищує вимоги до системи керування та електромагнітної сумісності.

Вагомий вплив на ефективність має частота перетворення. Збільшення частоти дозволяє зменшити масу трансформаторів та дроселів, що позитивно впливає на щільність потужності. Однак зростання частоти супроводжується збільшенням комутаційних втрат та електромагнітних завад, що вимагає оптимізації режимів керування та застосування фільтраційних елементів [10].

Температурний режим роботи є одним із критичних експлуатаційних факторів. Підвищення температури силових компонентів призводить до збільшення їх внутрішнього опору та, відповідно, до зростання втрат потужності. Крім того, тривала робота в умовах перегріву прискорює деградацію ізоляційних матеріалів та напівпровідників. Тому системи охолодження (повітряні або рідинні) є невід’ємною частиною сучасних бортових зарядних пристроїв.

Значний вплив на енергетичні показники має також алгоритм керування. Оптимізація широтно-імпульсної модуляції, використання резонансних режимів перемикання та адаптивне регулювання частоти дозволяють зменшити втрати

при перемиканні та покращити ККД у широкому діапазоні навантажень [9]. Водночас складні алгоритми потребують високопродуктивних мікроконтролерів і точних вимірювальних систем.

Окремим чинником є якість вхідної електроенергії. Нестабільність напруги мережі, наявність гармонік або фазний дисбаланс можуть знижувати ефективність бортових зарядних пристроїв та викликати додаткові втрати. У таких умовах система керування повинна адаптуватися до змін параметрів мережі, підтримуючи стабільність процесу заряджання.

Таким чином, ефективність роботи бортового зарядного пристрою формується під впливом комплексу взаємопов’язаних факторів: топології перетворювачів, типу напівпровідникових приладів, частоти комутації, температурного режиму та алгоритмів керування. Проведений аналіз свідчить, що підвищення продуктивності бортових зарядних пристроїв можливе лише за умови комплексної оптимізації зазначених параметрів.

1.5. Порівняльний аналіз сучасних технічних рішень бортових зарядних пристроїв

З огляду на зростання вимог до ефективності, компактності та універсальності електромобілів, виробники впроваджують різні архітектурні та технічні рішення бортових зарядних пристроїв. Порівняльний аналіз таких рішень дозволяє оцінити їх переваги, недоліки та перспективність застосування у транспортних засобах нового покоління.

Одним із основних напрямів розвитку є перехід від традиційних однофазних зарядних пристроїв до трифазних систем. Однофазні бортові зарядні пристрої зазвичай мають потужність 3,3-7,4 кВт і характеризуються простотою реалізації та нижчою вартістю. Проте вони обмежені пропускною здатністю побутової мережі. Трифазні системи потужністю 11-22 кВт забезпечують значно скорочений час заряджання, проте потребують складнішої схеми коректора коефіцієнта потужності та підвищених вимог до симетрії фаз [11].

Важливим напрямом є використання різних топологій ізольованих DC/DC перетворювачів. Найбільш поширеними є LLC-резонансні перетворювачі, фазозсувні повномостові (PSFB) та двонаправлені Dual Active Bridge (DAB). LLC-схема забезпечує високий ККД (до 96-97 %) завдяки роботі в умовах м’якої комутації, однак її ефективність знижується при відхиленні від номінального режиму. PSFB-схеми мають ширший діапазон регулювання, але характеризуються більшими втратами при частковому навантаженні [12]. Схема DAB є перспективною для реалізації двонаправленої передачі енергії, проте відзначається підвищеною складністю керування.

Окрему увагу слід приділити використанню широкозонних напівпровідникових матеріалів. Порівняння кремнієвих та карбіду кремнію транзисторів показує, що застосування карбіду кремнію дозволяє підвищити частоту комутації до 100-200 кГц, зменшити розміри магнітних компонентів та підвищити щільність потужності до 3-4 кВт/л. Разом із тим, вартість таких компонентів залишається вищою, що впливає на кінцеву ціну виробу.

У таблиці 1.2 наведено узагальнене порівняння сучасних технічних рішень бортових зарядних пристроїв за основними критеріями.

Таблиця 1.2 – Порівняльна характеристика сучасних технічних рішень бортових зарядних пристроїв (БЗП)

Критерій	Однофазний БЗП	Трифазний БЗП	БЗП на Si	БЗП на SiC
Потужність	3,3-7,4 кВт	11-22 кВт	до 11 кВт	до 22 кВт
ККД	92-94 %	94-96 %	93-95 %	96-98 %
Щільність потужності	1-2 кВт/л	2-3 кВт/л	1-2 кВт/л	3-4 кВт/л
Вартість	Нижча	Вища	Нижча	Вища
Складність керування	Середня	Висока	Середня	Висока

Аналіз наведених даних свідчить, що найвищі енергетичні показники демонструють трифазні бортові зарядні із застосуванням SiC-транзисторів та резонансних схем. Водночас їх впровадження пов’язане зі збільшенням вартості та підвищеними вимогами до систем керування і тепловідведення.

Сучасні тенденції розвитку також передбачають інтеграцію бортових зарядних пристроїв з іншими силовими модулями автомобіля. Зокрема, концепція інтегрованого зарядного пристрою передбачає використання елементів тягового інвертора для реалізації функції заряджання, що дозволяє зменшити масу та кількість компонентів. Проте така інтеграція потребує складного алгоритмічного забезпечення та додаткових заходів електробезпеки.

Отже, результати порівняльного аналізу свідчать, що подальший розвиток бортових зарядних пристроїв відбувається у напрямі підвищення щільності потужності, впровадження широкозонних напівпровідників та реалізації двонаправлених режимів роботи. Вибір конкретного технічного рішення визначається компромісом між ефективністю, масогабаритними показниками, складністю керування та економічною доцільністю

Висновки по розділу

У розділі систематизовано технічні особливості бортових зарядних пристроїв електромобілів та визначено їх місце в структурі електроенергетичної системи транспортного засобу. Розглянуто принципи побудови бортових зарядних пристроїв, їх типові структурні схеми та функціональні блоки.

Встановлено, що сучасні бортові зарядні пристрої реалізуються на основі багатоступеневих силових перетворювачів із корекцією коефіцієнта потужності та гальванічною розв’язкою, що забезпечує відповідність вимогам безпеки та електромагнітної сумісності.

Проаналізовано основні технічні параметри бортових зарядних пристроїв, зокрема номінальну потужність, діапазон вхідної напруги, коефіцієнт корисної дії, теплові режими роботи та масогабаритні показники. Показано, що вдосконалення схемотехнічних рішень і застосування сучасної елементної бази сприяє підвищенню компактності та зменшенню втрат енергії.

2 ВИКОРИСТАННЯ БОРТОВИХ ЗАРЯДНИХ ПРИСТРОЇВ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ ДЛЯ ОЦІНКИ ЇХ ПРОДУКТИВНОСТІ ТА ЕФЕКТИВНОСТІ

2.1. Зарядна інфраструктура

Бортові зарядні пристрої є ключовим елементом системи електроживлення сучасних електромобілів, забезпечуючи перетворення змінного струму мережі у постійний струм для заряджання тягових акумуляторних батарей. Вони виконують роль інтерфейсу між зовнішнім джерелом енергії та батареєю, регулюючи параметри зарядного процесу та забезпечуючи безпеку експлуатації [11].

Розвиток електромобільності сприяв появі різних рівнів заряджання, що класифікуються залежно від потужності та швидкості передачі енергії. На рисунку 2.1 наведено рівні заряджання електромобілів.

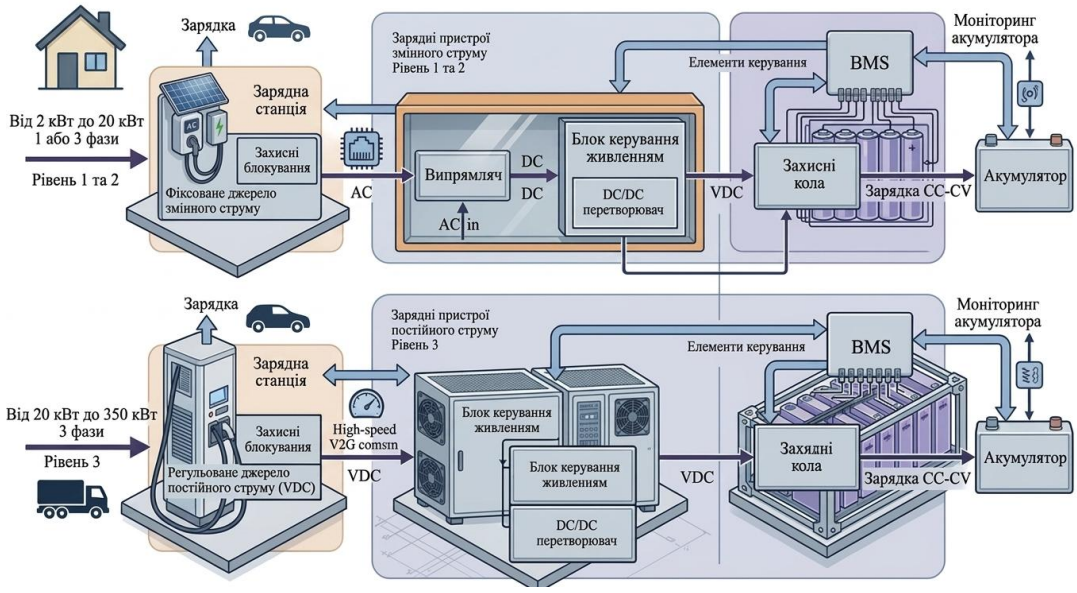

Рисунок 2.1 – Рівні заряджання електромобілів: рівень 1 – найповільніше домашнє заряджання, рівень 2 – зарядка від потужнішої побутової або промислової мережі, та рівень 3 – швидкісне заряджання, що дозволяє значно скоротити час поповнення ємності батареї

Рівні заряджання електромобілів

Рівень 1 (змінний струм). Зарядка вдома через стандартну розетку 120 В, потужність до 1,92 кВт, найбільш повільний спосіб [12].

Рівень 2 (змінний струм). Використовується вдома або в громадських місцях, підключення до 240 В, потужність до 19,2 кВт, забезпечує швидшу зарядку [12, 13].

Рівень 3 (швидка зарядка постійним струмом). Подає високовольтний постійний струм (300-800 В) потужністю 20-350 кВт безпосередньо в акумулятор, здебільшого в комерційних зонах [14].

У таблиці 2.1 наведено узагальнені дані про напругу та потужність для всіх трьох рівнів зарядки, а також типи заряджання, що підтримуються на кожному рівні. З цього можна зробити висновок, що бортові зарядні пристрої електромобілів призначені для рівнів 1 та 2, тоді як зовнішні зарядні станції підходять для швидкого заряджання.

Таблиця 2.1 – Категорії рівнів потужності зарядних пристроїв для електромобілів

Специфікація		Рівень 1	Рівень 2	Рівень 3
Потужність заряджання		1,4-1,92 кВт	3,1-19,2 кВт	20-350 кВт
Тип заряджання		Повільна зарядка (вбудована)	Напівшвидка зарядка (вбудована)	Швидка зарядка (офлайн)
Місце оплати		Житловий	Приватні та комерційні	Комерційний
Блок живлення	Напруга	120-130 В змінного струму	208-240 В змінного струму	208-240 В змінного струму 300–800 В постійного струму
	Поточний	12-16 А		250-500 А

Способи заряджання електромобілів

Існують різні способи заряджання електромобілів, а вибір конкретного типу зарядної станції залежить від доступної інфраструктури, сумісності з транспортним засобом, необхідної швидкості зарядки, зручності використання та вартості. Узагальнену класифікацію методів заряджання наведено на рисунку 2.2.

Рисунок 2.2 – Способи заряджання електромобіля

Методи заряджання поділяються на кондуктивні, із заміною акумулятора та бездротові [14]. Оскільки основна увага приділяється бортовим зарядним пристроям, доцільно розглянути саме кондуктивний спосіб та його різновиди. Більшість серійних електромобілів використовують саме кондуктивне заряджання, яке передбачає безпосередній фізичний контакт між зарядним пристроєм та акумуляторною батареєю автомобіля. Підключення здійснюється через кабель до електромережі.

Відповідно до рисунка 2.2, кабельні зарядні пристрої поділяються на два типи: зовнішні та бортові.

Зовнішні зарядні пристрої

У випадку зовнішніх зарядних пристроїв силова частина розташовується безпосередньо на зарядній станції. Такий підхід застосовується при підвищених вимогах до потужності. Оскільки обладнання розміщується поза автомобілем, відсутні обмеження щодо маси та габаритів пристрою [14]. Зовнішні зарядні пристрої підключаються безпосередньо до акумулятора, минаючи бортовий роз'єм.

Для коректної роботи вони повинні взаємодіяти з транспортним засобом, щоб забезпечити необхідні значення напруги та струму. Такі рішення особливо поширені на громадських зарядних станціях, де необхідно обслуговувати транспортні засоби з різними характеристиками батарей і номінальною напругою.

Бортові зарядні пристрої

Бортовий зарядний пристрій є електронним модулем, інтегрованим у силову систему електромобіля. Він не потребує окремого придбання, оскільки входить до складу автомобіля. Бортові зарядні пристрої може працювати від побутової мережі, громадських зарядних станцій або інших доступних джерел живлення. На рисунку 2.3 показано приклад інтеграції бортових зарядних пристроїв в електромобіль [15].

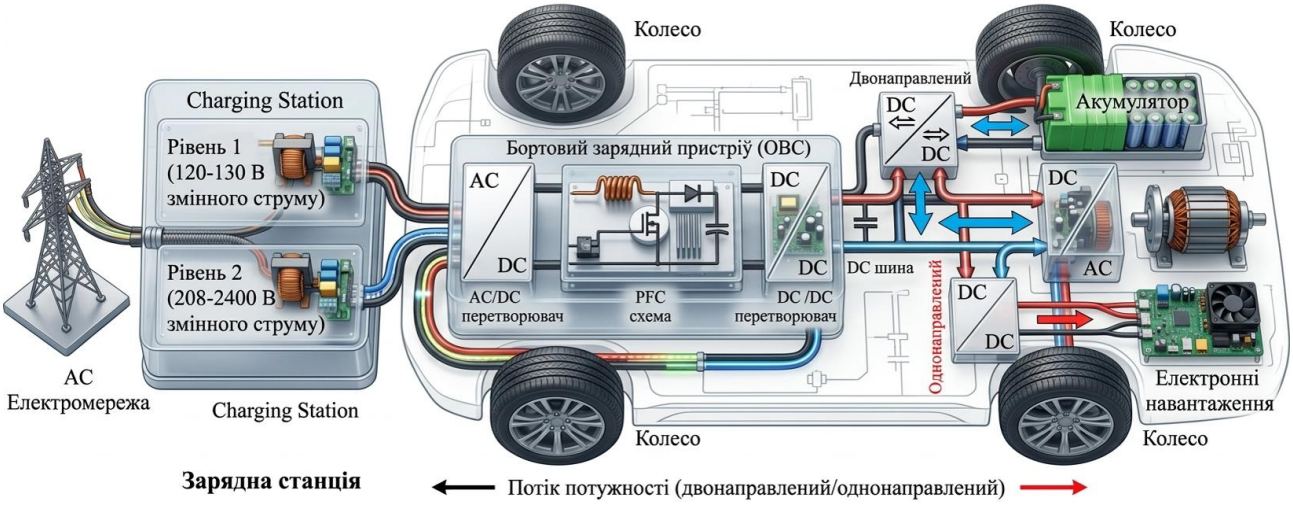

Рисунок 2.3 – Бортовий комп'ютер, інтегрований в електромобіль

Основна функція бортових зарядних пристроїв полягає у перетворенні змінного струму мережі в постійний струм для заряджання тягової батареї. Крім того, пристрій визначає допустимі параметри струму, потужності та відповідний стандарт заряджання. Використання бортових зарядних пристроїв позитивно впливає на довговічність акумулятора порівняно із зовнішніми зарядними рішеннями [16].

Бортові зарядні пристрої класифікуються за двома основними ознаками:

1) Однонаправлені та двонаправлені бортові зарядні пристрої

Ця класифікація базується на напрямку потоку енергії та функціональному призначенні пристрою [17]. На рисунку 2.4 наведено схему однонаправленого та двонаправленого зарядних пристроїв.

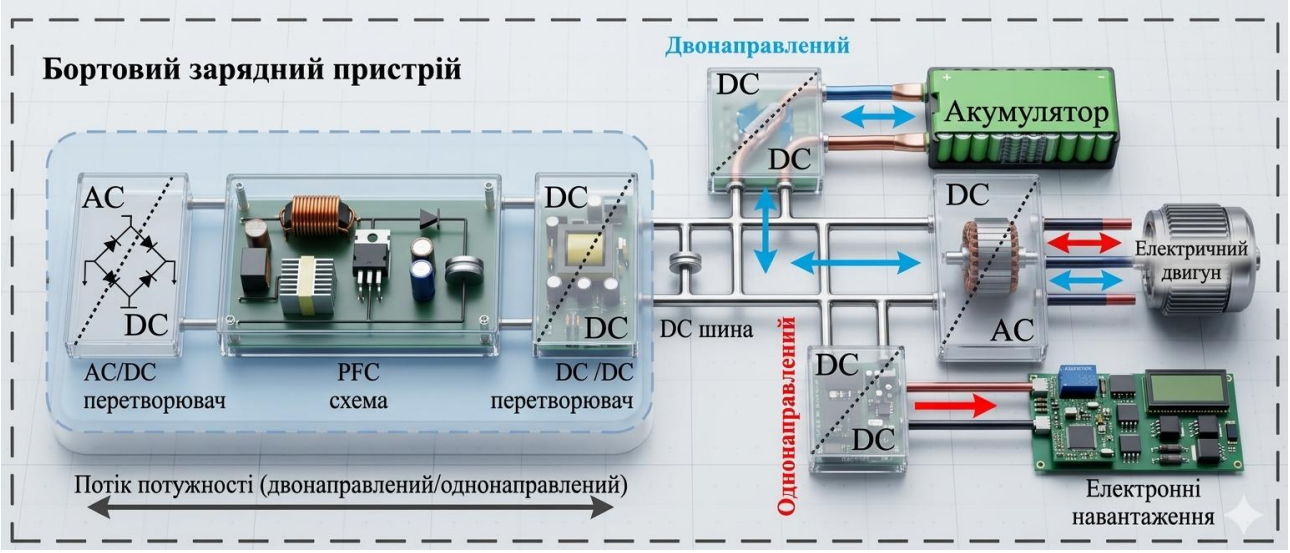

Рисунок 2.4 – Схема однонаправленого та двонаправленого бортового зарядного пристрою

Однонаправлені бортові зарядні пристрої забезпечують лише режим «мережа-транспортний засіб», тобто перетворюють змінний струм у постійний для заряджання батареї. Типова структура включає діодний міст, фільтр і DC-DC перетворювач [18]. Перевагами такого рішення є простота конструкції, зменшення вимог до обладнання, менший знос акумулятора та спрощене

підключення до мережі [18, 19]. Більшість задач енергопостачання може бути реалізовано саме за допомогою однонаправленої зарядки без ускладнення конструкції та підвищення вартості. Крім того, цей тип є дешевшим порівняно з двонаправленими системами.

Двонаправлені бортові зарядні пристрої забезпечують як заряджання батареї (AC-DC), так і зворотну передачу енергії до мережі (DC-AC) за необхідності. Такий режим роботи відомий як «транспортний засіб-мережа». Двонаправлені пристрої можуть бути виконані з гальванічною розв'язкою або без неї. Вони характеризуються підвищеною щільністю потужності та більш швидким керуванням процесами перетворення, проте більша кількість компонентів зумовлює збільшення вартості.

2) Одноступеневі та двоступеневі бортові зарядні пристрої

Ще однією ознакою класифікації є кількість етапів перетворення енергії.

В одноступеневих бортових зарядних пристроях перетворення змінного струму в постійний здійснюється в межах одного етапу. Такі пристрої мають меншу кількість компонентів, відзначаються підвищеною щільністю потужності та тривалішим терміном служби, що дозволяє зменшити габарити й вартість системи [12]. Одноступеневе виконання може бути як ізольованим, так і неізольованим. Схему такого пристрою наведено на рисунку 2.5а.

У двоступеневих бортових зарядних пристроях перетворення енергії відбувається послідовно у два етапи із застосуванням каскадного з'єднання силових перетворювачів. На першому етапі здійснюється випрямлення та корекція коефіцієнта потужності, що дозволяє досягти високого значення коефіцієнта потужності. Другий етап представлений DC-DC перетворювачем, який реалізує алгоритм заряджання акумулятора та забезпечує необхідні параметри струму і напруги [12]. Схему двоступеневого бортового зарядного пристрою показано на рисунку 2.5 б.

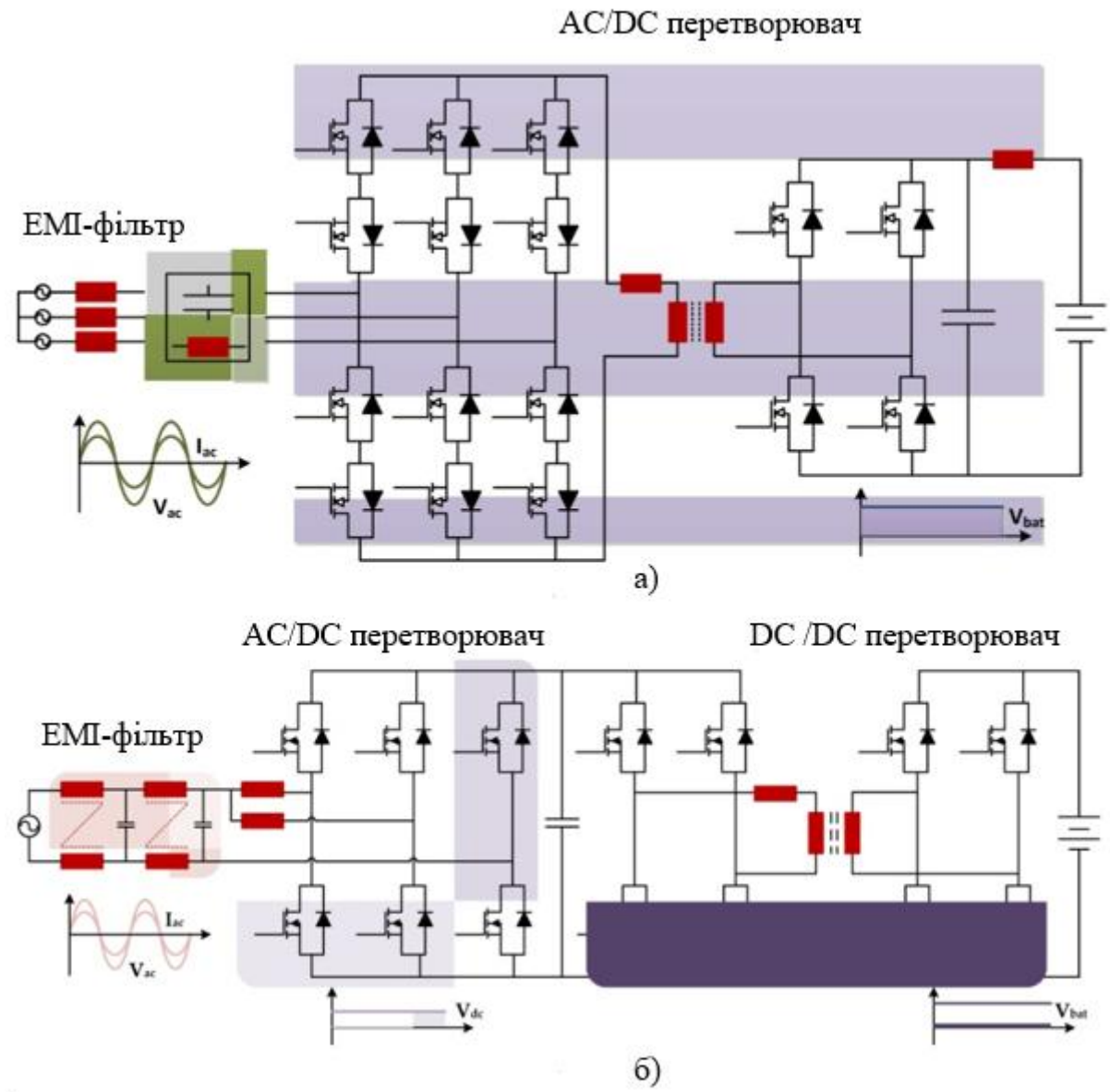

Рисунок 2.5 – Схема бортового зарядного пристрою:

а) одноступенева; б) двоступенева

Алгоритми керування для режимів G2V та V2G

Режими «мережа-транспортний засіб» та «транспортний засіб-мережа» відрізняються не лише схемотехнічним виконанням, а й принципами керування силовими перетворювачами. Саме алгоритми керування визначають ефективність, надійність і взаємодію електромобіля з енергосистемою.

Алгоритми керування G2V

У режимі G2V основним завданням є контроль передавання енергії з електромережі до акумуляторної батареї під час заряджання. Система керування регулює параметри струму та напруги таким чином, щоб забезпечити високу ефективність процесу та безпечні умови експлуатації акумулятора.

Зазвичай застосовуються стратегії оптимізації потужності, зокрема метод відстеження точки максимальної потужності, що дозволяє адаптувати режим заряджання до оптимальних характеристик батареї. Крім цього, алгоритм може враховувати поточний стан енергосистеми. У межах механізмів керування попитом потужність заряджання коригується в реальному часі відповідно до навантаження мережі та змін частоти. Такий підхід зменшує ризик перевантаження під час пікових періодів і сприяє стабільності електропостачання.

Алгоритми керування V2G

Режим V2G характеризується двонаправленим енергетичним обміном, що ускладнює систему керування. У цьому випадку акумулятор електромобіля може не лише споживати енергію, а й передавати її назад у мережу.

Алгоритм повинен постійно аналізувати параметри мережі, зокрема напругу та частоту, щоб визначити доцільність і рівень розрядження батареї. Оцінювання здійснюється в режимі реального часу, що дає змогу надавати допоміжні послуги, наприклад підтримку частоти.

Важливою складовою є контроль стану заряду акумулятора. Система повинна гарантувати достатній запас енергії для потреб користувача транспортного засобу, одночасно забезпечуючи можливість участі у стабілізації мережі. Для цього застосовуються методи прогнозування та оптимізації, які враховують як потреби енергосистеми, так і обмеження, пов’язані зі збереженням ресурсу акумулятора.

Узагальнення алгоритмічних особливостей

Режим G2V:

- оптимізація процесу заряджання із застосуванням відстеження точки максимальної потужності та регулювання струму і напруги;
- реалізація захисних функцій (запобігання перезарядженню, перегріву тощо);
- координація з мережею через механізми керування попитом для зменшення пікових навантажень.

Режим V2G:

- реалізація двонаправленого керування потоком енергії;
- безперервний моніторинг параметрів мережі для вибору моменту та рівня розрядження;
- оптимізація контроля стану акумулятора з урахуванням ресурсу акумулятора та потреб користувача.

Таким чином, алгоритми керування є визначальним елементом функціонування режимів G2V та V2G, забезпечуючи ефективну інтеграцію електромобілів до сучасних енергетичних систем.

2.2 Відповідні стандарти для електромобілів

Активне впровадження електромобілів суттєво вплинуло на розвиток транспортної та енергетичної галузей. Зі зростанням їх популярності виникла необхідність формування чітких вимог до експлуатації, безпеки та сумісності обладнання.

Подальше масштабування використання електромобілів неможливе без широкого впровадження відповідних стандартів і норм [20]. Вони регламентують технічні, експлуатаційні та безпекові аспекти функціонування електромобілів і зарядної інфраструктури [21, 22].

Загалом стандарти у сфері заряджання електромобілів можна поділити на три основні групи:

- стандарти компонентів зарядної системи;
- стандарти інтеграції електромобілів до електромережі;
- стандарти безпеки [33]

Стандарти заряджання електромобілів

У США виробники електромобілів орієнтуються на нормативи Товариства автомобільних інженерів та Інституту інженерів з електротехніки та електроніки [23]. У країнах Європи основним регулятором є Міжнародна електротехнічна комісія.

Японія застосовує власну систему стандартів, розроблену Японською асоціацією електромобілів та асоціацією CHAdeMO [20]. Міжнародна організація зі стандартизації зосереджується переважно на уніфікації вимог до електромобілів як цілісних систем, тоді як інші організації регламентують параметри окремих компонентів.

Стандарти інтеграції до електромережі

Для забезпечення надійної та безпечної взаємодії електромобіля з електромережею було створено низку нормативних документів [24]. Ці стандарти регламентують як процес заряджання, так і можливість передачі енергії від транспортного засобу до мережі [25].

Провідну роль у цій сфері відіграють IEEE та організація Underwriters Laboratories, які встановлюють вимоги до підключення, сумісності та експлуатаційної безпеки.

Стандарти безпеки електромобілів

Підключення електромобіля до мережі потребує суворого дотримання вимог електробезпеки. Більшість загальних стандартів безпеки розробляються ISO, IEEE та UL. Водночас існують організації, діяльність яких спрямована виключно на питання захисту та запобігання аварійним ситуаціям.

Таким чином, стандарти є основою формування безпечної та ефективної екосистеми електромобілів. Вони:

- забезпечують сумісність транспортних засобів і зарядної інфраструктури;
- мінімізують ризик аварій та електротехнічних небезпек;
- сприяють ефективній інтеграції в енергосистему;
- регламентують вимоги щодо екологічності та надійності.

Через велику кількість міжнародних організацій та технічних комітетів спостерігається певне дублювання нормативних документів. З огляду на те, що електромобілі можуть працювати не лише як споживачі, а й як джерела енергії (режим V2G), виникає потреба в чіткішій та більш гармонізованій системі стандартів [26].

Практичне застосування стандартів

На практиці різні країни застосовують відмінні стандарти, що зумовлює різницю в конструкції роз'ємів і портів заряджання. Для вирішення проблеми несумісності актуальним є створення універсального зарядного інтерфейсу [29].

Наприклад, у США широко використовується стандарт SAE J1772, який підтримує заряджання як змінним, так і постійним струмом. Компанія Tesla розробила власний роз'єм із подібними функціональними можливостями та запропонувала адаптери для сумісності зі стандартом SAE J1772 на своїх зарядних станціях.

Дотримання стандартів є критично важливим для узгодженої роботи всієї інфраструктури, що включає електромережу, електромобілі, зарядні станції та допоміжне обладнання. Лише комплексне виконання нормативних вимог забезпечує надійну, безпечну та стабільну роботу систем електромобільності.

2.3 Конструктивні аспекти та цільові показники ефективності

Під час розроблення будь-якої технічної системи визначаються ключові критерії, за якими оцінюється її результативність. Проєктування зарядних пристроїв для електромобілів також ґрунтується на попередньо встановлених

вимогах, технічних обмеженнях і цільових параметрах. Перед початком розрахунків необхідно чітко сформулювати основні характеристики, яких має досягти система.

Нижче наведено основні показники, що враховуються під час розробки бортового зарядного пристрою.

Ефективність. Високий коефіцієнт корисної дії дозволяє мінімізувати втрати електроенергії та зменшити тепловиділення, що позитивно впливає на економічність і тепловий режим роботи пристрою. Зазвичай інженери орієнтуються на значення ККД понад 90 %. Підвищення ефективності бортових зарядних пристроїв сприяє зменшенню споживання енергії, скороченню теплових втрат і, як наслідок, збільшенню запасу ходу транспортного засобу.

Щільність потужності. В умовах обмеженого простору в автомобілі важливо забезпечити максимальну потужність при мінімальних габаритах і масі пристрою. Для досягнення високої щільності потужності використовуються сучасні напівпровідникові матеріали з покращеними електрофізичними характеристиками, які поступово замінюють традиційні рішення. Це дає змогу створювати компактніші та легші зарядні пристрої з підвищеною вихідною потужністю.

Термічне керування. Контроль температурного режиму є критично важливим для надійності та довговічності зарядного пристрою. Необхідно забезпечити ефективне відведення тепла й утримання температури компонентів у допустимих межах. Раціональна система охолодження не лише підвищує безпеку, але й сприяє збереженню високого ККД пристрою.

Безпека. Проєктування бортових зарядних пристроїв повинно відповідати чинним вимогам безпеки у сфері електромобільності. До обов’язкових заходів належать захист від перенапруги, перевищення струму, короткого замикання та перегріву. Реалізація комплексних захисних механізмів гарантує надійну та безпечну експлуатацію обладнання.

Гнучкість та масштабованість. Сучасні зарядні пристрої повинні працювати в різних експлуатаційних умовах і бути сумісними з різними

моделями електромобілів. Важливою вимогою є можливість адаптації до майбутніх технологічних змін. Масштабованість конструкції дозволяє змінювати рівень потужності відповідно до потреб користувача або специфікації транспортного засобу. Такий підхід підвищує універсальність та зручність використання системи.

Сталий розвиток. У процесі проєктування дедалі більша увага приділяється екологічним аспектам. Використання матеріалів із меншим вуглецевим слідом, зменшення кількості відходів та підвищення енергоефективності сприяють зниженню негативного впливу на довкілля. Окрім екологічних переваг, це також забезпечує економічну доцільність завдяки зменшенню витрат на ресурси.

Вартісна оптимізація. Собівартість є визначальним чинником при серійному виробництві. Конструкція зарядного пристрою повинна забезпечувати оптимальний баланс між технічними характеристиками та витратами. Досягнення економічної ефективності можливе завдяки раціональному вибору компонентів, зменшенню втрат на перемикання, оптимізації теплових режимів та підвищенню загальної ефективності системи.

2.4 Сучасні виклики та перспективні напрями розвитку бортових зарядних пристроїв електромобілів

Поточні обмеження технології бортових зарядних пристроїв

Одним із ключових обмежень сучасних бортових зарядних пристроїв є компроміс між ефективністю та щільністю потужності. Традиційні кремнієві силові напівпровідники характеризуються значними втратами на перемикання, особливо за частот понад 100 кГц. Це обмежує підвищення ККД та потребує використання габаритних пасивних компонентів (індукторів, конденсаторів), що ускладнює мініатюризацію пристрою.

Зі зростанням щільності потужності підвищуються теплові навантаження на компоненти, що негативно впливає на надійність і ресурс роботи. Традиційні

системи охолодження (зокрема рідинні) збільшують масу, складність та вартість конструкції, водночас не завжди забезпечуючи ефективне усунення локальних перегрівів.

Складність інтеграції двонаправлених режимів роботи також створює технічні труднощі. Реалізація таких функцій потребує додаткових силових елементів і складних алгоритмів керування, що підвищує вартість і ускладнює забезпечення гальванічної ізоляції. Високочастотні трансформатори, необхідні для ізоляції, додають втрати та збільшують об’єм системи.

Додатковим викликом є дотримання вимог електромагнітної сумісності. Високі значення d_v/d_t та d_i/d_t у швидкодіючих пристроях підсилюють кондуктивні та випромінювані завади, що потребує складних EMI-фільтрів і збільшує габарити та собівартість бортового зарядного пристрою.

Економічний аспект також залишається суттєвим обмеженням. Використання широкозонних напівпровідників, таких як SiC та GaN, забезпечує кращі характеристики, проте значно підвищує вартість системи (MOSFET можуть бути у кілька разів дорожчими за кремнієві аналоги). Крім того, компактні високоефективні конструкції потребують прецизійних технологій виготовлення, що додатково збільшує виробничі витрати.

Перспективні напрями досліджень у технології бортових зарядних пристроїв

Для подолання зазначених обмежень активно досліджуються нові технічні рішення.

1. Удосконалення схем перетворювачів. Перспективними є резонансні та м’якоперемикаючі схеми, які забезпечують режими ZVS і ZCS, що суттєво знижує втрати на перемикання та дозволяє працювати на частотах до 500 кГц. Це сприяє підвищенню щільності потужності та ККД. Досліджуються також багаторівневі архітектури, які покращують обробку напруги та зменшують гармонічні спотворення. Черговані та модульні структури дозволяють рівномірно розподіляти теплові та електричні навантаження.

2. Інтеграція з силовим агрегатом автомобіля. Розвиваються уніфіковані системи силової електроніки, що поєднують бортові зарядні пристрої із тяговим інвертором та DC/DC-перетворювачем. Інтегровані зарядні інвертори використовують обмотки електродвигуна як елементи фільтра під час заряджання, що зменшує кількість компонентів, масу та втрати.

3. Використання WBG-напівпровідників. Матеріали SiC та GaN забезпечують роботу за вищих температур (понад 150° С) і частот перемикання (>200 кГц), що дозволяє зменшити розміри пасивних елементів і досягати ефективності понад 98 %. Подальші дослідження спрямовані на підвищення надійності, вдосконалення технологій корпусування (спікання срібла, вбудовані кристали) та зменшення паразитних параметрів.

4. Інтелектуальні алгоритми керування. Запроваджуються методи прогнозного керування на основі моделей, що дозволяють оптимізувати роботу перетворювачів у реальному часі. Також активно досліджується застосування штучного інтелекту та машинного навчання для прогнозування відмов і адаптивного керування, що підвищує надійність та зменшує витрати на обслуговування.

5. Розвиток двонаправленої зарядки та V2G. Удосконалюються протоколи зв’язку, зокрема ISO 15118 та OCPP, для забезпечення повноцінної інтеграції електромобілів у енергосистему. Розробляються алгоритми управління енергією в реальному часі для оптимізації режимів заряджання/розряджання з урахуванням потреб мережі та тарифів.

6. Інноваційні системи теплового керування. Досліджуються матеріали з фазовим переходом, мікроканальні рідинні системи охолодження та струменеве охолодження. Оптимізуються термоінтерфейсні матеріали, включаючи графенові композити, для зменшення теплового опору та робочої температури компонентів.

7. Модульність і масштабованість. Модульні конструкції з функціональністю «plug-and-play» дозволяють гнучко масштабувати потужність і спрощують технічне обслуговування. Стандартизація інтерфейсів сприяє

сумісності між різними платформами електромобілів і знижує виробничі витрати.

Висновки по розділу

У розділі, відповідно до завдання, було показано, що бортові зарядні пристрої електромобілів відіграють ключову роль у забезпеченні заряджання акумуляторних батарей та інтеграції транспортного засобу в енергосистему. Було розглянуто основні рівні та методи заряджання, конструктивні особливості бортових зарядних пристроїв, а також їх класифікацію за напрямком потоку енергії та кількістю етапів перетворення. Висвітлено алгоритми керування режимами G2V та V2G, які забезпечують ефективну, безпечну та гнучку взаємодію електромобіля з мережею.

Основними показниками продуктивності та ефективності бортових зарядних пристроїв визначено коефіцієнт корисної дії, щільність потужності, термічний режим, безпеку, масштабованість та можливість інтеграції в різні експлуатаційні умови. Було також розглянуто сучасні виклики та перспективні напрямки розвитку, зокрема застосування WBG-напівпровідників, інтелектуальних алгоритмів керування, модульних конструкцій, удосконалення схем перетворювачів та двонаправленої зарядки. Це дозволяє підвищити ефективність, зменшити втрати енергії, оптимізувати інтеграцію в енергомережу та забезпечити довговічність і безпеку батарей.

3 РОЗРАХУНОК ОСНОВНИХ ПОКАЗНИКІВ РОБОТИ БОРТОВОГО ЗАРЯДНОГО ПРИСТРОЮ

3.1 Вихідні дані для розрахунку

Для проведення розрахунків приймаємо трифазний бортовий зарядний пристрій змінного струму номінальною потужністю 11 кВт, що працює від мережі 380 В (лінійна напруга) з частотою 50 Гц.

Основні вихідні параметри: $U_л = 380\ B$

- номінальна потужність $P_{ном} = 11\ кВт$;
- лінійна напруга мережі $U_л = 380\ B$;
- фазна напруга $U_ф = 220\ B$;
- частота мережі $f = 50\ Гц$; $U_{АКБ} = 350 - 400\ B$
- напруга акумуляторної батареї $U_{АКБ} = 350 - 400\ B$;
- розрахунковий ККД $\eta = 0{,}94 - 0{,}96$.

Структурно зарядний пристрій складається з:

1. трифазного активного випрямляча (AC/DC);
2. ланки постійного струму;
3. DC/DC перетворювача;
4. системи керування, що забезпечує режим G2V та V2G.

3.2 Розрахунок струмів у трифазній мережі

Активна потужність трифазного навантаження визначається:

$$P_{ном} = \sqrt{3} \cdot U_л \cdot I_л \cdot \cos\varphi \qquad (3.1)$$

За умови застосування активного коректора коефіцієнта потужності приймаємо:

$$\cos\varphi = 0,99$$

Звідси лінійний струм:

$$I_л = \frac{P_{ном}}{\sqrt{3} \cdot U_л \cdot \cos\varphi} \quad (3.2)$$

$$I_л = \frac{11000}{1,732 \cdot 380 \cdot 0,99} \approx 16,8\ A.$$

Отже, у кожній фазі протікає струм приблизно 17 А, що відповідає типовим технічним характеристикам зарядних пристроїв класу 11 кВт [30].

Таким чином, продуктивність пристрою визначається здатністю стабільно передавати 11 кВт потужності без перевищення допустимих струмів мережі.

3.3 Розрахунок потужності та ККД у режимі G2V

У режимі «мережа-автомобіль» (G2V) потужність на вході перевищує корисну потужність через наявність втрат.

Вхідна потужність:

$$P_{вх} = \frac{P_{вих}}{\eta}. \quad (3.3)$$

При $\eta = 0,95$

$$P_{вх} = \frac{11000}{0,95} \approx 11579\ Вт.$$

Втрати потужності:

$$P_{вт} = P_{вх} - P_{вих} = 11579 - 11000 = 579\ Вт. \quad (3.4)$$

Отже, при номінальному навантаженні в теплову енергію перетворюється майже 0,6 кВт потужності, що вимагає ефективної системи охолодження.

3.4 Розрахунок ланки постійного струму

Напруга DC-шини після випрямлення визначається:

$$U_{ш} = \sqrt{2} \cdot U_{л} = 1{,}414 \cdot 380 \approx 537\ В. \quad (3.5)$$

Для обмеження пульсацій напруги до 5 % розраховуємо необхідну ємність конденсатора:

$$C_{ш} = \frac{P_{вх}}{2f \cdot \Delta U_{ш} \cdot U_{ш}}, \quad (3.6)$$

де $\Delta U_{ш} = 0{,}05 \cdot U_{ш}$

Після підстановки отримуємо:

$$C_{ш} \approx 900 - 1100\ мкФ.$$

Це відповідає практичним реалізаціям сучасних бортових зарядних пристроїв [31].

3.5 Розрахунок втрат у силових ключах

Втрати провідності:

$$P_{пров} = I_{ключ}^2 \cdot R_{DS} \quad (3.7)$$

При $I_{ключ} = 17\ A$ та $R_{DS} = 0{,}08\ Ом$

$$P_{пров} \approx 23\ Вт.$$

Комутаційні втрати:

$$P_{комут} = \frac{1}{2} U_{ш} \cdot I_{ключ} \cdot \left(t_{вкл} + t_{викл}\right) \cdot f_{пер} \qquad (3.8)$$

Для розрахунку приймаємо частоту перемикання $f_{пер} = 40 \cdot 10^3\ Гц$, а сумарний час перемикання $t_{вкл} + t_{викл} = 120 \cdot 10^{-9}\ с$.

$$P_{комут} = \frac{1}{2} \cdot 537 \cdot 17 \cdot 120 \cdot 10^{-9} \cdot 40 \cdot 10^3 = 21{,}9\ Вт.$$

Отже, комутаційні втрати одного силового ключа становлять приблизно $P_{комут} \approx 21{,}9\ Вт$

З урахуванням раніше визначених втрат провідності $P_{пров} \approx 23\ Вт.$

повні втрати одного ключа:

$$P_{ключ} = P_{пров} + P_{комут} = 23 + 22 = 45\ Вт. \qquad (3.9)$$

Таким чином сумарні втрати одного ключа можуть перевищувати 40–50 Вт, що істотно впливає на загальний ККД пристрою.

3.6 Розрахунок ефективності у режимі V2G

У режимі «автомобіль-мережа» потужність проходить ті ж каскади, але в зворотному напрямку.

Загальний ККД двонаправленої системи при $\eta_{AC/DC} = 0{,}97$, $\eta_{DC/DC} = 0{,}96$:

$$\eta_{V2G} = \eta_{AC/DC} \cdot \eta_{DC/DC} = 0{,}931. \quad (3.10)$$

Тобто ефективність у режимі V2G становить приблизно 93 %, що на 2-3 % менше, ніж у режимі заряджання, через додаткові комутаційні втрати.

3.7 Оцінка продуктивності заряджання

Час заряджання акумулятора ємністю 60 кВт·год:

$$t_{зар} = \frac{E_{АКБ}}{P_{вих}} = \frac{60}{11} \approx 5{,}5 \; год. \quad (3.11)$$

З урахуванням втрат та фази CV реальний час становитиме 6-6,5 годин.

Таким чином, розрахунки підтверджують, що бортовий зарядний пристрій потужністю 11 кВт забезпечує високу продуктивність заряджання та ККД понад 93 % у двонаправленому режимі.

3.8 Порівняльна оцінка режимів G2V та V2G

Проведені розрахунки показали, що при однаковій номінальній потужності 11 кВт енергетичні показники бортового зарядного пристрою відрізняються залежно від напрямку передачі енергії. Це пов’язано з особливостями роботи силових каскадів та алгоритмів керування.

У режимі G2V потужність передається від мережі до акумуляторної батареї, при цьому активний випрямляч працює як споживач із корекцією коефіцієнта потужності. У режимі V2G той самий каскад функціонує як інвертор, формуючи синусоїдальний струм у мережу. Додаткові комутаційні процеси та вимоги до синхронізації з мережею призводять до дещо більших втрат.

Таблиця 3.1 – Порівняння технічних показників режимів G2V та V2G для бортових зарядних пристроїв 11 кВт

Параметр	Режим G2V	Режим V2G
Напрямок передачі енергії	Мережа-АКБ	АКБ -Мережа
Номінальна потужність, $P_{ном}$, кВт	11	11
Вхідна потужність, $P_{вх}$, кВт	11,58	11,82
Втрати потужності, $P_{вт}$, Вт	579	820
ККД системи, η, %	95	93
Коефіцієнт потужності, $\cos\varphi$	0,99	0,98-0,99
Струм фази, $I_{л}$, А	16,8	17,2
Теплове навантаження силового модуля, Вт	~580	~820

Аналіз таблиці показує, що продуктивність у частині переданої потужності в обох режимах є однаковою та визначається номіналом силової частини пристрою. Водночас ефективність у режимі V2G є на 2-3 % нижчою, що пояснюється:

- збільшенням комутаційних втрат;
- необхідністю точного формування синусоїдального струму;
- додатковими втратами в системі фільтрації гармонік.

З технічної точки зору це означає, що при тривалій роботі у режимі V2G система охолодження повинна бути розрахована на більшу теплову потужність:

$$P_{тепл} = P_{вт}. \quad (3.12)$$

Таким чином, при використанні бортових зарядних пристроїв у двонаправленому режимі доцільно передбачати резерв по тепловому розрахунку не менше 30 %.

Отримані результати підтверджують, що впровадження режиму V2G є технічно можливим без зміни номінальної потужності пристрою, проте супроводжується незначним зниженням енергоефективності, що повинно враховуватися при проєктуванні системи керування та охолодження.

Висновки по розділу

У розділі було виконано інженерний розрахунок продуктивності та ефективності трифазного бортового зарядного пристрою потужністю 11 кВт з підтримкою двонаправленого режиму роботи G2V/V2G. Визначено струми у фазах мережі, параметри ланки постійного струму, втрати потужності в силових елементах та загальний коефіцієнт корисної дії системи.

Розрахунки показали, що при номінальному навантаженні лінійний струм становить близько 16,8 А, а ККД у режимі заряджання досягає 95 %. У режимі передачі енергії в мережу ефективність зменшується до приблизно 93 % через збільшення комутаційних та теплових втрат. Встановлено, що сумарна потужність теплових втрат може перевищувати 0,8 кВт, що потребує відповідного резерву системи охолодження.

Порівняльний аналіз режимів G2V та V2G підтвердив технічну можливість реалізації двонаправленого перетворення без зміни номінальної потужності пристрою, проте із незначним зниженням енергоефективності. Отримані результати дозволяють оцінити реальну продуктивність бортового зарядного пристрою та обґрунтувати вимоги до його силової та теплової частини.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Вступ

В бакалаврській роботі розглядається робоче місце, призначене для розрахунку та аналізу параметрів бортового зарядного пристрою електромобіля з використанням комп'ютерної техніки та лабораторного випробувального стенду. Робоча зона включає персональний комп'ютер, вимірювальні прилади (осцилограф, мультиметр, аналізатор якості електроенергії), джерело живлення змінного струму напругою 220 В та макет або зразок бортового зарядного пристрою.

Організація безпечних умов праці на такому робочому місці регламентується вимогами Закону України «Про охорону праці» [32], «Природне і штучне освітлення» [33], ДСанПіН 3.3.2-007-98 щодо роботи з відеодисплейними терміналами, НПАОП 40.1-1.21-98 «Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів» та ДСТУ EN 61140:2017 щодо захисту від ураження електричним струмом.

Метою даного розділу є аналіз потенційно небезпечних і шкідливих виробничих факторів та розроблення організаційно-технічних заходів для забезпечення безпечних умов праці під час роботи з комп'ютерною технікою та електротехнічним лабораторним обладнанням.

4.2 Аналіз небезпечних та шкідливих факторів

При виконанні розрахунків і випробувань бортових зарядних пристроїв можливий вплив таких факторів:

Електричний струм. Основну небезпеку становить напруга 220 В змінного струму, а також випрямлена напруга в колі DC після випрямляча бортового зарядного пристрою, яка може перевищувати 300 В. Дотик до струмовідних частин може спричинити електротравму. Відповідно до НПАОП 40.1-1.21-98,

електроустановки повинні мати захисне заземлення та автоматичний захист від перевантаження і короткого замикання.

Підвищена температура елементів бортового зарядного пристрою. Силові напівпровідникові елементи та радіатори під час роботи нагріваються до температур понад 60 °С, що може спричинити термічні опіки.

Електромагнітне випромінювання та електромагнітні завади. Імпульсні перетворювачі створюють високочастотні завади, що можуть впливати на вимірювальне обладнання та самопочуття оператора. Рівні ЕМП не повинні перевищувати нормативів, установлених ДСН 3.3.6.096-2002.

Фактори, пов'язані з роботою за ПК. Тривала робота за комп'ютером може спричинити зорове та статичне навантаження, порушення опорно-рухового апарату. Відповідно до ДСанПіН 3.3.2-007-98, тривалість безперервної роботи за ПК не повинна перевищувати 2 годин без регламентованої перерви.

Мікроклімат приміщення. Температура повітря повинна підтримуватися в межах 18-24 °С, відносна вологість – 40-60 %, швидкість руху повітря – не більше 0,1-0,2 м/с відповідно до ДСН 3.3.6.042-99.

Пожежна небезпека. Наявність електрообладнання створює ризик короткого замикання та перегріву проводки. Приміщення повинно бути оснащене первинними засобами пожежогасіння (вуглекислотний вогнегасник типу ВВК-2).

На рисунку 4.1 наведено структурну схему можливих небезпечних факторів на робочому місці.

Рисунок 4.1 – Основні небезпечні та шкідливі фактори при роботі з бортовими зарядним пристроями

4.3 Організаційно-технічні заходи по забезпеченню безпеки

Для забезпечення безпечних умов праці передбачаються такі заходи.

Захист від ураження електричним струмом. Передбачено застосування захисного заземлення корпусів обладнання відповідно до ДСТУ EN 61140:2017 [34]. Опір заземлювального пристрою не повинен перевищувати 4 Ом для мережі 220 В. На рисунку 4.2 показано схему підключення лабораторного стенду з використанням захисного провідника PE та автоматичного вимикача.

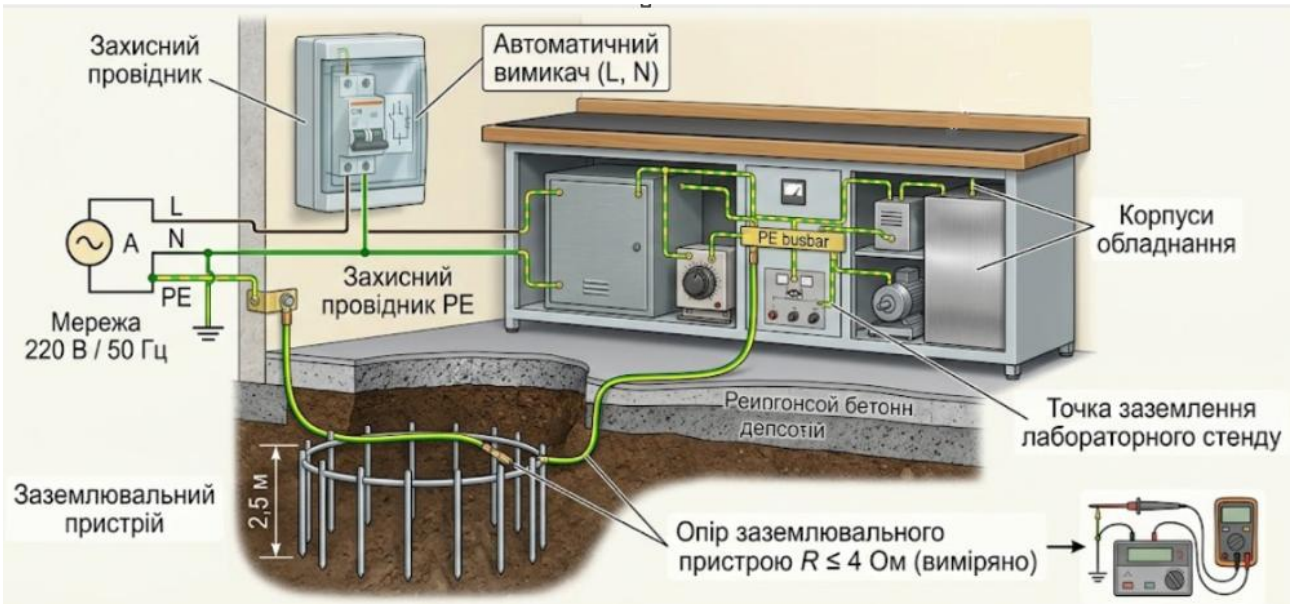

Рисунок 4.2 – Схема захисного заземлення лабораторного стенду

Також передбачено встановлення автоматичного вимикача та пристрою захисного відключення (ПЗВ) з номінальним струмом спрацювання 30 мА.

Організація робочого місця. Монітор розташовується на відстані 600-700 мм від очей користувача, верхній край екрана – на рівні очей. Стіл та крісло повинні відповідати ергономічним вимогам ДСТУ ISO 9241.

Освітлення. Рівень освітленості робочої поверхні повинен становити не менше 300-500 лк відповідно до ДБН В.2.5-28:2018. Освітлення комбіноване – загальне та місцеве.

Пожежна безпека. Приміщення обладнується вогнегасником, проводиться періодичний огляд електромережі, забороняється використання несправних подовжувачів.

Інструктаж та навчання персоналу. Особа, що працює з лабораторним стендом, повинна пройти первинний інструктаж з охорони праці та мати групу з електробезпеки не нижче II.

4.4 Висновки по розділу

У розділі проведено аналіз небезпечних і шкідливих факторів, що можуть виникати під час роботи з комп’ютерною технікою та лабораторним стендом бортового зарядного пристрою. Визначено основні ризики, пов’язані з ураженням електричним струмом, тепловими впливами, електромагнітними завадами та статичним навантаженням оператора. Розроблено організаційно-технічні заходи, спрямовані на забезпечення безпечних умов праці відповідно до чинних нормативних документів.

ВИСНОВКИ

У першому розділі систематизовано технічні особливості бортових зарядних пристроїв електромобілів, визначено їх структурну побудову, принципи функціонування та ключові технічні параметри.

У другому розділі показано використання бортових зарядних пристроїв електромобілів для оцінки їх продуктивності та ефективності, з урахуванням конструктивних особливостей, режимів роботи та алгоритмів керування.

У третьому розділі було виконано розрахунок основних показників роботи бортового зарядного пристрою потужністю 11 кВт та визначено його продуктивність та ефективність у режимах G2V і V2G.

У четвертому розділі проаналізовано умови праці при роботі з комп’ютерною технікою та лабораторним стендом бортового зарядного пристрою, визначено потенційно небезпечні та шкідливі фактори й обґрунтовано організаційно-технічні заходи щодо забезпечення безпечних умов праці.

ВПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ehsani M., Gao Y., Longo S. Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles. 3rd ed. CRC Press, 2018. 572 p.

2. Khaligh A., D'Antonio M. Global Trends in High-Power On-Board Chargers for Electric Vehicles. IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2019. Vol. 68, No. 3. P. 2106-2124.

3. Larminie J., Lowry J. Electric Vehicle Technology Explained. 2nd ed. Wiley, 2012. 405 p.

4. Tie S. F., Tan C. P. A review of energy sources and energy management system in electric vehicles. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2013. Vol. 20. P. 82-102.

5. Khaligh A., Dusmez S. Comprehensive topological analysis of conductive charging solutions for plug-in electric vehicles. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2012.

6. Emadi A. Advanced electric drive vehicles. CRC Press, 2014.

7. Yilmaz M., Krein P.T. Review of battery charger topologies for plug-in electric and hybrid vehicles. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013.

8. Kempton W., Tomić J. Vehicle-to-grid power fundamentals. Journal of Power Sources, 2005.

9. Musavi F., Edington M., Eberle W., Dunford W.G. Evaluation and efficiency comparison of front-end AC–DC plug-in hybrid charger topologies. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012.

10. Erickson R., Maksimović D. Fundamentals of Power Electronics. Springer, 2001.

11. Міжнародне енергетичне агентство (МЕА). Глобальний огляд електромобілів 2022: Забезпечення постачання для електричного майбутнього. Доступно онлайн: https://tinyurl.com/267pxbnb

12. Наccарі, М.; Орабі, М.; Гонейма, М. Обговорення одноступеневого ізольованого односпрямованого зарядного пристрою змінного-постійного

струму для електромобілів. У матеріалах 4-ї південної конференції IEEE з силової електроніки (SPEC), Сінгапур, 10–13 грудня 2018 р.; с. 1–7.

13. Компанія громадських послуг Нью-Мексико. Заряджання вашого електромобіля. 2020. Доступно онлайн: **https://www.pnm.com/ev-charging**

14. Acharige, S.S.G.; Haque, M.E.; Arif, M.T.; Hosseinzadeh, N.; Hasan, K.N.; Oo, A.M.T. Review of Electric Vehicle Charging Technologies, Standards, Architectures, and Converter Configurations. IEEE Access 2023, 11, 41218–41255.

15. Van den Bossche, P. Electric Vehicle Charging Infrastructure. In Electric and Hybrid Vehicles, 1st ed.; Pistoia, G., Ed.; Elsevier: Brussels, Belgium, 2010; pp. 517–544.

16. Valente, M.; Wijekoon, T.; Freijedo, F.; Pescetto, P.; Pellegrino, G.; Bojoi, R. Integrated On-Board EV Battery Chargers: New Perspectives and Challenges for Safety Improvement. In Proceedings of the 2021 IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis (WEMDCD), Modena, Italy, 8–9 April 2021; pp. 349–356.

17. Sanguesa, J.A.; Torres-Sanz, V.; Garrido, P.; Martinez, F.J.; Marquez-Barja, J.M. A Review on Electric Vehicles: Technologies and Challenges. Smart Cities 2021, 4, 372–404.

18. Koushki, B.; Safaee, A.; Jain, P.; Bakhshai, A. Review and comparison of bi-directional AC-DC converters with V2G capability for on-board EV and HEV. In Proceedings of the IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC), Dearborn, MI, USA, 15–18 June 2014; pp. 1–6.

19. Singh, B.; Singh, B.N.; Chandra, A.; Al-Haddad, K.; Pandey, A.; Kothari, D.P. A Review of Three-Phase Improved Power Quality AC–DC Converters. IEEE Trans. Ind. Electron. 2004, 51, 641–660.

20. Fasugba, M.A.; Krein, P.T. Gaining vehicle-to-grid benefits with unidirectional electric and plug-in hybrid vehicle chargers. In Proceedings of the IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Chicago, IL, USA, 6–9 September 2011; pp. 1–6.

21. Bahrami, A. EV Charging Definitions, Modes, Levels, Communication Protocols and Applied Standards. Brusa Electron 2020, 1, 1–10.

22. Foley, A.; Winning, I.; Gallachóir, B.Ó. Electric Vehicle: Infrastructure Regulatory Requirements. In Proceedings of the Inaugural Conference of the Irish Transport Research Network (ITRN), Dublin, Ireland, 31 August–1 September 2010.

23. Falvo, M.C.; Sbordone, D.; Bayram, I.S.; Devetsikiotis, M. EV charging stations and modes: International standards. In Proceedings of the International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, Ischia, Italy, 18–20 June 2014; pp. 1134–1139.

24. Gupta, J.; Maurya, R.; Arya, S.R. Improved Power Quality On-Board Integrated Charger With Reduced Switching Stress. IEEE Trans. Power Electron. 2020, 35, 10810–10820.

25. Rajendran, G.; Vaithilingam, C.A.; Misron, N.; Naidu, K.; Ahmed, M.R. A comprehensive review on system architecture and international standards for electric vehicle charging stations. J. Energy Storage 2021, 42, 103099.

26. Khaligh, A.; D'Antonio, M. Global Trends in High-Power On-Board Chargers for Electric Vehicles. IEEE Trans. Veh. Technol. 2019, 68, 3306–3324.

27. Budhiraja, N. EV charging standards in China and Japan. 2018. Available online: https://tinyurl.com/27j4t9lq

28. Emadi A. Modern Electric Vehicle Technology. – CRC Press, 2018.

29. Erickson R., Maksimovic D. Fundamentals of Power Electronics. – Springer, 2020.

30. Закон України «Про охорону праці». – К., 2002.

31. ДБН В.2.5-28:2018. Природне і штучне освітлення.

32. ДСТУ EN 61140:2017. Захист від ураження електричним струмом.

33. ДСанПіН 3.3.2-007-98. Державні санітарні правила і норми роботи з ВДТ.

34. ДСН 3.3.6.042-99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень.