

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА

Навчально-науковий інститут енергетичної, інформаційної
та транспортної інфраструктури

Кафедра альтернативної електроенергетики та електротехніки

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до

бакалаврської кваліфікаційної роботи

на тему:

«Аналіз сучасних топологій силових перетворювачів зарядних станцій
електромобілів»



Студент:

Олександр АЗАРОВ

студент 3 курсу

гр. НВДЕ 2023-1у



Керівник: к.т.н. доц.

Іван КОСТЕНКО



Рецензент: к.т.н. доц.

Яна ФОРКУН

Харків – 2026

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА
імені О. М. Бекетова

Навчально-науковий інститут енергетичної, інформаційної та транспортної
інфраструктури

Кафедра альтернативної електроенергетики та електротехніки

Освітньо-кваліфікаційний рівень бакалавр

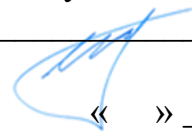
Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Освітня програма Нетрадиційні та відновлювальні джерела енергії

ЗАТВЕРДЖУЮ

завідувач кафедри АЕЕ

канд.техн.наук., доцент Олексій ЄГОРОВ



« » _____ 2026
р.

З А В Д А Н Н Я
до бакалаврської кваліфікаційної роботи

Азаров Олександр Миколайович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1.Тема: Аналіз сучасних топологій силових перетворювачів зарядних
станцій електромобілів

керівник бакалаврської кваліфікаційної роботи:

Костенко Іван Олександрович, к.т.н.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

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

2. Строк подання студентом роботи 14.06.26

3. Схема гібридної швидкісної зарядної станції електромобілів.

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

4.1 Огляд сучасних зарядних станцій електромобілів. Класифікація зарядних
станцій. Аналіз AC/DC та DC/DC-топологій силових перетворювачів.
Особливості та перспективи застосування сучасних схем перетворення
енергії.

4.2. Структура зарядної станції електромобілів. AC/DC-перетворювачі Boost
PFC, Interleaved Boost PFC, Totem-Pole PFC, Vienna Rectifier та NPC
Converter. DC/DC-перетворювачі PSFB, LLC та DAB. Структурні схеми
силових модулів зарядних станцій.

4.3. Розрахункова частина (розрахунок вузлів, метод розрахунку, алгоритм
керування, програмне забезпечення

Розрахунок енергетичної ефективності зарядної станції потужністю 150 кВт.
Визначення втрат потужності та ККД різних топологій силових перетворювачів.

4.4. Охорона праці

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

Топології AC/DC-перетворювачів зарядних станцій;

Топології DC/DC-перетворювачів зарядних станцій;

Порівняння характеристик сучасних силових перетворювачів;6.

Консультанти розділів бакалаврської кваліфікаційної роботи:

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Основна частина	Костенко І.О., доц., к.т.н.		
Охорона праці	Серіков Я.О. доц.,к.т.н		

7. Дата видачі завдання: 25.05.26

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів бакалаврської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Стан питання	25.05-28.05.26	
2.	Технічна частина	29.05-30.05.26.	
3	Розрахункова частина	31.05-02.06.26	
4.	Охорона праці	03.06-7.06.26	
5.	Оформлення паперового та електронного варіантів роботи	8.06-10.06.26	
6.	Підготовка доповіді та презентації	11.06-14.06.26	

Студент



Олександр АЗАРОВ

Керівник



Іван КОСТЕНКО

АНОТАЦІЯ

Бакалаврська кваліфікаційна робота на тему «Аналіз сучасних топологій силових перетворювачів зарядних станцій електромобілів» містить пояснювальну записку обсягом 63 сторінки.

У першому розділі виконано аналіз сучасного стану та перспектив розвитку зарядної інфраструктури електромобілів, розглянуто структуру зарядних станцій постійного струму та роль силових перетворювачів у процесі передачі електричної енергії від мережі до акумуляторної батареї електромобіля.

У другому розділі досліджено принципи роботи основних топологій AC/DC та DC/DC-перетворювачів, що використовуються в сучасних зарядних станціях. Розглянуто особливості функціонування Boost PFC, Interleaved Boost PFC, Totem-Pole PFC, Vienna Rectifier, NPC Converter, а також PSFB, LLC та DAB-конвертерів.

У третьому розділі проведено порівняльний аналіз енергетичної ефективності сучасних топологій силових перетворювачів. Виконано розрахунок основних енергетичних показників зарядної станції потужністю 150 кВт

У розділі «Охорона праці» розглянуто питання забезпечення безпечних умов праці під час розробки, монтажу та дослідження силових перетворювачів зарядних станцій електромобілів. Бакалаврська кваліфікаційна робота містить:

формул.....	9
рисунків.....	13
таблиць.....	5
графічних робіт	8

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1 СТАН ПИТАННЯ.....	9
1.1 Класифікація зарядних станцій електромобілів та роль силових перетворювачів у їх складі	9
1.2 Типи перетворювачів для зарядної станції	12
1.2.1 Трифазні схеми AC/DC-перетворення	17
1.2.2 Vienna Rectifier	20
1.2.3 Трирівневий NPC-конвертер	22
1.2.4 DC/DC-перетворювачі	24
1.2.5 Повномостові та резонансні DC/DC-топології	26
1.2.6 Подвійний активний міст (DAB)	27
1.3 Основні функціональні блоки гібридної зарядної станції	15
2 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА.....	31
2.1 Порівняння ефективності сучасних топологій силових перетворювачів зарядних станцій електромобілів	31
2.2 AC/DC -топології	33
2.3 DC/DC-топології	34
3 РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА.....	35
3.1 Розрахунок енергетичної ефективності сучасних топологій силових перетворювачів зарядної станції потужністю 150 кВт.	35
4 ОХОРОНА ПРАЦІ.....	39
4.1 Завдання в галузі охорони праці	39
4.2 Аналіз умов праці при розробці та дослідженні силових перетворювачів зарядних станцій електромобілів. Виявлення небезпечних і шкідливих виробничих факторів	40
4.2.1. Фізичні небезпечні та шкідливі виробничі фактори	41
4.2.2 Хімічні небезпечні та шкідливі виробничі фактори	42
4.2.3 Психофізіологічні небезпечні та шкідливі виробничі фактори	43

4.3 Розробка організаційних та технічних заходів з охорони праці під час розробки, налагодження та дослідження силових перетворювачів зарядних станцій електромобілів	43
4.3.1 Забезпечення нормативних параметрів мікроклімату під час розробки та дослідження силових перетворювачів зарядних станцій електромобілів	45
4.3.2 Забезпечення нормативного санітарно-гігієнічного складу повітря робочої зони під час монтажу та налагодження силових перетворювачів зарядних станцій електромобілів. Проектування місцевої витяжної вентиляції	47
4.4 Забезпечення електробезпеки під час дослідження та випробування силових перетворювачів зарядних станцій електромобілів	52
4.4.1 Загальні положення	52
4.4.2 Організаційно-технічні заходи забезпечення електробезпеки під час дослідження та випробування силових перетворювачів зарядних станцій електромобілів	54
4.5 Забезпечення пожежної безпеки під час розробки та дослідження силових перетворювачів зарядних станцій електромобілів	56
4.6 Висновки до розділу «Охорона праці».....	58
ВИСНОВОК.....	60
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	62

ВСТУП

Стрімкий розвиток електромобільного транспорту є одним із ключових напрямків сучасної світової енергетики та транспортної інфраструктури. Зростання кількості електромобілів потребує створення розгалуженої мережі зарядних станцій, здатних забезпечувати швидке, надійне та енергоефективне заряджання акумуляторних батарей. Особливого значення набувають швидкісні зарядні станції постійного струму (DC Fast Charging), які дозволяють суттєво скоротити час заряджання та підвищити зручність експлуатації електромобілів.

Одним із найважливіших елементів сучасної зарядної станції є силовий перетворювач, який забезпечує перетворення електричної енергії між мережею змінного струму та акумуляторною батареєю транспортного засобу. Від вибору топології AC/DC та DC/DC-перетворювачів значною мірою залежать коефіцієнт корисної дії зарядного пристрою, якість електроенергії, рівень гармонічних спотворень, масогабаритні показники обладнання, а також можливість реалізації перспективних функцій двонаправленого обміну енергією, таких як Vehicle-to-Grid (V2G).

Сучасний розвиток сигової електроніки сприяв появі великої кількості топологій перетворювачів, кожна з яких має власні переваги та недоліки. Для AC/DC-перетворення найбільшого поширення набули Boost PFC, Interleaved Boost PFC, Totem-Pole PFC, Vienna Rectifier та NPC-конвертери. Серед DC/DC-перетворювачів широко використовуються Phase-Shifted Full Bridge (PSFB), LLC-резонансні та Dual Active Bridge (DAB) конвертери. Вибір конкретної топології залежить від вимог до потужності, ефективності, вартості, складності керування та можливості роботи в двонаправленому режимі.

У зв'язку зі зростанням вимог до енергоефективності та щільності потужності сучасних зарядних станцій особливої актуальності набуває питання порівняння різних топологій силових перетворювачів та визначення найбільш перспективних рішень для високопотужних зарядних комплексів.

Метою бакалаврської кваліфікаційної роботи є аналіз сучасних топологій силових перетворювачів зарядних станцій електромобілів та оцінка їх енергетичної ефективності для визначення найбільш доцільних рішень при побудові швидкісних зарядних станцій.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- виконати аналіз структури сучасних зарядних станцій електромобілів;
- розглянути принципи роботи основних AC/DC-топологій силових перетворювачів;
- дослідити особливості DC/DC-перетворювачів, що використовуються у зарядних модулях;
- провести порівняння розглянутих топологій за основними технічними та експлуатаційними характеристиками;
- виконати розрахунок енергетичної ефективності силових модулів зарядної станції потужністю 150 кВт;
- визначити найбільш перспективні комбінації силових перетворювачів для сучасних зарядних станцій електромобілів.

Об'єктом дослідження є процес перетворення електричної енергії в зарядних станціях електромобілів.

Предметом дослідження є топології AC/DC та DC/DC силових перетворювачів, що використовуються у швидкісних зарядних станціях постійного струму.

Практичне значення роботи полягає у визначенні найбільш ефективних схем побудови силових модулів зарядних станцій, що дозволяють підвищити коефіцієнт корисної дії обладнання, знизити втрати електроенергії та покращити техніко-економічні показники зарядної інфраструктури електромобільного транспорту.

1 СТАН ПИТАННЯ

1.1 Класифікація зарядних станцій електромобілів та роль силових перетворювачів у їх складі

Електромобілі стають важливою складовою сучасної транспортної системи, що обумовлює активний розвиток зарядної інфраструктури. Зарядні станції забезпечують передачу електричної енергії від мережі до акумуляторної батареї транспортного засобу, а їх ефективність значною мірою визначається характеристиками силових перетворювачів.

Залежно від способу передачі енергії зарядні станції поділяються на станції змінного струму (AC) та станції постійного струму (DC Fast Charging).

Станції змінного струму (AC) передають електроенергію до бортового зарядного пристрою електромобіля, де відбувається випрямлення та керування процесом заряджання. Потужність таких станцій зазвичай становить від 3,7 до 22 кВт.

Станції постійного струму (DC) містять власні силові перетворювачі та подають постійний струм безпосередньо на акумуляторну батарею електромобіля. Потужність сучасних швидкісних станцій може досягати 50–350 кВт і більше.

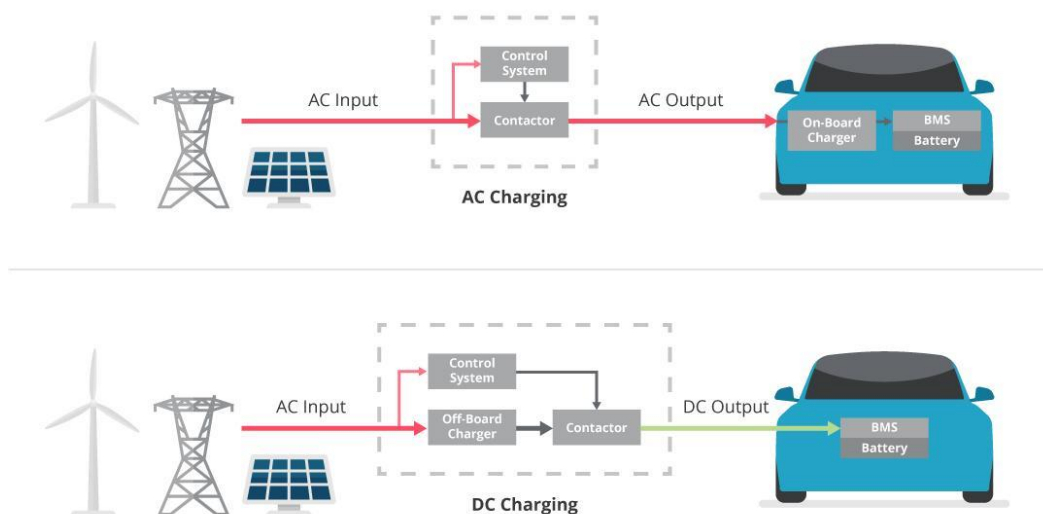


Рисунок 1.1 – Класифікація зарядних станцій електромобілів

За рівнем потужності зарядні станції умовно поділяються на повільні (до 7 кВт), прискорені (7–22 кВт), швидкі (22–150 кВт) та надшвидкі (понад 150 кВт). Вибір типу зарядної станції визначається вимогами до часу заряджання, параметрами електричної мережі та особливостями експлуатації транспортного засобу.

Для швидкісного заряджання необхідне використання складних систем силовій електроніки, які забезпечують високий коефіцієнт корисної дії, стабільність вихідних параметрів та відповідність міжнародним стандартам електромагнітної сумісності.

Типова структура сучасної швидкісної зарядної станції наведена на рисунку 1.2.

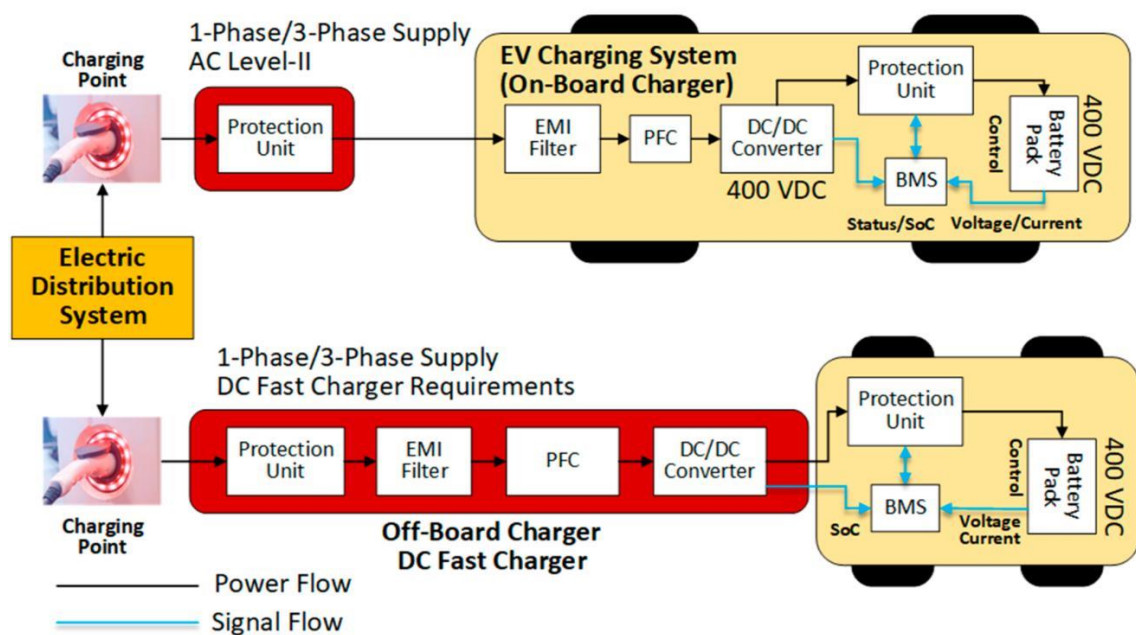


Рисунок 1.2 – Узагальнена структура швидкісної зарядної станції електромобілів

Як видно зі структури, основними елементами зарядної станції є AC/DC-перетворювач, проміжна шина постійного струму та DC/DC-перетворювач. Саме вони виконують основні функції перетворення електричної енергії.

Першим каскадом є AC/DC-перетворювач, який здійснює випрямлення трифазної мережевої напруги та корекцію коефіцієнта потужності. Для реалізації цього каскаду широко використовуються топології Interleaved Boost PFC, Totem-Pole PFC та Vienna Rectifier.

Другим каскадом є DC/DC-перетворювач, який забезпечує гальванічну ізоляцію та формування необхідних параметрів напруги і струму заряджання. Найбільш поширеними топологіями цього класу є Phase Shift Full Bridge (PSFB), LLC-резонансний перетворювач та Dual Active Bridge (DAB).

Структура дворівневої системи перетворення енергії представлена на рисунку 1.3.

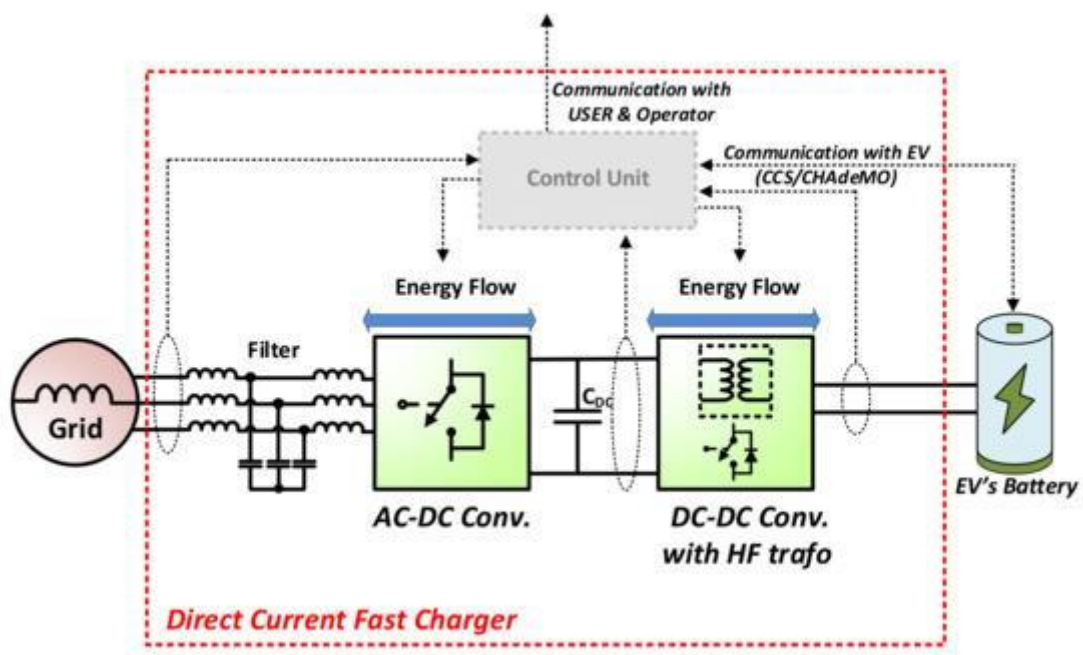


Рисунок 1.3 – Дворівнева структура силового перетворення зарядної станції

Завдяки використанню сучасних силових напівпровідникових приладів на основі карбіду кремнію (SiC) та нітриду галію (GaN) вдається досягати коефіцієнта корисної дії понад 97 %, зменшувати масогабаритні показники обладнання та підвищувати щільність потужності зарядних станцій.

1.2 Типи перетворювачів для зарядної станції

Для побудови силових модулів сучасних зарядних станцій електромобілів використовують різноманітні топології перетворювачів, які забезпечують перетворення електричної енергії на етапах AC/DC та DC/DC. Вибір конкретної схеми визначається вимогами до потужності, коефіцієнта корисної дії, електромагнітної сумісності, вартості та можливості реалізації двонаправленого потоку енергії. Однією з найбільш відомих і широко застосовуваних топологій для корекції коефіцієнта потужності є підвищувальний PFC-перетворювач (Boost Power Factor Correction Converter), структурна схема якого наведена на рисунку 1.4 [5].

Принцип роботи підвищувального PFC-перетворювача полягає у формуванні вхідного струму, форма якого максимально наближена до синусоїдальної та збігається за фазою з напругою мережі. Це дозволяє суттєво підвищити коефіцієнт потужності, зменшити рівень гармонічних спотворень струму та забезпечити відповідність вимогам міжнародних стандартів щодо якості електроенергії. Завдяки відносно простій структурі силовій частини та добре відпрацьованим алгоритмам керування дана топологія набула широкого поширення в імпульсних джерелах живлення, зарядних пристроях малої та середньої потужності, а також у різноманітних промислових електронних системах.

До основних переваг Boost PFC належать простота реалізації системи керування, невелика кількість активних силових ключів, відносно низька вартість компонентів та висока надійність роботи. Крім того, така схема забезпечує стабільне підвищення вихідної напруги та дозволяє досягати коефіцієнта потужності понад 0,95 за умови правильної організації алгоритму керування.

Разом із перевагами підвищувальний PFC-перетворювач має низку суттєвих недоліків, які обмежують його використання у високопотужних зарядних станціях електромобілів. Насамперед це наявність діодного випрямного мосту на вході, через який проходить весь вхідний струм. Втрати потужності на діодах

призводять до зниження загального коефіцієнта корисної дії, особливо при роботі на великих потужностях. Зі збільшенням струму заряджання ці втрати стають дедалі більш відчутними та потребують застосування додаткових систем охолодження.

Ще одним недоліком є однонаправлений характер передачі енергії. Класичний Boost PFC не дозволяє реалізувати реверсивний потік потужності без суттєвої модифікації схеми, що унеможлиблює використання технологій Vehicle-to-Grid (V2G) та Vehicle-to-Home (V2H), які передбачають повернення енергії від акумулятора електромобіля до мережі або локального споживача.

Крім того, використання діодного мосту та великого дроселя збільшує масогабаритні показники пристрою. За потужностей понад 20–30 кВт виникає необхідність застосування більш ефективних топологій, здатних забезпечити вищий ККД, менші втрати та можливість двонаправленого перетворення енергії. Саме тому в сучасних швидкісних зарядних станціях потужністю 50–350 кВт традиційний Boost PFC поступово витісняється більш досконалими рішеннями, такими як Interleaved Boost PFC, Totem-Pole PFC та Vienna Rectifier.

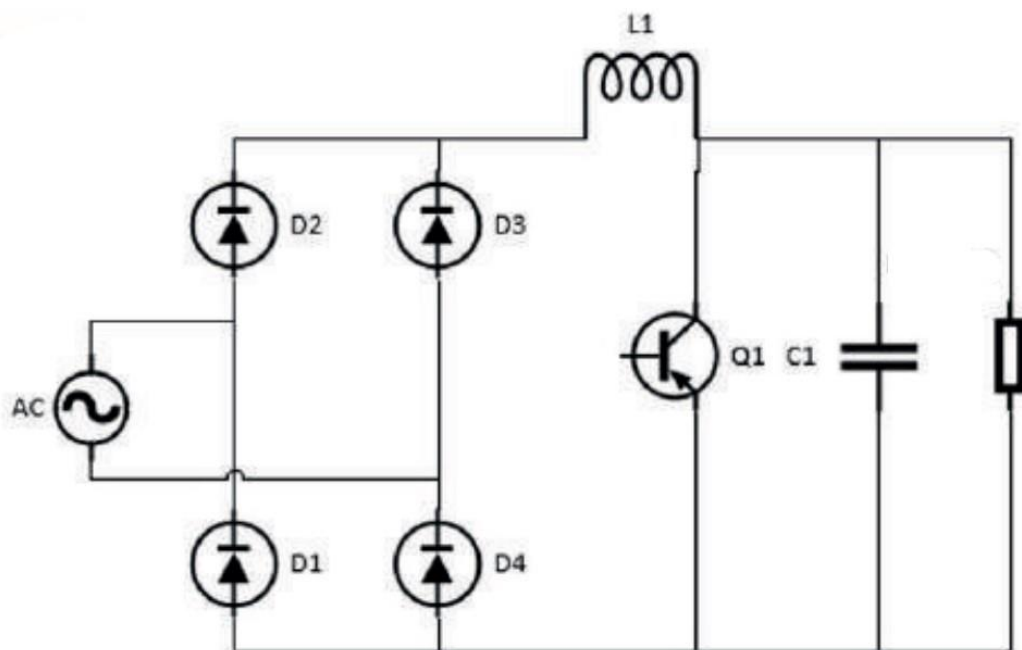


Рисунок 1.4 – PFC boost converter

Для підвищення енергоефективності та покращення динамічних характеристик підвищувальних PFC-перетворювачів у системах середньої та високої потужності широко застосовується інтерлівована топологія (Interleaved Boost PFC), схема якої наведена на рисунку 1.5. Дана топологія є подальшим розвитком класичного підвищувального PFC-перетворювача та поєднує переваги базової схеми з покращеними експлуатаційними характеристиками [7–12].

Принцип роботи інтерлівованого PFC полягає у використанні двох або більше паралельних підвищувальних каскадів, які працюють зі зсувом фаз керуючих сигналів. У двофазному виконанні зсув між каналами становить 180° , що забезпечує часткову компенсацію пульсацій струму на вході та виході перетворювача. Завдяки цьому сумарний струм, який споживається з електричної мережі, стає більш рівномірним, а амплітуда високочастотних гармонік суттєво зменшується.

Однією з головних переваг інтерлівованої топології є зниження пульсацій вхідного струму та струму дроселів. Це дозволяє використовувати індуктивності меншої величини та зменшувати масогабаритні показники магнітних компонентів. Крім того, рівномірний розподіл навантаження між декількома фазами знижує теплове навантаження на силові ключі та випрямні елементи, що позитивно впливає на надійність і довговічність пристрою.

Завдяки ефекту взаємної компенсації гармонік інтерлівований PFC забезпечує вищий коефіцієнт потужності та менший коефіцієнт гармонічних спотворень струму порівняно з класичним Boost PFC. Це сприяє покращенню якості електроенергії та спрощує виконання вимог міжнародних стандартів щодо електромагнітної сумісності. Зменшення рівня електромагнітних завад також дозволяє скоротити розміри вхідних фільтрів та знизити вартість допоміжних компонентів.

Ще однією важливою перевагою є можливість роботи на більш високих рівнях потужності. Якщо традиційний підвищувальний PFC зазвичай використовується у пристроях потужністю до кількох кіловат, то інтерлівовані схеми успішно застосовуються у зарядних станціях потужністю від 10 до 50 кВт і

більше. Розподіл струму між фазами дозволяє зменшити навантаження на окремі силові компоненти та підвищити загальний коефіцієнт корисної дії перетворювача.

Разом з тим інтерлівована топологія має певні недоліки. Насамперед це збільшення кількості силових елементів, датчиків струму та каналів керування, що ускладнює систему керування порівняно з класичним Boost PFC. Крім того, наявність вхідного діодного мосту, характерного для традиційних схем PFC, як і раніше призводить до додаткових втрат потужності та обмежує можливість реалізації двонаправленого потоку енергії.

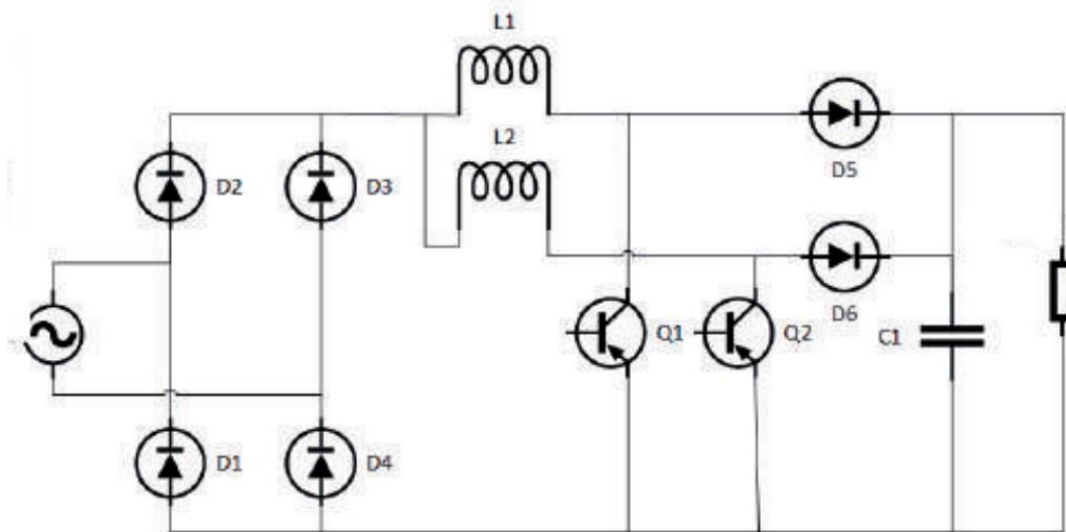


Рисунок 1.5 – Step-up alternating PFC

Подальшим етапом розвитку схем корекції коефіцієнта потужності стало створення тотемно-полюсної топології (Totem-Pole Power Factor Correction, Totem-Pole PFC), яка сьогодні вважається одним із найбільш перспективних рішень для високоефективних зарядних станцій електромобілів. Структурна схема такого перетворювача наведена на рисунку 1.6. Основною метою розробки Totem-Pole PFC було усунення недоліків традиційних підвищувальних PFC-перетворювачів, насамперед втрат потужності у вхідному діодному мосту та обмеженої ефективності при роботі на високих рівнях потужності [13].

Головною особливістю даної топології є відсутність класичного випрямного мосту на вході. Її функції виконують активні силові ключі, які працюють

синхронно з напругою мережі. Завдяки цьому суттєво знижуються втрати на випрямленні, оскільки замість діодів використовуються транзистори з малим опором відкритого каналу. У результаті коефіцієнт корисної дії перетворювача може перевищувати 98–99 %, що особливо важливо для швидкісних зарядних станцій потужністю десятки та сотні кіловат.

Ще однією перевагою Totem-Pole PFC є менша кількість силових компонентів порівняно з традиційним підвищувальним PFC-перетворювачем. Скорочення числа силових елементів дозволяє зменшити втрати енергії, спростити тепловідведення та підвищити щільність потужності пристрою. Це особливо актуально для сучасних зарядних модулів, де одним із ключових критеріїв є зменшення масогабаритних показників обладнання.

Висока ефективність топології Totem-Pole PFC найбільшою мірою проявляється при використанні сучасних напівпровідникових приладів на основі карбіду кремнію (SiC MOSFET) та нітриду галію (GaN HEMT). Завдяки високій швидкодії цих транзисторів та малим комутаційним втратам стає можливим підвищення робочої частоти перетворювача, що сприяє зменшенню розмірів індуктивних елементів та фільтрів. Саме тому Totem-Pole PFC часто розглядається як одна з базових топологій для зарядних станцій нового покоління.

Крім високого ККД, дана схема забезпечує низький рівень гармонічних спотворень струму та високий коефіцієнт потужності, який зазвичай перевищує 0,99. Це дозволяє ефективно використовувати електричну енергію мережі та виконувати вимоги міжнародних стандартів щодо якості електроенергії.

Разом із перевагами Totem-Pole PFC має і певні недоліки. Насамперед це підвищені вимоги до системи керування та алгоритмів комутації силових ключів. Для забезпечення стабільної роботи необхідно точно синхронізувати перемикання транзисторів із фазою мережевої напруги та контролювати режими проходження струму через активні елементи. Крім того, високі швидкості перемикання можуть призводити до збільшення рівня електромагнітних завад, що потребує ретельного проектування друкованих плат та фільтрувальних кіл.

Сучасні спеціалізовані контролери значно спрощують реалізацію Totem-Pole PFC, забезпечуючи готові алгоритми керування, захист від аварійних режимів та підтримку цифрових методів регулювання [14]. Завдяки цьому дана топологія поступово витісняє традиційні схеми Boost PFC у високопотужних зарядних пристроях та стає одним із найбільш поширених рішень у швидкісних зарядних станціях електромобілів потужністю від 50 до 350 кВт і більше.

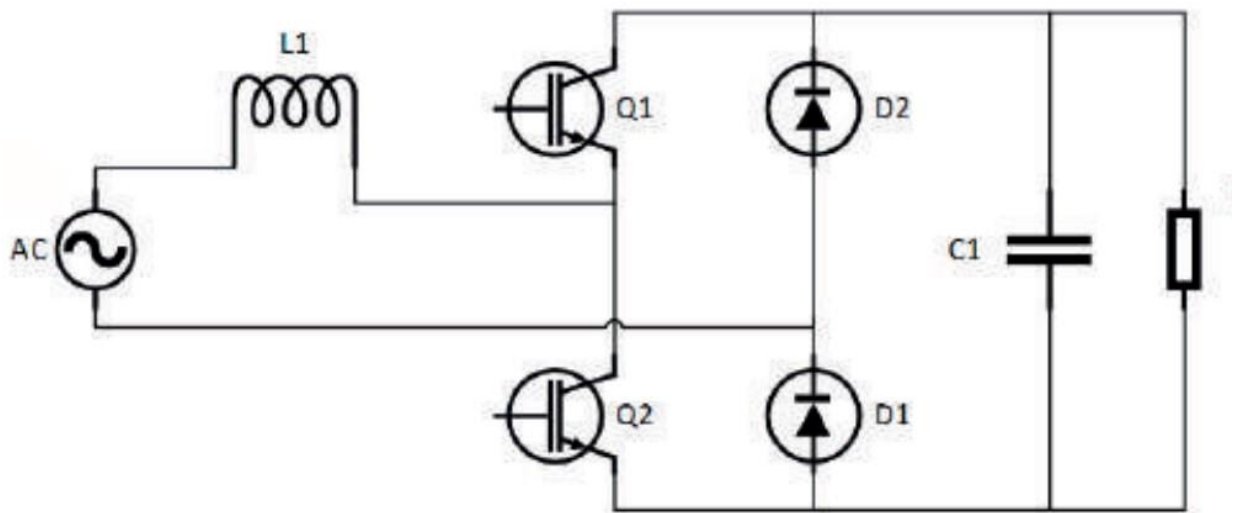


Рисунок 1.6 – Totem-pole power correction scheme

1.2.1 Трифазні схеми AC/DC-перетворення

Для трифазних зарядних станцій електромобілів одним із найбільш поширених рішень на стороні мережевого AC/DC-перетворення є дворівневий активний випрямляч із корекцією коефіцієнта потужності (Two-Level PFC Converter), схема якого наведена на рисунку 1.7 [6]. Завдяки поєднанню відносно простої конструкції, високої функціональності та можливості двонаправленого перетворення енергії дана топологія широко застосовується у швидкісних зарядних станціях середньої та великої потужності.

Конструктивно дворівневий PFC-перетворювач являє собою трифазний мостовий випрямляч, побудований на шести керованих силових ключах, які зазвичай реалізуються на базі IGBT-транзисторів або сучасних SiC MOSFET. На відміну від некерованих діодних випрямлячів, така схема забезпечує активне формування струму, що споживається з мережі, дозволяючи підтримувати його синусоїдальну форму та мінімізувати фазовий зсув відносно напруги живлення.

Однією з головних переваг дворівневого PFC-конвертера є можливість реалізації двонаправленого потоку енергії. Це відкриває можливість використання сучасних концепцій Vehicle-to-Grid (V2G), Vehicle-to-Building (V2B) та Vehicle-to-Home (V2H), у межах яких акумулятор електромобіля може не лише споживати електроенергію, а й повертати її назад у мережу або локальну енергосистему. Така функціональність набуває особливої актуальності в умовах розвитку інтелектуальних електричних мереж та систем накопичення енергії.

Ще однією важливою перевагою є можливість досягнення високого коефіцієнта потужності, який зазвичай перевищує 0,99. Завдяки використанню сучасних алгоритмів векторного керування або прямого керування потужністю забезпечується низький рівень гармонічних спотворень вхідного струму та відповідність вимогам міжнародних стандартів щодо якості електроенергії. Крім того, активне керування дозволяє підтримувати стабільну напругу на шині постійного струму навіть за значних коливань навантаження або напруги мережі.

Важливою перевагою дворівневої топології є також відносна простота силової схеми. Порівняно з багаторівневими випрямлячами вона потребує меншої кількості силових елементів, датчиків та допоміжних вузлів керування. Це сприяє зниженню вартості обладнання, підвищенню надійності та спрощенню технічного обслуговування.

Разом із перевагами дана топологія має низку недоліків. Одним із основних є високий рівень комутаційних гармонік, які виникають у процесі роботи силових ключів. Для забезпечення відповідності нормативним вимогам щодо якості електроенергії необхідно застосовувати вхідні LC- або LCL-фільтри значної потужності. При роботі зарядної станції на рівнях потужності 50–350 кВт такі

фільтри можуть мати значні габарити та масу, що негативно впливає на щільність потужності та вартість обладнання.

Крім того, у дворівневому перетворювачі кожен силовий ключ повинен витримувати повну напругу шини постійного струму, яка в сучасних зарядних станціях може становити 800–1000 В і більше. Це призводить до підвищення вимог до напівпровідникових елементів та збільшення комутаційних втрат, особливо при роботі на високих частотах перемикання.

Незважаючи на зазначені недоліки, дворівневий PFC-конвертер залишається одним із найбільш поширених рішень для трифазних зарядних станцій завдяки своїй простоті, надійності та можливості реалізації двонаправленого енергетичного обміну. Проте зі зростанням вимог до енергоефективності, зниження втрат та підвищення щільності потужності все більшого поширення набувають багаторівневі топології, зокрема Vienna Rectifier та NPC-конвертери, які дозволяють зменшити навантаження на силові елементи та покращити якість перетворення електроенергії.

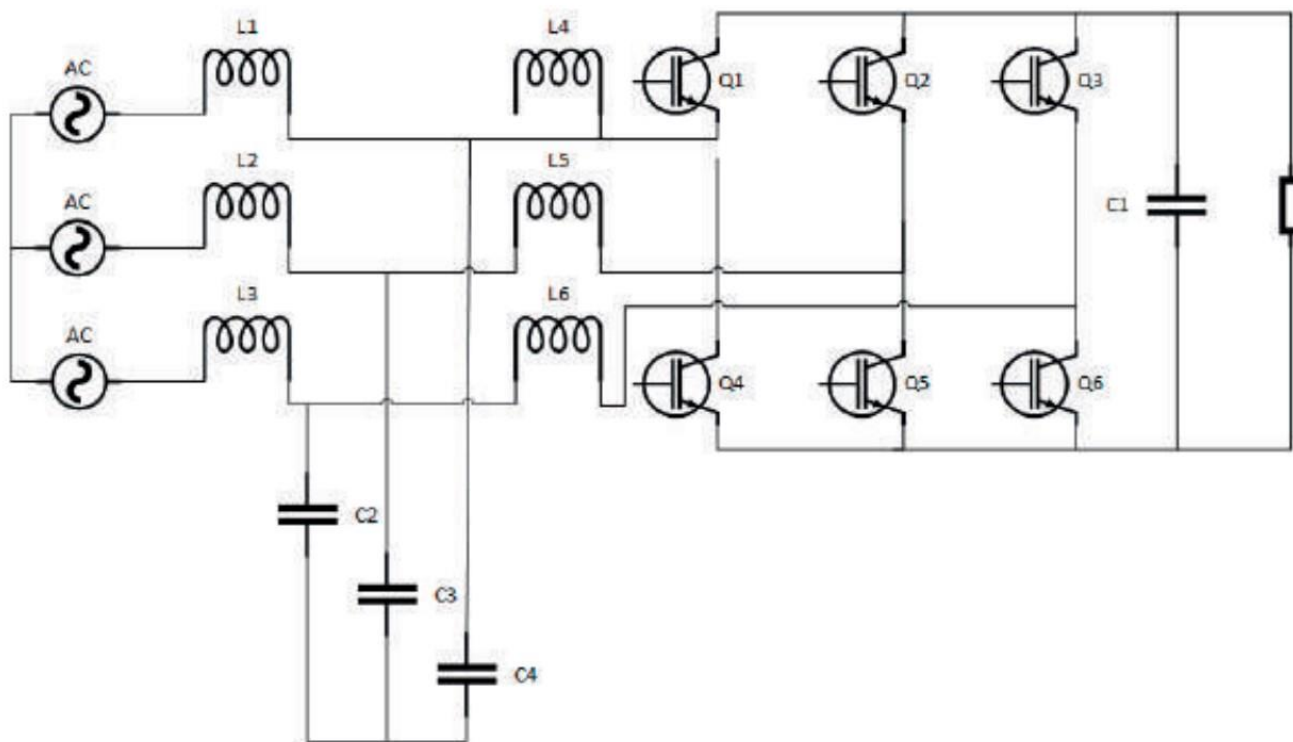


Рисунок 1.7 – Two-level PFC converter

1.2.2 Vienna Rectifier

Однією з найбільш поширених трифазних топологій AC/DC-перетворювачів у сучасних швидкісних зарядних станціях електромобілів є Vienna Rectifier, структурна схема якого наведена на рисунку 1.8. Завдяки високій енергоефективності, відносно простій конструкції та хорошим показникам якості електроенергії дана топологія широко використовується у зарядних модулях потужністю від кількох десятків до сотень кіловат.

Vienna Rectifier належить до класу трирівневих однонаправлених активних випрямлячів. Його структура поєднує переваги багаторівневих схем та відносно невелику кількість активних силових ключів. На відміну від класичних дворівневих активних випрямлячів, у Vienna-конвертері кожна фаза формує три рівні напруги, що дозволяє значно покращити форму вхідного струму та зменшити рівень гармонічних спотворень.

Однією з основних причин популярності цієї топології є робота в режимі неперервної провідності струму (Continuous Conduction Mode, CCM). Завдяки цьому забезпечується плавна зміна струму в дроселях, зменшуються пульсації та покращується електромагнітна сумісність системи. Крім того, неперервний характер струму сприяє зниженню втрат у магнітних компонентах та підвищує стабільність роботи перетворювача при змінному навантаженні.

Важливою перевагою Vienna Rectifier є реалізація трирівневої комутації. Завдяки формуванню трьох рівнів напруги зменшується амплітуда напруги, яка прикладається до силових ключів, а також знижується швидкість зміни напруги (dv/dt) під час комутації. Це дозволяє зменшити електромагнітні завади, покращити якість електроенергії та знизити вимоги до фільтрувальних елементів. У результаті можуть використовуватися дроселі та конденсатори менших розмірів, що позитивно впливає на масогабаритні показники зарядного модуля.

Ще однією суттєвою перевагою є знижене струмове навантаження на силові напівпровідникові прилади. У порівнянні з дворівневими випрямлячами струм більш рівномірно розподіляється між елементами схеми, що зменшує теплові

втррати та підвищує надійність роботи обладнання. Завдяки цьому Vienna Rectifier здатний забезпечувати коефіцієнт корисної дії понад 98 %, що є одним із найкращих показників серед однонаправлених AC/DC-перетворювачів.

Висока ефективність та покращена якість мережевого струму дозволяють досягати коефіцієнта потужності, близького до одиниці, а також виконувати вимоги міжнародних стандартів щодо гармонічних спотворень без використання надмірно громіздких фільтрів. Саме тому Vienna Rectifier широко застосовується в комерційних швидкісних зарядних станціях, центрах обробки даних, телекомунікаційному обладнанні та промислових джерелах живлення великої потужності.

Разом із численними перевагами дана топологія має і певні обмеження. Основним недоліком Vienna Rectifier є однонаправлений характер передачі енергії. Конструкція випрямляча не дозволяє безпосередньо реалізувати реверсивний потік потужності між шиною постійного струму та електричною мережею. Через це використання даної топології в системах із підтримкою технологій Vehicle-to-Grid (V2G), Vehicle-to-Home (V2H) або Vehicle-to-Building (V2B) є суттєво обмеженим або потребує застосування додаткових силових каскадів.

Крім того, для стабільної роботи Vienna-конвертера необхідно забезпечувати балансування напруг на конденсаторах розділеної шини постійного струму, що дещо ускладнює алгоритми керування порівняно з традиційними дворівневими випрямлячами. Проте складність системи керування залишається нижчою, ніж у багатьох інших багаторівневих топологіях аналогічної потужності.

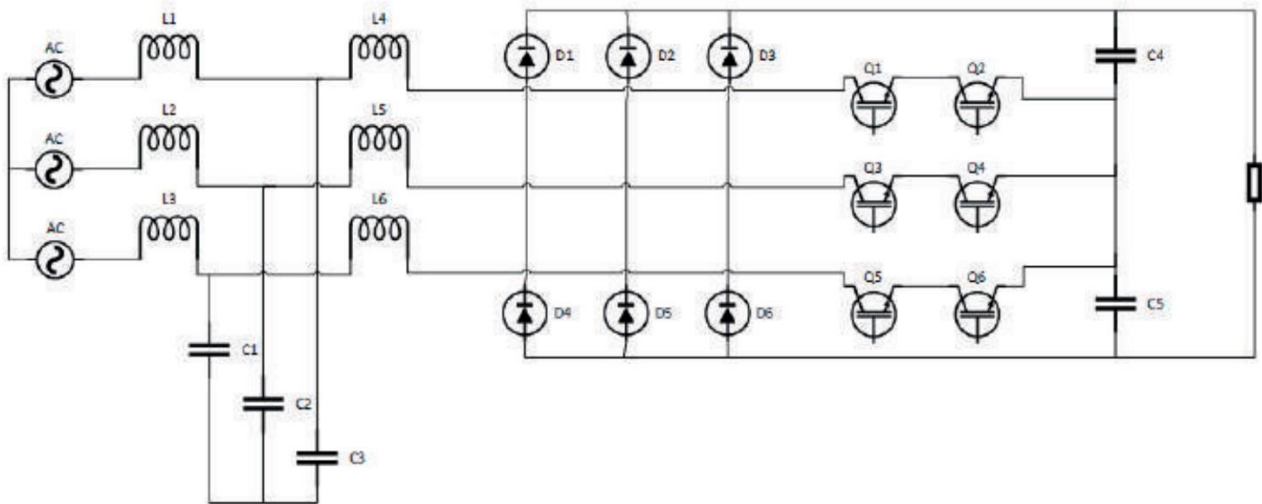


Рисунок 1.8 – Vienna rectifier

1.2.3 Трирівневий NPC-конвертер

Ще одним перспективним рішенням для побудови трифазних AC/DC-перетворювачів зарядних станцій електромобілів є трирівнева топологія Neutral Point Clamped (NPC), структурна схема якої наведена на рисунку 1.9. Дана топологія належить до класу багаторівневих перетворювачів і широко застосовується в системах середньої та великої потужності завдяки високій енергоефективності, покращеним показникам якості електроенергії та можливості роботи з підвищеними напругами.

Принцип роботи NPC-конвертера базується на формуванні трьох рівнів напруги на виході кожного плеча інвертора або випрямляча. Для цього використовується розділена шина постійного струму та додаткові фіксувальні (clamping) діоди, які забезпечують підключення силових ключів до середньої точки джерела живлення. Завдяки такій структурі напруга, прикладена до кожного транзистора, становить лише половину напруги DC-шини, що суттєво знижує електричне навантаження на силові елементи.

Однією з найважливіших переваг NPC-топології є зменшення струмових та комутаційних навантажень на силові ключі. Оскільки вихідна напруга формується більш плавно порівняно з дворівневими схемами, зменшується швидкість зміни

напруги (dv/dt) та струму (di/dt), що позитивно впливає на електромагнітну сумісність системи. Це дозволяє знизити рівень гармонічних спотворень струму мережі та покращити якість електроенергії без суттєвого ускладнення алгоритмів керування.

Важливою перевагою трирівневого NPC-конвертера є можливість зменшення розмірів вхідних фільтрів та індуктивних елементів. Завдяки більш якійсній формі струму та меншому вмісту високочастотних гармонік необхідність у використанні масивних LC- або LCL-фільтрів значно знижується. Це дає змогу скоротити масогабаритні показники обладнання та підвищити щільність потужності зарядного модуля, що є одним із ключових критеріїв при розробці сучасних швидкісних зарядних станцій.

Ще однією суттєвою перевагою є висока ефективність роботи на підвищених частотах комутації. У порівнянні з дворівневими схемами NPC-конвертер характеризується меншими втратами на перемикання, оскільки кожен силовий ключ комутує лише частину загальної напруги шини постійного струму. Це дозволяє ефективно працювати на частотах понад 50 кГц, використовуючи сучасні напівпровідникові прилади на основі карбіду кремнію (SiC MOSFET). Підвищення частоти комутації, своєю чергою, сприяє подальшому зменшенню розмірів магнітних компонентів та підвищенню питомої потужності перетворювача.

Подібно до дворівневих активних випрямлячів, NPC-топологія підтримує двонаправлений потік енергії. Це дозволяє реалізовувати режими рекуперації та сучасні технології Vehicle-to-Grid (V2G), у межах яких акумулятор електромобіля може використовуватись як розподілене джерело електроенергії для мережі. Така функціональність є важливою складовою концепції інтелектуальних енергетичних систем та майбутніх Smart Grid.

Разом із численними перевагами трирівневий NPC-конвертер має і певні недоліки. Насамперед це складніша структура силової схеми, яка потребує більшої кількості напівпровідникових елементів, додаткових діодів та системи балансування напруги на конденсаторах шини постійного струму. Зростання

кількості компонентів призводить до ускладнення системи керування та підвищення вартості обладнання. Крім того, забезпечення стабільного потенціалу нейтральної точки вимагає використання спеціальних алгоритмів керування, особливо за несиметричних режимів роботи.

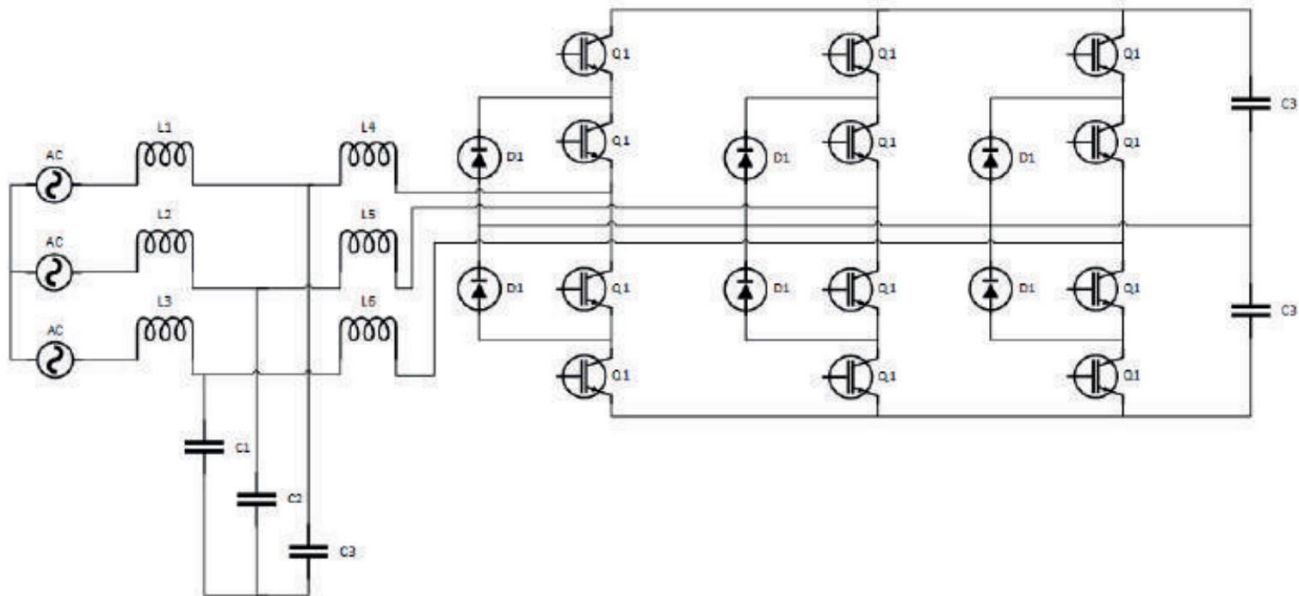


Рисунок 1.9 – Three-level three-phase NPC converter with neutral point clamp

1.2.4 DC/DC-перетворювачі

Серед ізолюваних DC/DC-перетворювачів, які застосовуються у швидкісних зарядних станціях електромобілів, однією з найбільш поширених топологій є повномостовий перетворювач зі зсувом фаз керуючих сигналів (Phase-Shifted Full-Bridge, PSFB), схема якого наведена на рисунку 1.10. Завдяки поєднанню високої енергоефективності, відносної простоти реалізації та можливості роботи на великих рівнях потужності дана топологія широко використовується в зарядних модулях потужністю від кількох кіловат до сотень кіловат.

Принцип роботи PSFB-перетворювача базується на використанні повномостової схеми з чотирьох силових ключів, які формують високочастотну змінну напругу на первинній обмотці трансформатора. Регулювання переданої

потужності здійснюється шляхом зміни фазового зсуву між діагональними парами транзисторів мосту. Такий спосіб керування дозволяє плавно змінювати рівень вихідної потужності без необхідності зміни частоти комутації, що суттєво спрощує систему керування та покращує стабільність роботи перетворювача.

Однією з головних переваг топології PSFB є можливість реалізації режиму м'якого перемикання Zero Voltage Switching (ZVS). У цьому режимі відкривання силових транзисторів відбувається при напрузі, близькій до нуля, що значно зменшує втрати енергії під час комутації. Завдяки цьому підвищується загальний коефіцієнт корисної дії перетворювача, зменшується нагрівання силових елементів та знижується навантаження на систему охолодження.

Особливого значення режим ZVS набуває у високопотужних зарядних станціях, де силові модулі працюють на частотах десятки або навіть сотні кілогерц. Зменшення комутаційних втрат дозволяє використовувати більш високі частоти перемикання, що, у свою чергу, сприяє зменшенню розмірів високочастотного трансформатора, дроселів та фільтрувальних елементів. Це забезпечує підвищення щільності потужності та зменшення масогабаритних показників зарядного обладнання.

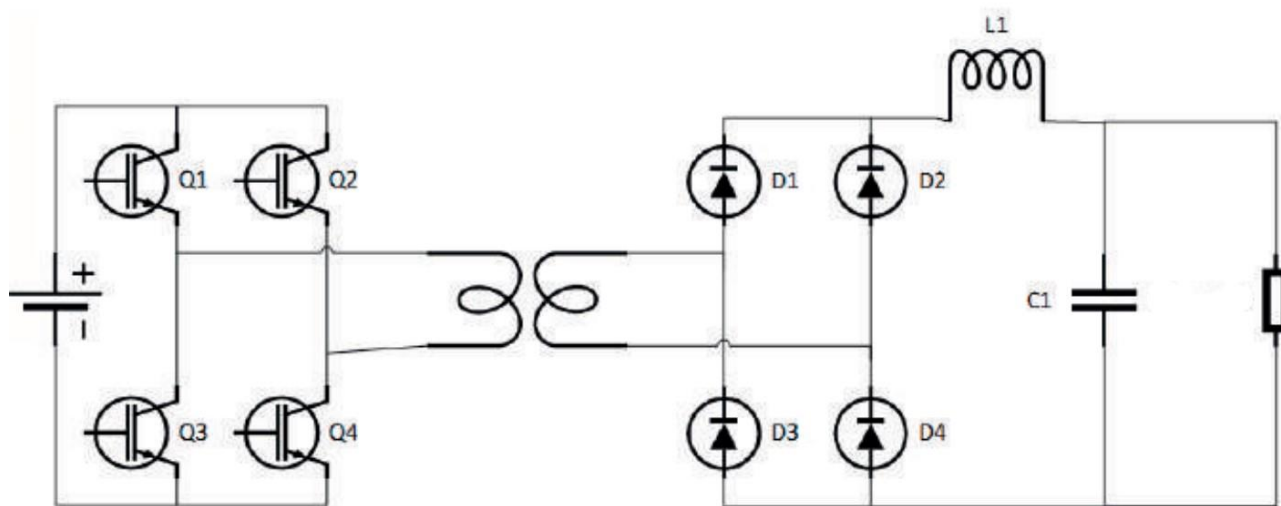


Рисунок 1.10 – DC/DC bridge with phase shift

1.2.5 Повномостові та резонансні DC/DC-топології

У класичному повномостовому DC/DC-перетворювачі як силові комутаційні елементи можуть використовуватися різні типи напівпровідникових приладів, зокрема діоди, IGBT-транзистори або MOSFET-транзистори. Найбільшого поширення в сучасних зарядних станціях набули MOSFET-транзистори, оскільки вони забезпечують низькі втрати провідності, високу швидкодію та можливість реалізації двонаправленого потоку енергії. Це дозволяє використовувати перетворювач не лише для заряджання акумуляторної батареї, а й для повернення енергії до мережі в режимах Vehicle-to-Grid (V2G), Vehicle-to-Home (V2H) та Vehicle-to-Building (V2B).

Регулювання потужності в повномостовому перетворювачі зі зсувом фаз здійснюється шляхом зміни фазового кута між сигналами керування силовими ключами первинного мосту. Зі збільшенням фазового зсуву зростає кількість енергії, яка передається через високочастотний трансформатор до навантаження. Такий метод керування дозволяє плавно регулювати вихідну потужність без зміни частоти комутації, що спрощує побудову системи керування та покращує стабільність роботи пристрою.

Важливою перевагою даної топології є можливість реалізації режиму м'якого перемикання Zero Voltage Switching (ZVS). У цьому випадку відкривання силових ключів відбувається при напрузі, близькій до нуля, що значно зменшує комутаційні втрати та електромагнітні завади. Для окремих режимів роботи також забезпечується низьковольтне або майже безструмове перемикання іншої групи ключів, що додатково підвищує ефективність перетворювача та знижує теплові навантаження на силові елементи. Завдяки цьому повномостові перетворювачі зі зсувом фаз широко використовуються у зарядних модулях потужністю десятки кіловат.

Ще однією поширеною топологією DC/DC-перетворювачів у складі сучасних зарядних станцій електромобілів є резонансний LLC-конвертер, схема якого наведена на рисунку 1.11. На відміну від PSFB-перетворювача, LLC-

конвертер використовує спеціальний резонансний контур, до складу якого входять резонансна індуктивність, магнітна індуктивність трансформатора та резонансний конденсатор. Передача енергії в такій схемі відбувається через резонансні процеси, що забезпечують високу ефективність роботи.

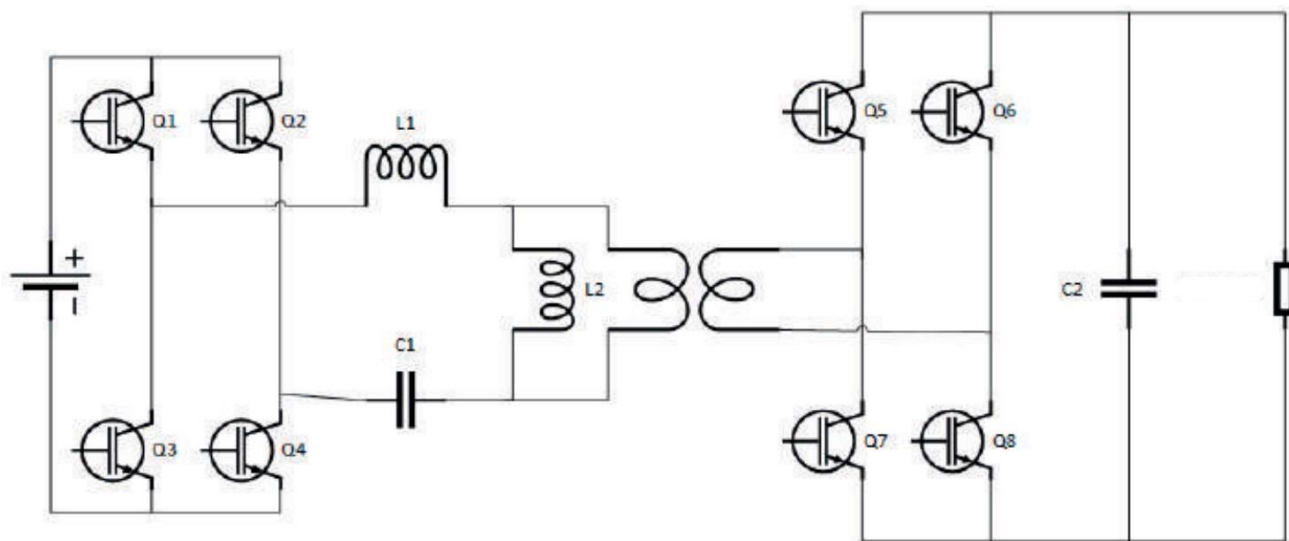


Рисунок 1.11 – Resonant converter LLC

1.2.6 Подвійний активний міст (DAB)

Ще однією перспективною топологією, яка активно використовується у високопотужних ізольованих DC/DC-перетворювачах, є подвійний активний міст (Dual Active Bridge, DAB), структурна схема якого наведена на рисунку 1.12. Завдяки можливості двонаправленого обміну енергією, високій ефективності та широкому діапазону регулювання напруги дана топологія вважається одним із найбільш перспективних рішень для зарядних станцій електромобілів нового покоління.

Конструктивно DAB-перетворювач складається з двох активних повномостових схем, розташованих по обидва боки високочастотного трансформатора. Кожен міст побудований на керованих силових транзисторах, що дозволяє формувати змінну напругу як на первинній, так і на вторинній стороні трансформатора. На відміну від традиційних ізольованих DC/DC-

перетворювачів, де одна сторона часто містить пасивний випрямляч, у DAB обидві сторони є активними, що забезпечує повний контроль над напрямком та величиною переданої потужності.

Передача енергії між джерелом і навантаженням здійснюється шляхом зміни фазового зсуву між сигналами керування первинного та вторинного мостів. При зміні фазового кута змінюється величина потужності, яка передається через високочастотний трансформатор. Зміна знаку фазового зсуву дозволяє легко реалізувати реверсивний режим роботи, тобто передавати енергію як від мережі до акумулятора електромобіля, так і у зворотному напрямку. Саме ця особливість робить DAB однією з ключових топологій для реалізації концепцій Vehicle-to-Grid (V2G), Vehicle-to-Home (V2H) та Vehicle-to-Building (V2B).

Важливою перевагою DAB-перетворювача є можливість роботи в режимі м'якого перемикання Zero Voltage Switching (ZVS). За правильно підібраних параметрів трансформатора та індуктивності передачі енергії відкривання силових транзисторів відбувається при напрузі, близькій до нуля, що суттєво знижує комутаційні втрати. Це дозволяє досягати високих значень коефіцієнта корисної дії, які в сучасних реалізаціях перевищують 96–98 %. Додатковою перевагою є можливість роботи на підвищених частотах комутації, що сприяє зменшенню габаритів трансформатора та підвищенню питомої потужності зарядного модуля.

Завдяки двонаправленій структурі DAB добре пристосований до роботи з акумуляторними батареями різних типів та системами накопичення енергії. Топологія здатна ефективно функціонувати в широкому діапазоні напруг, що особливо важливо для сучасних електромобілів із батарейними системами на 400 В та 800 В. Крім того, DAB забезпечує гальванічну ізоляцію між мережею та акумулятором, що відповідає вимогам безпеки швидкісних зарядних станцій.

Разом із численними перевагами дана топологія має і певні недоліки. Насамперед це складність системи керування. Для забезпечення високого ККД у широкому діапазоні навантажень необхідно використовувати складні алгоритми регулювання фазового зсуву, які враховують зміну напруги на вході та виході

перетворювача. При значному відхиленні співвідношення вхідної та вихідної напруги можуть виникати циркулюючі реактивні струми, що призводять до додаткових втрат та зниження ефективності. Для мінімізації цих явищ у сучасних системах застосовують удосконалені методи керування, зокрема Dual Phase Shift (DPS), Triple Phase Shift (TPS) та інші цифрові алгоритми оптимізації режимів роботи.

Таким чином, DAB-перетворювач поєднує високу ефективність, гальванічну ізоляцію, можливість двонаправленого обміну енергією та сумісність із технологіями V2G. Саме тому ця топологія розглядається як один із найбільш перспективних варіантів для побудови високопотужних зарядних модулів електромобілів наступного покоління.

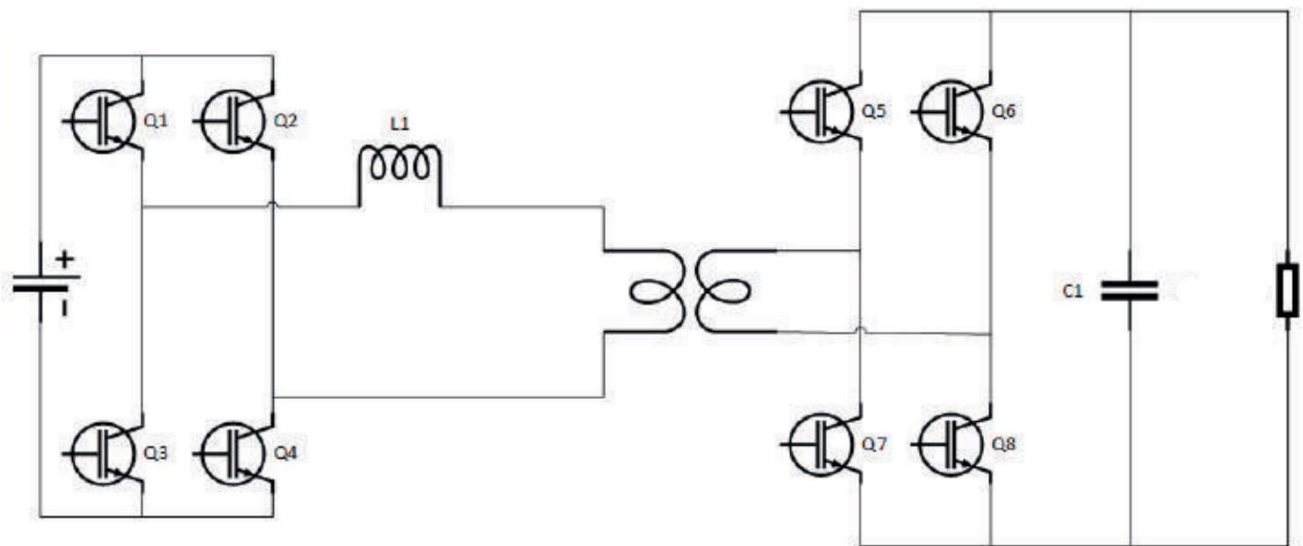


Рисунок 1.12 – Double active bridge

Для створення повноцінного силового модуля швидкісної зарядної станції необхідно поєднати вибрану топологію AC/DC-перетворення з відповідним DC/DC-перетворювачем. На першому етапі здійснюється випрямлення трифазної мережевої напруги та корекція коефіцієнта потужності за допомогою таких топологій, як Interleaved Boost PFC, Totem-Pole PFC, Vienna Rectifier або NPC-конвертер. На другому етапі енергія передається через ізольований DC/DC-перетворювач, наприклад PSFB, LLC або DAB, який формує необхідні параметри напруги та струму для заряджання акумуляторної батареї електромобіля.

Саме комбінація цих двох каскадів утворює силовий модуль високопотужної зарядної станції (High Power Charger, HPC). Від правильного вибору топологій AC/DC та DC/DC-перетворювачів залежать коефіцієнт корисної дії, щільність потужності, масогабаритні показники, можливість реалізації двонаправленого обміну енергією та загальна економічна ефективність зарядного обладнання. Тому аналіз та вибір оптимальної комбінації силових перетворювачів є одним із ключових завдань під час проєктування сучасних швидкісних зарядних станцій електромобілів.

2 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

2.1 Порівняння ефективності сучасних топологій силових перетворювачів зарядних станцій електромобілів

Після аналізу основних AC/DC та DC/DC топологій доцільно виконати їх порівняння за ключовими технічними та експлуатаційними характеристиками. Вибір оптимальної топології силового перетворювача є одним із найважливіших етапів проектування швидкісних зарядних станцій електромобілів, оскільки саме він визначає енергоефективність, надійність, масогабаритні показники та економічну доцільність обладнання.

Сучасні зарядні станції повинні забезпечувати високий коефіцієнт корисної дії, відповідність стандартам якості електроенергії, можливість роботи в широкому діапазоні напруг акумуляторних батарей та підтримку перспективних технологій двонаправленого обміну енергією. У зв'язку з цим для оцінювання силових перетворювачів використовують комплекс критеріїв.

Основним показником є коефіцієнт корисної дії (ККД), який характеризує частку електроенергії, що передається до навантаження без втрат. Для сучасних швидкісних зарядних станцій значення ККД окремого силового модуля зазвичай повинно перевищувати 95 %, а для найсучасніших рішень на базі SiC та GaN напівпровідників цей показник може досягати 98–99 %.

Другим важливим критерієм є коефіцієнт потужності. Високий коефіцієнт потужності забезпечує ефективне використання енергії мережі та зменшує реактивне навантаження на систему електропостачання. Для сучасних зарядних станцій значення коефіцієнта потужності повинно наближатися до одиниці.

Важливим показником також є рівень гармонічних спотворень струму (THD). Зменшення гармонік дозволяє покращити якість електроенергії та знизити вимоги до додаткових мережевих фільтрів.

Окрему увагу приділяють щільності потужності, яка характеризує співвідношення вихідної потужності до об'єму або маси обладнання. Підвищення

щільності потужності є одним із головних напрямків розвитку сучасної силової електроніки для зарядних станцій.

Крім технічних характеристик, важливими критеріями є складність системи керування, можливість реалізації двонаправленого обміну енергією (V2G), вартість силових компонентів та вимоги до систем охолодження.

На рисунку 2.1 наведено основні критерії оцінювання сучасних силових перетворювачів.

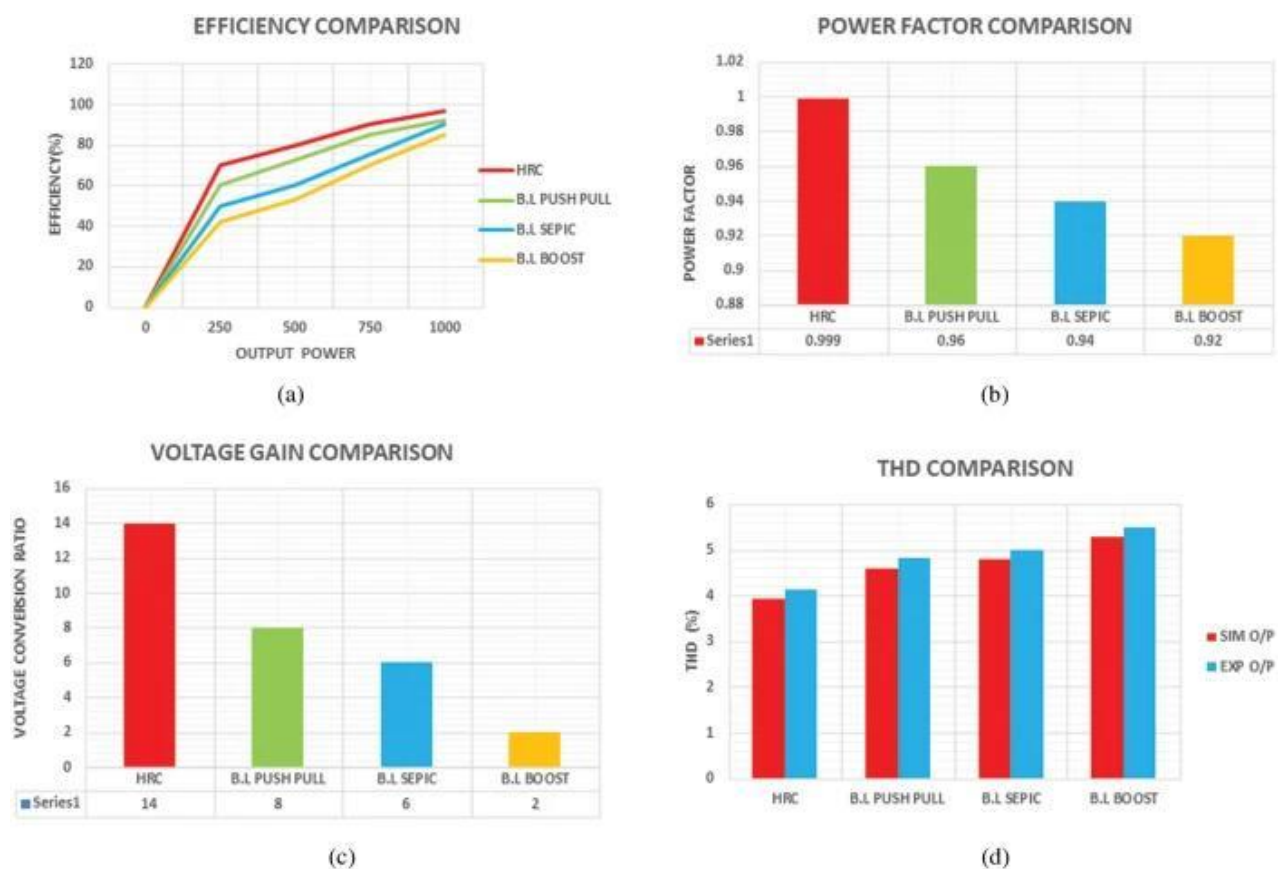


Рисунок 2.1 – Основні критерії оцінювання силових перетворювачів

Порівняння AC/DC-топологій показує, що класичний Boost PFC характеризується простотою реалізації, проте має найнижчий ККД через втрати у діодному мосту та не підтримує двонаправлений потік енергії. Interleaved Boost PFC дозволяє зменшити пульсації струму та підвищити ефективність, однак також залишається однонаправленим рішенням.

2.2 AC/DC -топології

Totem-Pole PFC забезпечує один із найвищих показників ККД серед однофазних схем завдяки відсутності випрямного мосту. При використанні SiC MOSFET або GaN HEMT його ефективність може перевищувати 99 %. Крім того, дана топологія підтримує двонаправлений режим роботи.

Vienna Rectifier характеризується високою ефективністю та низьким рівнем гармонічних спотворень струму. Завдяки трирівневій структурі зменшуються втрати на перемикання та покращується якість електроенергії. Основним недоліком є неможливість реалізації V2G без додаткових силових каскадів.

NPC-конвертер забезпечує найкращі показники якості струму та найменше навантаження на силові ключі серед розглянутих трифазних схем. Разом з тим він має більш складну структуру та систему керування.

Порівняння розглянутих AC/DC-топологій наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Порівняння AC/DC-топологій

Характеристика	Boost PFC	Interleaved Boost PFC	Totem-Pole PFC	Vienna Rectifier	NPC Converter
Тип мережі	1-фазна	1-фазна	1-фазна	3-фазна	3-фазна
ККД, %	94–96	95–97	98–99	97–99	97–98
Коефіцієнт потужності	>0,95	>0,98	>0,99	>0,99	>0,99
Рівень THD	Середній	Низький	Дуже низький	Дуже низький	Дуже низький
Двонаправлена передача енергії	Ні	Ні	Так	Ні	Так
Кількість силових ключів	Низька	Середня	Середня	Середня	Висока
Складність керування	Низька	Середня	Висока	Середня	Висока
Вимоги до фільтрів	Високі	Середні	Низькі	Низькі	Найнижчі
Щільність потужності	Низька	Середня	Висока	Висока	Висока
Вартість реалізації	Низька	Середня	Висока	Висока	Висока
Підтримка V2G	Ні	Ні	Так	Ні	Так
Типове застосування	Малопотужні ЗП	Зарядні модулі 3–20 кВт	НРС зарядні модулі	Комерційні DC станції	Високотужні НРС станції

2.3 DC/DC-топології

Серед DC/DC-перетворювачів найбільш поширеними є PSFB, LLC та DAB. Топологія PSFB характеризується відносною простотою реалізації, високою надійністю та можливістю роботи в режимі ZVS. Вона широко застосовується в модульних зарядних пристроях потужністю 15–30 кВт.

LLC-конвертер забезпечує найвищий ККД серед розглянутих DC/DC-рішень завдяки одночасній реалізації режимів ZVS та ZCS. Проте класична схема не підтримує двонаправлений потік енергії.

DAB-конвертер поєднує високу ефективність із можливістю двонаправленого обміну енергією. Саме ця топологія розглядається як одна з основних для перспективних систем Vehicle-to-Grid.

Порівняння DC/DC-топологій наведено в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Порівняння DC/DC-топологій зарядних станцій

Характеристика	PSFB (Phase-Shifted Full Bridge)	LLC Resonant Converter	DAB (Dual Active Bridge)
Гальванічна ізоляція	Так	Так	Так
ККД, %	95–98	97–99	96–98
Режим м'якого перемикання	ZVS	ZVS + ZCS	ZVS
Двонаправлена передача енергії	Так*	Ні	Так
Підтримка V2G	Так*	Ні	Так
Робоча частота	20–100 кГц	50–500 кГц	20–200 кГц
Щільність потужності	Висока	Дуже висока	Висока
Складність керування	Середня	Середня	Висока
Діапазон регулювання напруги	Широкий	Обмежений	Дуже широкий
Комутаційні втрати	Низькі	Дуже низькі	Низькі
Вимоги до трансформатора	Середні	Високі	Середні
Робота на малих навантаженнях	Задовільна	Висока ефективність	Середня
Вартість реалізації	Середня	Середня	Висока
Типове застосування	Зарядні модулі 15–30 кВт	Високоєфективні НРС-модулі	Двонаправлені НРС та V2G системи

3 РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА

3.1 Розрахунок енергетичної ефективності сучасних топологій силових перетворювачів зарядної станції потужністю 150 кВт

Для оцінювання ефективності сучасних топологій силових перетворювачів доцільно виконати розрахунок втрат потужності у зарядній станції постійного струму потужністю 150 кВт. Така потужність є типовою для швидкісних зарядних станцій електромобілів та дозволяє порівняти різні комбінації AC/DC та DC/DC-перетворювачів.

Загальний коефіцієнт корисної дії зарядного модуля визначається як добуток ККД AC/DC та DC/DC каскадів:

$$\eta_{\text{заг}} = \eta_{\text{AC/DC}} \cdot \eta_{\text{DC/DC}}. \quad (3.1)$$

Потужність втрат у силовому модулі визначається за формулою:

$$P_{\text{вт}} = P_{\text{вих}} \cdot (1 / \eta_{\text{заг}} - 1), \quad (3.2)$$

де $P_{\text{вих}}$ — вихідна потужність зарядної станції, кВт;

$\eta_{\text{заг}}$ — загальний коефіцієнт корисної дії.

Для розрахунку приймаємо вихідну потужність зарядної станції:

$$P_{\text{вих}} = 150 \text{ кВт}.$$

Розглянемо три варіанти побудови силового модуля:

1. Boost PFC + PSFB;
2. Vienna Rectifier + LLC;
3. NPC Converter + DAB.

Для першого варіанта приймаємо:

$$\eta_{AC/DC} = 0,95;$$

$$\eta_{DC/DC} = 0,96.$$

Тоді загальний ККД становить:

$$\eta_{\text{заг1}} = 0,95 \cdot 0,96 = 0,912.$$

Отже, загальний ККД силового модуля:

$$\eta_{\text{заг1}} = 91,2 \, \%.$$

Потужність, яку необхідно спожити з мережі:

$$P_{\text{вх1}} = 150 / 0,912 = 164,47 \text{ кВт.}$$

Потужність втрат:

$$P_{\text{вт1}} = 164,47 - 150 = 14,47 \text{ кВт.}$$

Для другого варіанта приймаємо:

$$\eta_{AC/DC} = 0,982;$$

$$\eta_{DC/DC} = 0,978.$$

Тоді:

$$\eta_{\text{заг2}} = 0,982 \cdot 0,978 = 0,9604.$$

Отже:

$$\eta_{\text{заг2}} = 96,04 \, \%.$$

Потужність, яка споживається з мережі:

$$P_{\text{вх2}} = 150 / 0,9604 = 156,18 \text{ кВт.}$$

Потужність втрат:

$$P_{\text{вт2}} = 156,18 - 150 = 6,18 \text{ кВт.}$$

Для третього варіанта приймаємо:

$$\eta_{AC/DC} = 0,975;$$

$$\eta_{DC/DC} = 0,970.$$

Тоді:

$$\eta_{\text{заг3}} = 0,975 \cdot 0,970 = 0,9458.$$

Отже:

$$\eta_{\text{заг3}} = 94,58 \, \%.$$

Потужність, яка споживається з мережі:

$$P_{\text{вх3}} = 150 / 0,9458 = 158,60 \text{ кВт.}$$

Потужність втрат:

$$P_{\text{вт3}} = 158,60 - 150 = 8,60 \text{ кВт.}$$

Результати розрахунку наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Порівняння енергетичної ефективності топологій силових перетворювачів зарядної станції потужністю 150 кВт

Варіант	AC/DC- топологія	DC/DC- топологія	Загальний ККД, %	Потужність мережі, кВт	Втрати, кВт
1	Boost PFC	PSFB	91,2	164,47	14,47
2	Vienna Rectifier	LLC	96,04	156,18	6,18
3	NPC Converter	DAB	94,58	158,60	8,60

З таблиці видно, що найменші втрати має комбінація Vienna Rectifier + LLC. При вихідній потужності 150 кВт втрати становлять лише 6,18 кВт. Для порівняння, у варіанті Boost PFC + PSFB втрати досягають 14,47 кВт, тобто більш ніж удвічі перевищують втрати сучаснішої топології.

Різниця втрат між варіантами Boost PFC + PSFB та Vienna Rectifier + LLC становить:

$$\Delta P_{\text{вт}} = 14,47 - 6,18 = 8,29 \text{ кВт.} \quad (3.3)$$

Це означає, що при однаковій вихідній потужності зарядна станція з топологією Vienna Rectifier + LLC споживатиме з мережі приблизно на 8,29 кВт менше активної потужності, яка в іншому випадку перетворювалася б у тепло.

Оцінимо річну економію електроенергії.

Якщо зарядна станція працює в середньому 6 годин на добу, то річна економія енергії становитиме:

$$W_{\text{ек}} = \Delta P_{\text{вт}} \cdot t \cdot 365, \quad (3.4)$$

де $\Delta P_{\text{вт}}$ — різниця втрат, кВт;

t — середній час роботи на добу, год.

$$W_{\text{ек}} = 8,29 \cdot 6 \cdot 365 = 18155,1 \text{ кВт} \cdot \text{год}.$$

Отже, використання ефективнішої топології дозволяє зекономити приблизно 18,16 МВт·год електроенергії на рік для однієї зарядної станції потужністю 150 кВт.

Якщо прийняти умовну вартість електроенергії 8 грн/кВт·год, економічний ефект становитиме:

$$\text{Сек} = 18155,1 \cdot 8 = 145240,8 \text{ грн/рік}. \quad (3.5)$$

Таким чином, лише за рахунок підвищення ККД силового модуля можна отримати економію близько 145 тис. грн на рік для однієї зарядної станції.

Крім економічного ефекту, зменшення втрат потужності має важливе технічне значення. Менші втрати означають менше тепловиділення, що дозволяє знизити вимоги до системи охолодження, підвищити надійність силових напівпровідникових елементів і зменшити габарити зарядного обладнання.

Отже, проведений розрахунок показує, що вибір топології силового перетворювача суттєво впливає на енергетичну ефективність зарядної станції. Найкращі показники серед розглянутих варіантів демонструє комбінація Vienna Rectifier + LLC, яка забезпечує найменші втрати та найвищий загальний ККД. Водночас комбінація NPC Converter + DAB є перспективною для систем із підтримкою двонаправленого обміну енергією, зокрема V2G.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Завдання в галузі охорони праці

Охорона праці є невід'ємною складовою організації будь-якої професійної діяльності та спрямована на збереження життя, здоров'я і працездатності людини в процесі виконання трудових обов'язків. В умовах стрімкого розвитку електромобільного транспорту та сучасної силової електроніки особливого значення набувають питання безпеки під час проектування, дослідження, виготовлення та експлуатації високопотужного електротехнічного обладнання, зокрема зарядних станцій електромобілів.

Правові та організаційні засади охорони праці в Україні визначаються Законом України «Про охорону праці», який встановлює єдиний порядок організації безпечних і здорових умов праці на підприємствах незалежно від форми власності та виду діяльності. Відповідно до законодавства охорона праці являє собою систему правових, соціально-економічних, організаційно-технічних, санітарно-гігієнічних і лікувально-профілактичних заходів, спрямованих на запобігання виробничому травматизму та професійним захворюванням. [14]

Основним принципом державної політики у сфері охорони праці є пріоритет життя та здоров'я працівника над результатами виробничої діяльності. Роботодавець несе повну відповідальність за створення безпечних умов праці, забезпечення працівників необхідними засобами індивідуального захисту, проведення інструктажів та навчання з питань безпеки праці.

Тематика даної бакалаврської кваліфікаційної роботи пов'язана з аналізом сучасних топологій силових перетворювачів зарядних станцій електромобілів. У процесі розробки, дослідження та експлуатації такого обладнання працівники можуть зазнавати впливу небезпечних та шкідливих виробничих факторів, пов'язаних із використанням високих напруг, значних електричних струмів, електромагнітних полів, нагрітих поверхонь силових напівпровідникових приладів, а також підвищеної пожежної небезпеки.

Особливістю сучасних швидкісних зарядних станцій є робота з напругами постійного струму до 1000 В та потужностями від десятків до сотень кіловат. У таких умовах навіть короточасний контакт з відкритими струмоведучими частинами може становити серйозну небезпеку для життя людини. Крім того, під час роботи силових перетворювачів виникають значні теплові втрати, які можуть призводити до перегріву обладнання та створювати ризик виникнення пожежонебезпечних ситуацій.

Під час виконання досліджень, пов'язаних із силовими перетворювачами зарядних станцій електромобілів, необхідно забезпечити дотримання вимог електробезпеки, використання справного вимірювального обладнання, наявність захисного заземлення, автоматичних засобів захисту від коротких замикань і перевантажень, а також виконання робіт відповідно до чинних нормативних документів.

З урахуванням специфіки досліджуваного обладнання основним завданням розділу охорони праці є розробка та обґрунтування заходів щодо забезпечення безпечних умов праці під час проєктування, моделювання, налагодження та експлуатації силових перетворювачів зарядних станцій електромобілів. Особлива увага приділяється питанням електробезпеки, пожежної безпеки, захисту від впливу електромагнітних полів та забезпеченню нормативних параметрів виробничого середовища.

Реалізація зазначених заходів дозволяє мінімізувати ризик виникнення нещасних випадків, підвищити надійність роботи обладнання та забезпечити безпечні умови праці для персоналу, який займається розробкою та обслуговуванням сучасних зарядних станцій електромобілів.

4.2 Аналіз умов праці при розробці та дослідженні силових перетворювачів зарядних станцій електромобілів. Виявлення небезпечних і шкідливих виробничих факторів

У межах даної бакалаврської кваліфікаційної роботи розглядаються сучасні

топології силових перетворювачів зарядних станцій електромобілів. Роботи, пов'язані з дослідженням, проєктуванням, моделюванням, складанням та випробуванням силових електронних модулів, виконуються в умовах навчально-дослідної лабораторії або конструкторського бюро, обладнаного персональними комп'ютерами, вимірювальною апаратурою та макетами силових електротехнічних пристроїв.

Під час виконання робіт з аналізу, налагодження та тестування силових перетворювачів зарядних станцій на працівника можуть впливати небезпечні та шкідливі виробничі фактори різної природи. Відповідно до класифікації чинних нормативних документів їх можна поділити на фізичні, хімічні та психофізіологічні.

4.2.1. Фізичні небезпечні та шкідливі виробничі фактори

До фізичних факторів, характерних для робіт із силовою електронікою та зарядними станціями електромобілів, належать[16]:

- підвищена напруга в електричних колах силових перетворювачів. Під час дослідження та налагодження обладнання можливий контакт із колами змінного струму напругою 380 В та колами постійного струму напругою до 1000 В, що створює небезпеку ураження електричним струмом;

- підвищена температура поверхонь силових напівпровідникових приладів, радіаторів, дроселів та трансформаторів. У процесі роботи силових модулів температура окремих елементів може перевищувати 70–90 °С, що створює ризик термічних опіків;

- електромагнітні поля, які виникають під час роботи високочастотних перетворювачів. Джерелами електромагнітного випромінювання є силові ключі, трансформатори та дроселі, що працюють на частотах від десятків до сотень кілогерц;

- недостатня або нерівномірна освітленість робочої зони під час виконання монтажних та налагоджувальних робіт, що може призводити до підвищеної

втомлюваності працівника та збільшення ймовірності помилок;

- підвищений рівень шуму, який створюється вентиляторами систем охолодження, джерелами живлення та іншими елементами лабораторного обладнання;

- відхилення параметрів мікроклімату від нормативних значень, зокрема підвищена температура повітря в приміщенні внаслідок тепловиділення електронного обладнання або недостатньої ефективності систем вентиляції.

4.2.2 Хімічні небезпечні та шкідливі виробничі фактори

Під час складання та монтажу експериментальних зразків силових перетворювачів можуть виникати шкідливі хімічні фактори, зокрема:

- виділення парів флюсів, каніфолі та продуктів пайки під час монтажу друкованих плат;

- можливе потрапляння в повітря робочої зони аерозолів свинцю та інших компонентів припоїв при недотриманні технології виконання паяльних робіт;

- утворення продуктів термічного розкладання ізоляційних матеріалів при аварійних режимах роботи силового обладнання;

- накопичення пилу на поверхнях електронних компонентів та вентиляційних каналах обладнання, що може негативно впливати як на здоров'я персоналу, так і на надійність роботи технічних засобів.

4.2.3 Психофізіологічні небезпечні та шкідливі виробничі фактори

Виконання робіт, пов'язаних із дослідженням силових перетворювачів зарядних станцій електромобілів, супроводжується значним інтелектуальним навантаженням та потребує високого рівня концентрації уваги.

До основних психофізіологічних факторів належать:

- підвищене розумове навантаження під час аналізу схем силових перетворювачів, розрахунків та моделювання режимів роботи;

- тривала робота за персональним комп'ютером, що може призводити до втоми органів зору та опорно-рухового апарату;
- емоційне напруження, пов'язане з необхідністю роботи з високовольтним обладнанням та відповідальністю за правильність проведення експериментів;
- статичні навантаження, що виникають під час тривалого перебування в сидячому положенні при виконанні розрахунків та комп'ютерного моделювання;
- необхідність постійного контролю великої кількості параметрів під час випробувань силових модулів та зарядних пристроїв.

Проведений аналіз умов праці показав, що найбільшу небезпеку під час виконання робіт становлять ураження електричним струмом, вплив підвищених температур силових елементів, електромагнітних полів та шкідливих речовин, які можуть виділятися під час монтажних робіт. Тому подальші заходи з охорони праці повинні бути спрямовані на забезпечення електробезпеки, пожежної безпеки, нормалізацію параметрів мікроклімату та створення комфортних умов праці для персоналу, який займається розробкою та дослідженням силових перетворювачів зарядних станцій електромобілів.

4.3 Розробка організаційних та технічних заходів з охорони праці під час розробки, налагодження та дослідження силових перетворювачів зарядних станцій електромобілів

На основі проведеного аналізу умов праці та виявлених небезпечних і шкідливих виробничих факторів необхідно розробити комплекс організаційних і технічних заходів, спрямованих на забезпечення безпечних умов праці під час виконання робіт, пов'язаних із проєктуванням, моделюванням, монтажем, налагодженням та випробуванням силових перетворювачів зарядних станцій електромобілів.

Особливістю досліджуваного обладнання є наявність високих рівнів напруги та струму, використання високочастотних силових перетворювачів,

нагрітих елементів силової електроніки та спеціалізованого вимірювального обладнання. Тому забезпечення безпеки праці повинно базуватися на поєднанні організаційних заходів, технічних засобів захисту та дотриманні вимог чинних нормативно-правових актів з охорони праці.[20-22]

До організаційних заходів належать проведення первинного, повторного та позапланового інструктажів з охорони праці, навчання персоналу правилам безпечної експлуатації електротехнічного обладнання, контроль за дотриманням вимог електробезпеки, а також забезпечення працівників необхідною технічною документацією та засобами індивідуального захисту.

Технічні заходи передбачають застосування захисного заземлення лабораторного обладнання, використання автоматичних вимикачів, пристроїв захисного відключення, захисту від коротких замикань і перевантажень, а також використання ізольованого інструменту під час виконання монтажних та налагоджувальних робіт. Особливу увагу необхідно приділяти контролю стану ізоляції силових кіл та справності вимірювальної апаратури.

Результати аналізу основних небезпечних і шкідливих виробничих факторів та відповідних заходів захисту наведено в таблиці 4.1.

Найменування негативного фактора	Джерело виникнення дії шкідливого фактора	Характер дії на людину	Нормований параметр і нормоване значення	Нормативні документи, що регламентують допустимий рівень фактора
1	2	3	4	5
Підвищена температура поверхонь деталей	Паяльні роботи	Опіки		
Недолік штучного освітлення	Неправильне планування системи штучного освітлення ($E_{\phi}^* = 230$ Лк	Стомлення зорових аналізаторів, загальне стомлення	Освітленість робочої зони $E_n = 300$ Лк	ДБНВ 2.5. – 28 – 2018 «Природне і штучне освітлення»

* E_{ϕ} – фактична освітленість робочої зони; E_n – нормативна освітленість робочої зони

Продовження Таблиці 4.1

1	2	3	4	5
Підвищена напруженість праці	Відповідальність, складність виробничого завдання	Напруженість центральної нервової системи	Енергоза-трати 31.5 кДж	Д.Сан.ПіН 3.32-007-98
Навантаження на зорові аналізатори	Паяльні роботи	Погіршення зору, мігрень		Д.Сан ПіН 3.32-007-98, ДСН 3.36.037-99
Підвищена електрична напруга, замикання якої може відбутися через тіло людини	Електричне обладнання	Електро-травми		ДСТУ 12.1-004-91

4.3.1 Забезпечення нормативних параметрів мікроклімату під час розробки та дослідження силових перетворювачів зарядних станцій електромобілів

Роботи, пов'язані з проєктуванням, моделюванням, програмуванням, монтажем та налагодженням силових перетворювачів зарядних станцій електромобілів, виконуються в умовах навчально-дослідної лабораторії або конструкторського бюро. Основна частина робочого часу працівника пов'язана з роботою за персональним комп'ютером, аналізом схемотехнічних рішень, проведенням розрахунків та налаштуванням експериментальних зразків силових модулів.

Відповідно до ДСН 3.3.6.042-99 «Державні санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень» такі роботи належать до категорії легких фізичних робіт Іа. Для даної категорії характерне виконання робіт переважно у сидячому положенні без значних фізичних навантажень. Енерговитрати працівника при цьому не перевищують 120 ккал/год (139 Вт).

Однією з важливих умов забезпечення безпечної та продуктивної праці є підтримання нормативних параметрів мікроклімату в робочому приміщенні. До основних параметрів мікроклімату належать температура повітря, відносна

вологість та швидкість руху повітря. Відхилення зазначених показників від нормативних значень призводить до зниження працездатності, підвищення втомлюваності, погіршення концентрації уваги та може негативно впливати на здоров'я працівників.

Особливістю лабораторій та конструкторських бюро, де проводяться дослідження силової електроніки, є наявність додаткових джерел тепловиділення. До них належать персональні комп'ютери, монітори, лабораторні джерела живлення, вимірювальні прилади, а також експериментальні зразки силових перетворювачів, які під час випробувань можуть виділяти значну кількість теплової енергії. У літній період це може призводити до перевищення допустимої температури повітря у приміщенні, а в зимовий період — до її зниження нижче нормативного рівня при недостатній ефективності системи опалення.

Згідно з вимогами ДСН 3.3.6.042-99 для категорії робіт Іа рекомендовані параметри мікроклімату наведені в таблиці 4.2

Таблиця 4.2 Значення оптимальних і допустимих параметрів мікроклімату для приміщення конструкторського бюро НВДЕ (фізичні роботи категорії 1-а)

Параметр	Період року			
	Холодний		Теплий	
	Оптимальний	Допустимий	Оптимальний	Допустимий
Температура, °C	22 – 24	21 – 25	23 – 25	22 – 28
Відносна вологість, %	40 – 60	75	40 – 60	55 (при 28 °C)
Швидкість руху повітря, м/с	Не більше 0.1	Не більше 0.1	Не більше 0.1	0.1 – 0.2

Проведений аналіз умов праці показує, що в теплий період року при підвищених температурах зовнішнього повітря, а також у зимовий період за несприятливих погодних умов підтримання нормативних параметрів

мікроклімату лише за рахунок природної вентиляції є недостатнім. Додаткове тепловиділення від комп'ютерної техніки та лабораторного обладнання також сприяє погіршенню мікрокліматичних умов.

Для забезпечення нормативних параметрів виробничого середовища доцільно застосувати систему кондиціонування повітря. Використання кондиціонера дозволяє підтримувати необхідну температуру повітря незалежно від пори року, забезпечувати комфортні умови праці для персоналу та стабільні умови експлуатації електронного обладнання.

Крім підтримання температурного режиму, система кондиціонування забезпечує циркуляцію повітря, часткове очищення від пилу та стабілізацію вологості, що позитивно впливає як на самопочуття працівників, так і на надійність функціонування електронних пристроїв та вимірювальної апаратури.

Таким чином, для забезпечення вимог ДСН 3.3.6.042-99 у приміщенні, де виконуються роботи з дослідження та розробки силових перетворювачів зарядних станцій електромобілів, необхідно передбачити використання системи кондиціонування повітря, яка дозволить підтримувати нормативні параметри мікроклімату та створити безпечні й комфортні умови праці для персоналу.

4.3.2 Забезпечення нормативного санітарно-гігієнічного складу повітря робочої зони під час монтажу та налагодження силових перетворювачів зарядних станцій електромобілів. Проектування місцевої витяжної вентиляції

Під час виконання робіт, пов'язаних із монтажем, налагодженням та дослідженням силових перетворювачів зарядних станцій електромобілів, важливим завданням охорони праці є забезпечення нормативного санітарно-гігієнічного стану повітря робочої зони. Незважаючи на широке використання сучасних електронних компонентів, автоматизованих засобів проектування та комп'ютерного моделювання, значна частина дослідницьких робіт передбачає виготовлення та монтаж експериментальних зразків друкованих плат, силових модулів і систем керування, що супроводжується виконанням паяльних операцій.

У процесі пайки електронних компонентів відбувається виділення продуктів термічного розкладання флюсів, каніфолі та припоїв. До складу таких виділень можуть входити аерозолі, органічні сполуки та дрібнодисперсні частинки, які при тривалому впливі негативно впливають на органи дихання, слизові оболонки та загальний стан здоров'я працівників. Додатковим джерелом забруднення повітря можуть бути нагріті ізоляційні матеріали, полімерні елементи друкованих плат та допоміжні технологічні речовини, що використовуються під час монтажу та ремонту електронного обладнання.

Згідно з вимогами санітарно-гігієнічних норм, концентрація шкідливих речовин у повітрі робочої зони не повинна перевищувати встановлених гранично допустимих концентрацій. Для забезпечення нормативних умов праці необхідно застосовувати ефективні системи вентиляції, які забезпечують своєчасне видалення забрудненого повітря та подачу свіжого повітря до робочого приміщення.

Найбільш ефективним рішенням для робочих місць, де виконуються монтажні та паяльні роботи, є використання місцевої витяжної вентиляції. На відміну від загальнообмінної вентиляції, місцева витяжка забезпечує видалення шкідливих речовин безпосередньо в місці їх утворення, що значно знижує їх поширення по приміщенню та підвищує ефективність очищення повітря.

Для робочого місця, на якому здійснюється складання та налагодження вузлів силових перетворювачів зарядних станцій електромобілів, доцільно застосувати витяжний пристрій локальної дії у вигляді витяжного ковпака або витяжного рукава з регульованим положенням повітрозбірника. Витяжний пристрій розміщується безпосередньо над зоною пайки на відстані 200–300 мм від джерела виділень. Така конструкція дозволяє ефективно уловлювати пари флюсів і продукти пайки ще до їх потрапляння в повітря робочої зони.

Система місцевої вентиляції повинна включати витяжний пристрій, мережу повітроводів, вентилятор та систему очищення повітря. Для додаткового підвищення ефективності рекомендується використовувати комбіновані фільтри,

що поєднують механічне очищення від дрібнодисперсних частинок та сорбційне очищення від органічних сполук і запахів.

Крім забезпечення нормативного складу повітря, використання місцевої витяжної вентиляції дозволяє покращити умови праці персоналу, знизити рівень професійних ризиків, підвищити комфорт роботи та зменшити ймовірність виникнення професійних захворювань органів дихання.

Для підвищення ефективності роботи вентиляційної системи доцільно поєднувати місцеву витяжну вентиляцію із загальнообмінною припливно-витяжною вентиляцією приміщення. Такий підхід забезпечує підтримання нормативного повітрообміну в лабораторії або конструкторському бюро, де виконуються роботи з розробки та дослідження силових перетворювачів зарядних станцій електромобілів.

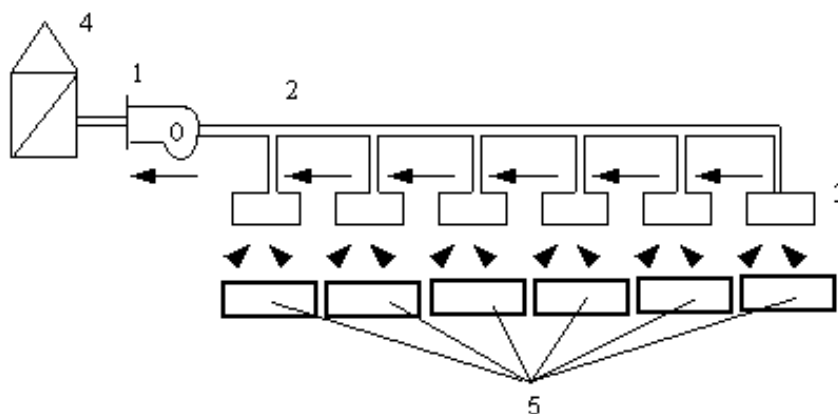


Рисунок 4.2 - Схема місцевої витяжної вентиляції: 1 – вентилятор; 2 – повітряно-провод; 3 – місцевий відсос; 4 – випускна труба; 5 – робочі місця

Для проєктування місцевої витяжної вентиляції необхідно визначити витрату повітря, яку повинен забезпечувати витяжний пристрій для ефективного видалення шкідливих виділень із робочої зони. Кількість повітря, що видаляється місцевим відсмоктувачем протягом години, розраховується за формулою:

$$L = 3600 \cdot v \cdot F_{\text{п}}, \quad (4.1)$$

де v - середня швидкість усмоктування повітря у відкритий проріз шафи (парасоля), м/с;

$F_{\text{п}}$ - площа відкритого прорізу, м².

Для забезпечення нормативного санітарно-гігієнічного стану повітря робочої зони на ділянці монтажу та налагодження електронних модулів силових перетворювачів передбачається застосування системи місцевої витяжної вентиляції. Під час виконання паяльних робіт відбувається виділення шкідливих аерозолів і парів, які можуть негативно впливати на здоров'я персоналу. Тому кожне робоче місце оснащується локальним витяжним пристроєм, параметри якого визначаються кількістю шкідливих речовин, що надходять у повітря робочої зони в процесі паяння. Потрібна продуктивність вентиляційної системи розраховується з урахуванням інтенсивності виділень та нормативних вимог до якості повітря виробничих приміщень.

$$K_c = p \cdot r \cdot R \cdot N, \quad (4.2)$$

де p - відносна кількість вмісту свинцю в припої;

r - відносна кількість свинцю, що випаровується в повітря робочої зони при одній пайці;

R - витрата припою на одну пайку;

N - кількість пайок у годину.

У процесі монтажу та налагодження електронних модулів силових перетворювачів широко застосовуються свинцево-олов'яні припої, серед яких одним із найбільш поширених є припій марки ПОС-50. Вміст свинцю в такому припої становить близько 50 %, тобто масова частка свинцю дорівнює $p=0,5$. Під час виконання паяльних операцій частина свинцю випаровується та потрапляє в повітря робочої зони у вигляді аерозолів і парів. Залежно від температурного режиму пайки та технологічних особливостей процесу кількість свинцю, що надходить у повітря, може становити від 2 до 5 % від його загальної маси, тобто $r=0,02 \div 0,05$.

Практичний досвід виконання електромонтажних робіт показує, що на формування одного паяного з'єднання в середньому витрачається близько 0,1 г припою. При інтенсивності виконання робіт приблизно 50–60 паяних з'єднань за годину в повітря робочої зони може надходити помітна кількість шкідливих речовин. Тому під час проектування системи місцевої витяжної вентиляції необхідно враховувати інтенсивність утворення аерозолів свинцю та забезпечувати їх своєчасне видалення безпосередньо в зоні виконання паяльних робіт. Це дозволяє підтримувати концентрацію шкідливих речовин у межах допустимих санітарно-гігієнічних норм і забезпечувати безпечні умови праці персоналу.

Підставивши чисельні значення у формулу, одержимо:

$$K_c = 0,5 \cdot 0,03 \cdot 0,1 \cdot 60 = 0,0905 \text{ г.}$$

Визначаємо кількість повітря, яке необхідно видалити з робочої зони:

$$L = K_c / \text{ГДК}_c, \quad (4.3)$$

де $\text{ГДК}_c = \text{ГДК}$ пари свинцю.

ГДК_c становить $0,01 \text{ мг/м}^3$. Розрахуємо L :

$$L = 0,0905 / (0,01 \cdot 10)^{-3} = 9050 \text{ м}^3.$$

Визначаємо площу перетину прийомного (витяжного) отвору парасоля:

$$F_{\pi} = L / (3600 \cdot v). \quad (4.4)$$

Передбачаємо, що середня швидкість усмоктування повітря становить 1,2 м/с. Розрахуємо площу перетину:

$$F_{\pi} = 9050 / (3600 \cdot 1,2) = 2,09 \text{ м}^2.$$

Тобто, для забезпечення концентрації пари свинцю в повітрі робочої зони площа перетину витяжного отвору парасоля повинна становити 2,09 м².

4.4 Забезпечення електробезпеки під час дослідження та випробування силових перетворювачів зарядних станцій електромобілів

4.4.1 Загальні положення

Одним із найважливіших аспектів охорони праці під час виконання робіт, пов'язаних із дослідженням, налагодженням та випробуванням силових перетворювачів зарядних станцій електромобілів, є забезпечення належного рівня електробезпеки. Це обумовлено тим, що сучасні зарядні станції працюють із високими рівнями напруги та струму, а їх силові модулі містять значну кількість електротехнічного обладнання, яке становить потенційну небезпеку для обслуговуючого персоналу.

Роботи, пов'язані з проєктуванням, моделюванням, монтажем та експериментальними дослідженнями силових перетворювачів, виконуються в умовах навчально-дослідної лабораторії або конструкторського бюро. У приміщенні використовуються персональні комп'ютери, лабораторні джерела живлення, осцилографи, вимірювальні комплекси, а також дослідні зразки AC/DC та DC/DC-перетворювачів, що працюють від мережі змінного струму та шин постійного струму підвищеної напруги.

Відповідно до вимог Правил улаштування електроустановок (ПУЕ) та чинних нормативних документів з електробезпеки, приміщення, у якому виконуються роботи з електронним та електротехнічним обладнанням, може бути віднесене до приміщень із підвищеною небезпекою ураження електричним струмом. Це пояснюється наявністю значної кількості електрообладнання, струмоведучих частин, металевих корпусів приладів та необхідністю проведення вимірювань на діючих електричних установках.

Особливістю сучасних силових перетворювачів зарядних станцій електромобілів є використання високовольтних шин постійного струму. У швидкісних зарядних станціях напруга DC-шини може становити від 400 до 1000 В, а потужність окремих модулів досягати десятків і навіть сотень кіловат. За таких умов навіть короточасний контакт людини зі струмоведучими частинами може призвести до тяжких наслідків, включаючи електротравми, опіки та смертельно небезпечне ураження електричним струмом.

Електрообладнання, що використовується під час дослідження силових перетворювачів, належить до електроустановок напругою до 1000 В. При проведенні експериментальних випробувань можливі значні струми короткого замикання, величина яких визначається параметрами джерел живлення, накопичувальних конденсаторів та силових напівпровідникових модулів. Тому особливого значення набуває застосування технічних засобів захисту від аварійних режимів роботи.

Основними небезпечними факторами електричного походження під час виконання робіт є:

- прямий дотик до відкритих струмоведучих частин електрообладнання;
- непрямий дотик до металевих корпусів обладнання, які можуть опинитися під напругою внаслідок пошкодження ізоляції;
- виникнення струмів короткого замикання та електричної дуги;
- накопичення залишкової енергії в конденсаторах силових перетворювачів після вимкнення живлення;
- поява небезпечних напруг кроку та дотику в аварійних режимах роботи.

Для забезпечення належного рівня електробезпеки необхідно передбачити комплекс організаційних і технічних заходів, які включають використання захисного заземлення, автоматичного відключення живлення при пошкодженні ізоляції, застосування пристроїв захисного відключення, ізоляцію струмоведучих частин, використання попереджувальних знаків безпеки та проведення регулярного контролю технічного стану електрообладнання.

4.4.2 Організаційно-технічні заходи забезпечення електробезпеки під час дослідження та випробування силових перетворювачів зарядних станцій електромобілів

Забезпечення електробезпеки під час розробки, налагодження та випробування силових перетворювачів зарядних станцій електромобілів є одним із пріоритетних завдань системи охорони праці. Практика експлуатації електротехнічного обладнання свідчить, що високий рівень безпеки досягається не лише завдяки використанню сучасних технічних засобів захисту, а й шляхом правильної організації робіт, підготовки персоналу та суворого дотримання вимог нормативних документів.

Організація безпечної експлуатації електроустановок здійснюється відповідно до вимог чинних нормативно-правових актів, зокрема Правил безпечної експлуатації електроустановок споживачів (ПБЕЕС), Правил улаштування електроустановок (ПУЕ), а також внутрішніх інструкцій з охорони праці та електробезпеки.

Перед допуском до роботи всі працівники, які беруть участь у дослідженні, монтажі або випробуванні силових перетворювачів, проходять вступний інструктаж з охорони праці та первинний інструктаж безпосередньо на робочому місці. Під час проведення інструктажів особлива увага приділяється правилам роботи з високовольтними колами, порядку використання вимірювальної апаратури, діям у разі виникнення аварійних ситуацій та наданню першої допомоги при ураженні електричним струмом.

У лабораторії або конструкторському бюро, де виконуються роботи із силовими перетворювачами зарядних станцій електромобілів, реалізується комплекс технічних заходів електрозахисту, основними з яких є:

- систематичний контроль технічного стану електрообладнання та перевірка опору ізоляції електричних кіл;

- застосування захисного заземлення металевих корпусів електротехнічного обладнання;
- використання автоматичних вимикачів для захисту від струмів короткого замикання та перевантаження;
- застосування пристроїв захисного відключення (ПЗВ) для швидкого знеструмлення електроустановки при виникненні небезпечних режимів роботи;
- використання подвійної або посиленої ізоляції електрообладнання;
- огороження відкритих струмоведучих частин та встановлення попереджувальних знаків безпеки.

Особливу увагу необхідно приділяти контролю стану ізоляції електричних мереж та обладнання. Відповідно до вимог нормативних документів опір ізоляції електричних мереж напругою до 1000 В повинен бути не меншим за 0,5 МОм. Перевірка цього параметра здійснюється у встановлені терміни із застосуванням спеціальних вимірювальних приладів.

У процесі дослідження силових перетворювачів використовуються електричні мережі змінного струму напругою 220/380 В, а також шини постійного струму напругою до 800–1000 В, характерні для сучасних швидкісних зарядних станцій електромобілів. Наявність таких рівнів напруги обумовлює необхідність застосування ефективної системи захисного заземлення та автоматичного відключення живлення в аварійних режимах.

Під час проведення монтажних і налагоджувальних робіт застосовується ручний електрифікований інструмент, вимірювальні прилади, паяльне обладнання та лабораторні джерела живлення. Для запобігання ураженню електричним струмом використовується обладнання з подвійною ізоляцією або захисним заземленням. Кабелі живлення повинні мати справну ізоляцію, бути захищеними від механічних пошкоджень та відповідати вимогам електробезпеки.

Особливу небезпеку під час випробування силових перетворювачів становлять накопичувальні конденсатори DC-шини, які можуть зберігати

небезпечний рівень електричної енергії навіть після вимкнення обладнання від мережі. Тому перед виконанням будь-яких робіт необхідно проводити примусове розрядження конденсаторів та перевірку відсутності залишкової напруги.

Для зниження ризику виникнення аварійних ситуацій робочі місця повинні бути забезпечені діелектричними килимками, ізольованим інструментом, попереджувальними плакатами та засобами пожежогасіння, призначеними для електроустановок, що перебувають під напругою.

Таким чином, комплексне поєднання організаційних та технічних заходів електробезпеки дозволяє суттєво знизити ризик ураження персоналу електричним струмом, підвищити безпеку виконання експериментальних робіт та забезпечити надійну експлуатацію силових перетворювачів зарядних станцій електромобілів.

4.5 Забезпечення пожежної безпеки під час розробки та дослідження силових перетворювачів зарядних станцій електромобілів

Пожежна безпека є важливою складовою системи охорони праці під час виконання робіт, пов'язаних із проектуванням, монтажем, налагодженням та випробуванням силових перетворювачів зарядних станцій електромобілів. Наявність електротехнічного обладнання, високовольтних джерел живлення, силових напівпровідникових модулів та значних електричних потужностей створює потенційний ризик виникнення пожежонебезпечних ситуацій, що потребує впровадження комплексу організаційних і технічних заходів пожежного захисту.

Відповідно до характеристик технологічного процесу та наявних у приміщенні горючих матеріалів, навчально-дослідна лабораторія або конструкторське бюро, де виконуються роботи з дослідження силових перетворювачів зарядних станцій електромобілів, належить до категорії Д за вибухопожежною та пожежною безпекою. Основну частину обладнання складають електронні та електротехнічні пристрої, а кількість горючих речовин є відносно незначною.

До найбільш імовірних джерел виникнення пожежі в приміщенні належать короткі замикання в електричних колах, перевантаження електричних мереж, перегрів провідників та контактних з'єднань, несправності силових напівпровідникових модулів, пошкодження ізоляції кабелів і проводів, а також порушення правил експлуатації електрообладнання. Під час випробування силових перетворювачів додаткову небезпеку становлять високі струми та значні запаси енергії, накопичені в конденсаторах шини постійного струму.

Особливу увагу необхідно приділяти тепловим режимам роботи силових перетворювачів. Несправність систем охолодження, перевантаження силових ключів або помилки в налаштуванні захистів можуть призвести до перегріву напівпровідникових елементів, дроселів, трансформаторів та інших компонентів, що збільшує ризик займання ізоляційних матеріалів і корпусних елементів обладнання.

Одним із найважливіших напрямків профілактики пожеж є проведення систематичного навчання працівників правилам пожежної безпеки та діям у разі виникнення надзвичайних ситуацій. Усі працівники повинні проходити відповідні інструктажі та бути ознайомлені з правилами користування первинними засобами пожежогасіння, порядком евакуації та алгоритмом повідомлення екстрених служб.

Для забезпечення належного рівня пожежної безпеки в лабораторії призначається відповідальна особа, яка здійснює контроль за дотриманням встановленого протипожежного режиму. До її обов'язків належать організація профілактичних перевірок електрообладнання, контроль справності систем електроживлення та вентиляції, своєчасне усунення виявлених несправностей, а також забезпечення наявності та працездатності первинних засобів пожежогасіння.

Після завершення робочого дня повинно проводитися відключення електроживлення випробувальних стендів, лабораторних джерел живлення, вимірювального обладнання та іншої апаратури, за винятком пристроїв, що повинні перебувати під напругою відповідно до технологічних вимог. Особлива

увага приділяється перевірці відсутності залишкової напруги на накопичувальних конденсаторах силових перетворювачів.

Для підвищення рівня пожежної безпеки необхідно виконувати такі технічні заходи:

- застосування автоматичних вимикачів та плавких запобіжників для захисту від коротких замикань і перевантажень;
- використання негорючих або важкогорючих ізоляційних матеріалів;
- забезпечення ефективного охолодження силових модулів;
- періодичний контроль стану контактних з'єднань та ізоляції електрообладнання;
- використання кабельної продукції, що відповідає вимогам пожежної безпеки;
- оснащення приміщення вогнегасниками, призначеними для гасіння електроустановок під напругою.

Для гасіння можливих загорянь електротехнічного обладнання доцільно використовувати вуглекислотні або порошкові вогнегасники, які не пошкоджують електронні компоненти та можуть застосовуватися на електроустановках, що перебувають під напругою. Розміщення засобів пожежогасіння повинно забезпечувати швидкий і безперешкодний доступ до них із будь-якої точки робочого приміщення.

4.6 Висновки до розділу «Охорона праці»

У даному розділі розглянуто питання охорони праці та безпеки під час виконання робіт, пов'язаних із дослідженням, монтажем, налагодженням і випробуванням силових перетворювачів зарядних станцій електромобілів. Проведено аналіз умов праці в навчально-дослідній лабораторії та визначено основні небезпечні й шкідливі виробничі фактори, характерні для роботи з сучасним електротехнічним та електронним обладнанням.

У результаті аналізу встановлено, що найбільшу небезпеку для персоналу становлять підвищена електрична напруга, нагріті поверхні силових елементів, електромагнітні поля, шкідливі речовини, які можуть виділятися під час монтажних робіт, а також психофізіологічні навантаження, пов'язані з виконанням складних інженерних завдань. Для зниження впливу зазначених факторів розроблено комплекс організаційних та технічних заходів, спрямованих на створення безпечних і комфортних умов праці.

Визначено нормативні параметри мікроклімату для приміщень, у яких виконуються роботи з проєктування та дослідження силових перетворювачів. Особливу увагу приділено забезпеченню нормативного складу повітря робочої зони під час виконання монтажних і паяльних робіт. Запропоновано застосування місцевої витяжної вентиляції для ефективного видалення шкідливих аерозолів і парів, що утворюються під час складання та налагодження електронних модулів систем керування силовими перетворювачами. Виконано розрахунок основних параметрів вентиляційної системи та обґрунтовано її використання для забезпечення безпечних умов праці.

У розділі також розглянуто питання електробезпеки під час роботи з високовольтним обладнанням зарядних станцій електромобілів. Запропоновано комплекс організаційних і технічних заходів, які включають використання захисного заземлення, автоматичного відключення живлення, контролю стану ізоляції, застосування засобів індивідуального захисту та дотримання вимог нормативних документів з електробезпеки.

Крім того, розроблено заходи щодо забезпечення пожежної безпеки в приміщеннях, де проводяться дослідження та випробування силових перетворювачів. Таким чином, реалізація запропонованих організаційних і технічних рішень дозволяє забезпечити нормативні умови праці персоналу, підвищити рівень електро- та пожежної безпеки, знизити вплив шкідливих виробничих факторів і створити безпечне виробниче середовище під час розробки та дослідження силових перетворювачів зарядних станцій електромобілів.

ВИСНОВКИ

У бакалаврській кваліфікаційній роботі виконано аналіз сучасних топологій силових перетворювачів, що застосовуються в зарядних станціях електромобілів. Проведене дослідження показало, що вибір структури AC/DC та DC/DC-перетворювачів безпосередньо впливає на енергоефективність, надійність, щільність потужності, вартість та функціональні можливості зарядного обладнання.

У роботі розглянуто основні типи зарядних станцій електромобілів та визначено роль силових перетворювачів у процесі передачі електричної енергії від мережі до акумуляторної батареї транспортного засобу. Встановлено, що для сучасних швидкісних зарядних станцій найбільшого поширення набули двокаскадні структури, які складаються з AC/DC-перетворювача з корекцією коефіцієнта потужності та ізольованого DC/DC-перетворювача.

Проведений аналіз AC/DC-топологій показав, що традиційний Boost PFC характеризується простотою реалізації, проте має порівняно низький коефіцієнт корисної дії через втрати у випрямному мосту. Застосування Interleaved Boost PFC дозволяє зменшити пульсації струму та покращити електромагнітну сумісність. Найвищі показники ефективності серед однофазних рішень демонструє Totem-Pole PFC, який завдяки відсутності діодного мосту забезпечує ККД понад 98 %. Для трифазних зарядних станцій перспективними рішеннями є Vienna Rectifier та NPC-конвертер, які характеризуються високою енергоефективністю, низьким рівнем гармонічних спотворень та покращеними масогабаритними характеристиками.

У роботі також досліджено основні DC/DC-топології, що використовуються у зарядних модулях електромобілів. Встановлено, що повномостовий перетворювач зі зсувом фаз (PSFB) поєднує відносну простоту реалізації та високу ефективність завдяки режиму м'якого перемикування ZVS. LLC-резонансний перетворювач забезпечує найвищий коефіцієнт корисної дії завдяки реалізації режимів ZVS та ZCS, проте не підтримує двонаправлений потік енергії. Найбільш

перспективною топологією для систем із підтримкою Vehicle-to-Grid є Dual Active Bridge (DAB), який забезпечує двонаправлений обмін енергією та широкий діапазон регулювання напруги.

На основі аналізу сучасних силових перетворювачів виконано порівняння їх характеристик за такими критеріями, як коефіцієнт корисної дії, складність системи керування, можливість двонаправленої передачі енергії, щільність потужності та вимоги до системи охолодження. Встановлено, що для зарядних станцій нового покоління найбільш перспективними є топології Vienna Rectifier, Totem-Pole PFC, NPC та DAB, які забезпечують високі техніко-економічні показники та відповідають сучасним вимогам електромобільної інфраструктури.

У роботі проведено розрахунок енергетичної ефективності зарядної станції потужністю 150 кВт для різних комбінацій силових перетворювачів. Результати розрахунків показали, що найкращі показники серед розглянутих варіантів демонструє комбінація Vienna Rectifier та LLC-конвертера, для якої загальний коефіцієнт корисної дії становить близько 96 %, а втрати потужності не перевищують 6,2 кВт. Порівняно з традиційною комбінацією Boost PFC та PSFB втрати потужності зменшуються більш ніж удвічі.

Також встановлено, що використання високоефективних топологій дозволяє зменшити річне споживання електроенергії та забезпечити економію понад 18 МВт·год на рік для однієї зарядної станції потужністю 150 кВт. Це підтверджує доцільність впровадження сучасних силових перетворювачів у швидкісних зарядних комплексах електромобілів.

Отже, поставлені в роботі завдання виконано повністю. Проведене дослідження підтвердило, що подальший розвиток зарядних станцій електромобілів пов'язаний із впровадженням високоефективних багаторівневих AC/DC-перетворювачів, резонансних DC/DC-конвертерів та широким використанням напівпровідникових приладів на основі карбіду кремнію (SiC) і нітриду галію (GaN), які забезпечують підвищення енергоефективності, щільності потужності та функціональних можливостей зарядного обладнання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Kolar J. W., Friedli T. The Essence of Three-Phase PFC Rectifier Systems. Part I // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2013. – Vol. 28, No. 1. – P. 176–198.
2. Kolar J. W. Vienna Rectifier – A Novel Three-Phase PWM Rectifier System // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 1994. – Vol. 41, No. 1. – P. 48–57.
3. Texas Instruments. Power Topology Considerations for Electric Vehicle Charging Stations. Application Report SLLA497. – 2020. – 20 p.
4. Wolfspeed. EV Charging Power Topologies Design Guidebook. – Durham, NC, USA, 2024. – 78 p.
5. De Doncker R. W. A. A., Divan D. M., Kheraluwala M. H. A Three-Phase Soft-Switched High-Power-Density DC/DC Converter for High-Power Applications // IEEE Transactions on Industry Applications. – 1991. – Vol. 27, No. 1. – P. 63–73.
6. Kheraluwala M. H., Gascoigne R. W., Divan D. M., Baumann E. D. Performance Characterization of a High-Power Dual Active Bridge DC-to-DC Converter // IEEE Transactions on Industry Applications. – 1992. – Vol. 28, No. 6. – P. 1294–1301.
7. Jain A. K., Ayyanar R. PWM Control of Dual Active Bridge Converter for Power Management in Electric Vehicles // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2011. – Vol. 58, No. 10. – P. 4670–4676.
8. Mollahasanoğlu M. Evaluation of Three-Phase Three-Level NPC PFC Rectifier with Isolated DC/DC Converters for EV Fast Charging Stations // Pamukkale University Journal of Engineering Sciences. – 2024.
9. Dini P., Bellini A., Tinarelli R. System-Level Compact Review of On-Board Charging Architectures for Electric Vehicles // Batteries. – 2025. – Vol. 11, No. 9. – Art. 341.

10. Acharige S. S. G., Haque M. E., Arif M. T., Hosseinzadeh N. Review of Electric Vehicle Charging Technologies, Configurations, and Architectures // Energies. – 2022. – Vol. 15.
11. Fiorio L. V., Dezuo T. J. M., Novaes Y. R. Switched Control Applied to a Totem-Pole Bridgeless Rectifier for Power Factor Correction // IEEE Access. – 2021.
12. Arrow Electronics. Power Supply Topologies in EV Charging Applications. – 2024.
13. Texas Instruments. Vienna Rectifier-Based Three-Phase Power Factor Correction Reference Design Using C2000 MCU. Reference Design Guide. – Dallas, USA, 2020.
14. Texas Instruments. Dual Active Bridge Reference Design for Level-3 Electric Vehicle Charging Stations. Technical Reference. – Dallas, USA, 2020.
15. Закон України «Про охорону праці».
16. ДСТУ 12.0.003-74*. Небезпечні і шкідливі виробничі фактори. Класифікація.
17. ДБН А.3.2-2-2009. Охорона праці і промислова безпека у будівництві.
18. Серіков Я.О. Промислова безпека та соціальний захист працівників виробничих підприємств, компаній і корпорацій. – Харків: Компанія «ШЕЛЛ в Україні», ХНУМГ, 2015. – 252 с.
19. Система стандартів безпеки праці. ДБН А.3.2-2-2009. Розд. 6. Організація будівельних майданчиків. Розд. 18. Електромонтажні роботи.
20. НПАОП 31.0-3.01-08. Норми безплатної видачі спецодягу та інших засобів індивідуального захисту працівникам електротехнічної промисловості (зі змінами).
21. ДСТУ 12.1.030-81*. ССБТ. Електробезпека. Захисне заземлення. Занулення.
22. ДНАОП 0.00–1.32.01. Правила улаштування електроустановок (зі змінами).
23. Серіков Я.О. Основи електробезпеки: навч. посібник. – Харків: СМІТ, 2011. – 285 с.

**ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ МІСЬКОГО
ГОСПОДАРСТВА імені О.М. Бекетова**

Навчально-науковий інститут енергетичної, інформаційної
та транспортної інфраструктури

Кафедра «Альтернативної електроенергетики та електротехніки»

**ІЛЮСТРАЦІЙНИЙ МАТЕРІАЛ ДО
БАКАЛАВРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ**

на тему:

**“Аналіз сучасних топологій силових перетворювачів зарядних
станцій електромобілів”**

Виконав: студент курсу 3, групи НВДЕ 2023-1у; спеціальність 141 –
Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка; освітня програма –
Нетрадиційні та відновлювальні джерела енергії

Студент:



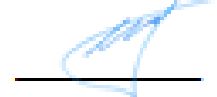
Олександр АЗАРОВ

Керівник роботи:



Іван КОСТЕНКО

Завідувач кафедри:



Олексій ЄГОРОВ

Харків – 2026

ПЕРЕЛІК ГРАФІЧНОГО МАТЕРІАЛУ

1. Титульний аркуш.
2. Перелік графічного матеріалу.
3. Актуальність теми. Мета та завдання роботи.
4. Сучасні AC/DC-топології зарядних станцій електромобілів.
5. Трифазні AC/DC-перетворювачі зарядних станцій.
6. Сучасні DC/DC-перетворювачі зарядних станцій електромобілів.
7. Порівняння AC/DC-топологій.
8. Порівняння DC/DC-топологій
9. Результати розрахунку енергетичної ефективності зарядної станції.
10. Висновки.

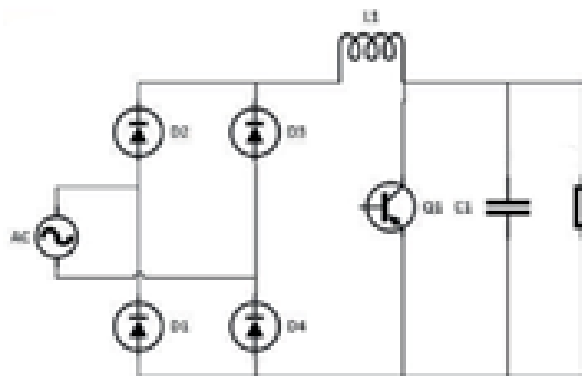
Актуальність теми: Актуальність теми обумовлена стрімким розвитком електромобільного транспорту та необхідністю створення високоефективної зарядної інфраструктури. Одним із ключових елементів сучасних зарядних станцій є силові перетворювачі, які визначають енергоефективність, якість електроенергії, масогабаритні показники та можливість реалізації технології Vehicle-to-Grid (V2G).

META: Аналіз сучасних топологій силових перетворювачів зарядних станцій електромобілів та оцінка їх енергетичної ефективності.

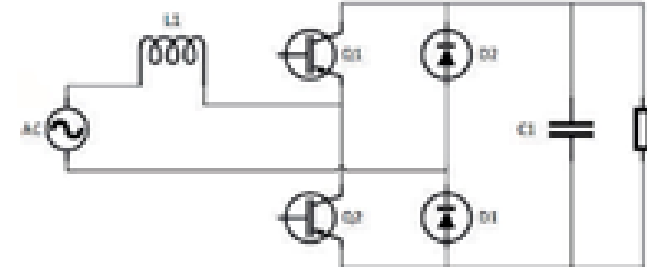
ЗАВДАННЯ:

- проаналізувати структуру зарядних станцій електромобілів;
- дослідити AC/DC та DC/DC топології;
- виконати порівняння характеристик перетворювачів;
- провести розрахунок енергетичної ефективності;
- визначити перспективні рішення для HPS-станцій.

Сучасні AC/DC-топології зарядних станцій

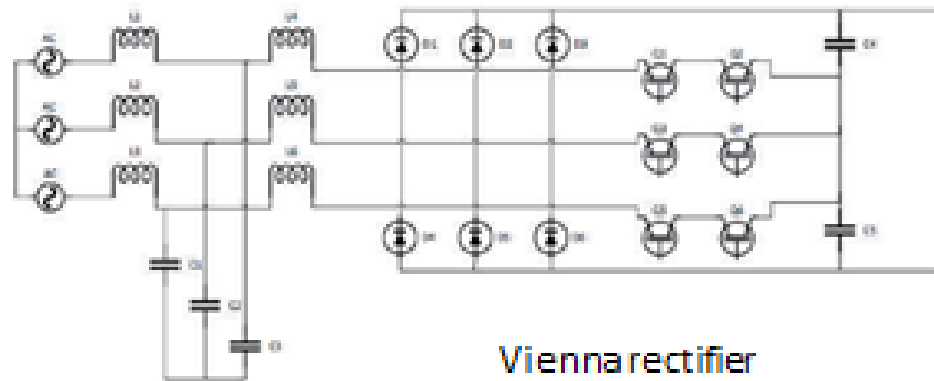


PFC boost converter



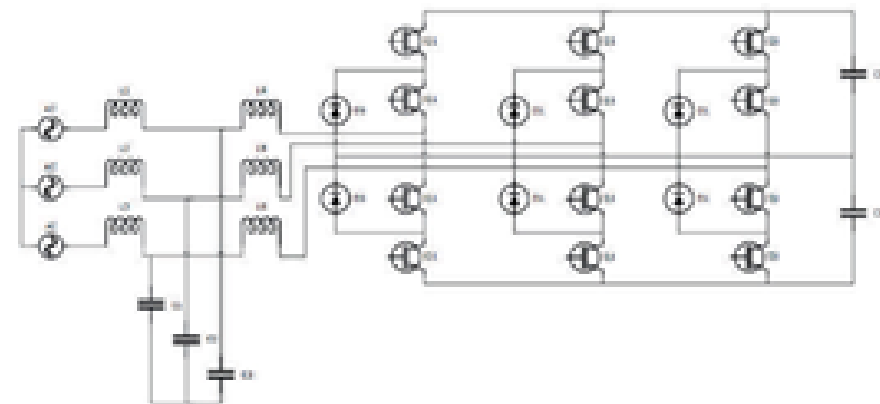
Totem-pole power correction scheme

Для перетворення енергії мережі змінного струму в постійний струм у зарядних станціях застосовуються схеми Boost PFC, Interleaved Boost PFC та Totem-Pole PFC. Основним завданням цих перетворювачів є забезпечення високого коефіцієнта потужності, зниження гармонічних спотворень та формування стабільної DC-шени. Найвищий ККД серед однофазних схем забезпечує Totem-Pole PFC завдяки відсутності діодного мосту.

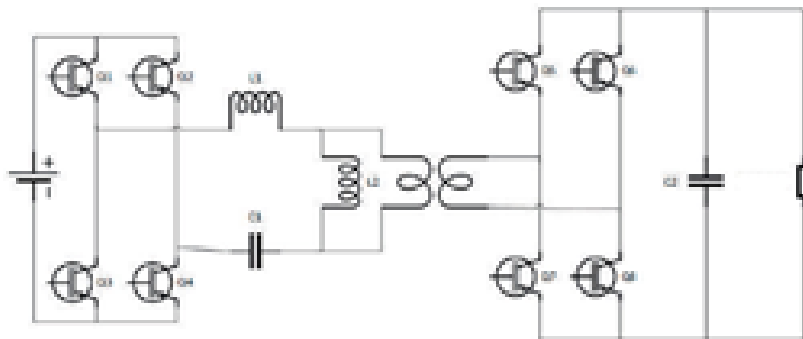


Трифазні AC/DC-перетворювачі

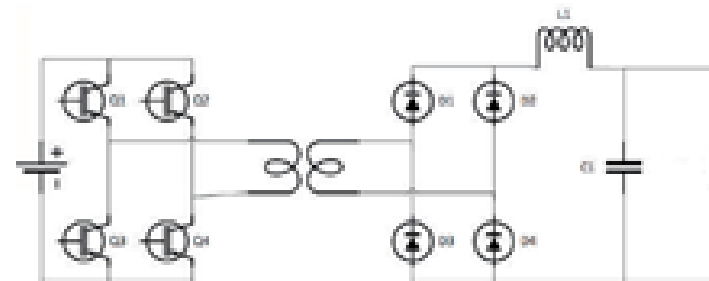
Для швидкісних зарядних станцій потужністю понад 50 кВт широко використовуються Vienna Rectifier та NPC Converter. Vienna Rectifier характеризується високим ККД, низькими гармонічними спотвореннями та трирівневою структурою. NPC-конвертер забезпечує двонаправлену передачу енергії та ефективну роботу на високих частотах комутації.



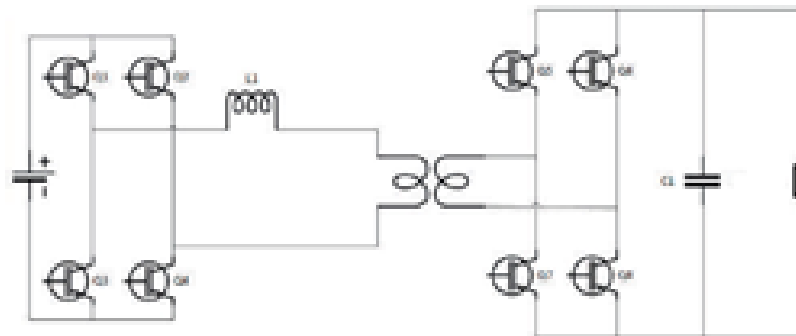
Сучасні DC/DC-перетворювачі зарядних станцій



Resonant converter LLC



Phase-Shifted Full-Bridge, PSFB



Double active bridge

У високопотужних зарядних модулях використовуються ізольовані DC/DC-перетворювачі. Найбільш поширеними є PSFB, LLC та DAB. Дані топології забезпечують узгодження рівнів напруги між DC-шиною та акумуляторною батареєю електромобіля, а також гальванічну ізоляцію силових кіл.

Порівняння сучасних топологій силових перетворювачів AC/DC-топологій

Характеристика	Boost PFC	Interleaved Boost PFC	Totem-Pole PFC	Vienna Rectifier	NPC Converter
Тип мережі	1 фаза	1 фаза	1 фаза	3 фаза	3 фаза
ККД, %	94–96	95–97	98–99	97–99	97–98
Коефіцієнт потужності	>0,95	>0,98	>0,99	>0,99	>0,99
Рівень THD	Середній	Низький	Дуже низький	Дуже низький	Дуже низький
Двонаправлена передача енергії	Ні	Ні	Так	Ні	Так
Кількість силових ключів	Низька	Середня	Середня	Середня	Висока
Складність керування	Низька	Середня	Висока	Середня	Висока
Вимоги до фільтрів	Високі	Середні	Низькі	Низькі	Найнижчі
Щільність потужності	Низька	Середня	Висока	Висока	Висока
Вартість реалізації	Низька	Середня	Висока	Висока	Висока
Підтримка V2G	Ні	Ні	Так	Ні	Так
Типове застосування	Малопотужні ЗП	Зарядні модулі 3–20 кВт	NPC зарядні модулі	Комерційні DC станції	Високотужні NPC станції

Порівняння AC/DC та DC/DC-перетворювачів виконано за критеріями коефіцієнта корисної дії, складності реалізації, щільності потужності та можливості реалізації двонаправленого обміну енергією. Проведений аналіз показав, що найкращі показники серед AC/DC-топологій демонструють Vienna Rectifier та NPC Converter

Порівняння сучасних топологій силових перетворювачів DC/DC-топологій

Характеристика	PSFB (Phase-Shifted Full Bridge)	LLC Resonant Converter	DAB (Dual Active Bridge)
Гальванічна ізоляція	Так	Так	Так
ККД, %	95–98	97–99	95–98
Режим м'якого перемикання	ZVS	ZVS + ZCS	ZVS
Двонаправлена передача енергії	Так*	Ні	Так
Підтримка V2G	Так*	Ні	Так
Робоча частота	20–100 кГц	50–500 кГц	20–200 кГц
Щільність потужності	Висока	Дуже висока	Висока
Складність керування	Середня	Середня	Висока
Діапазон регулювання напруги	Широкий	Обмежений	Дуже широкий
Комутаційні втрати	Низькі	Дуже низькі	Низькі
Вимоги до трансформатора	Середні	Високі	Середні
Робота на малих навантаженнях	Задовільна	Висока ефективність	Середня
Вартість реалізації	Середня	Середня	Висока
Типове застосування	Зарядні модулі 15–30 кВт	Високоєфективні HPC модулі	Двонаправлені HPC та V2G системи

Проведений аналіз показав, що найкращі показники серед DC/DC-перетворювачів – LLC та DAB.

Варіант	AC/DC-topologia	DC/DC-topologia	Загальний ККД, %	Потужність з мережі, кВт	Втрати, кВт
1	Boost PFC	PSFB	91,2	164,47	14,47
2	Vienna Rectifier	LLC	96,04	156,18	6,18
3	NPC Converter	DAB	94,58	158,60	8,60

У роботі виконано оцінку енергетичної ефективності зарядної станції потужністю 150 кВт для різних комбінацій силових перетворювачів. Отримано, що комбінація Vienna Rectifier + LLC забезпечує загальний ККД 96,04 %, тоді як Boost PFC + PSFB має ККД 91,2 %

Висновки:

- Проаналізовано сучасні топології силових перетворювачів зарядних станцій електромобілів.
- Розглянуто принципи роботи Boost PFC, Totem-Pole PFC, Vienna Rectifier, NPC, PSFB, LLC та DAB.
- Виконано порівняння топологій за основними технічними характеристиками.
- Встановлено, що найвищий ККД серед досліджених рішень забезпечує комбінація Vienna Rectifier + LLC.
- Визначено, що найбільш перспективною топологією для реалізації технології Vehicle-to-Grid є NPC Converter + DAB.
- Виконано розрахунок енергетичної ефективності зарядної станції потужністю 150 кВт.
- Розроблено заходи з охорони праці під час дослідження силових перетворювачів зарядних станцій електромобілів.