

Міністерство освіти і науки України

Луцький національний технічний університет
(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет робототехніки та штучного інтелекту
(повне найменування факультету)

Кафедра електроніки, фізики та СМАРТ-систем
(повне найменування кафедри)

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
ЗА СТУПЕНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ «БАКАЛАВР»**

**СИСТЕМА КЕРУВАННЯ СИЛОВИМ ІНВЕРТОРОМ
ДЛЯ ЕЛЕКТРОДВИГУНА ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ**

**POWER INVERTER CONTROL SYSTEM FOR
ELECTRIC VEHICLE ELECTRIC MOTOR**

спеціальність 171 Електроніка
(шифр і назва спеціальності)

освітня програма «Автомобільна електроніка»
(назва освітньої програми)

Виконав: здобувач вищої освіти
групи ЕЛ(АЕ)-41
Курило Максим Юрійович

(підпис)

Керівник: к.т.н., доцент
Лишук Віктор Васильович

(підпис)

Кваліфікаційну роботу
допущено до захисту
«__» _____ 20__ р.
Гарант освітньої програми:
к.т.н., доцент
Приступа Станіслав Олексійович

(підпис)

Луцьк – 2026 року

ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет комп'ютерних та інформаційних технологій

Кафедра електроніки та телекомунікацій

Ступінь вищої освіти: бакалавр

Галузь знань: 17 Електроніка, автоматизація та електронні комунікації

Спеціальність: 171 Електроніка

Освітня програма: «Автомобільна електроніка»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри

«__» _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ

Курилу Максиму Юрійовичу

1. Тема кваліфікаційної роботи: Система керування силовим інвертором для електродвигуна електромобіля

керівник роботи: к.т.н., доцент *Лишук В. В.*

затверджені наказом закладу вищої освіти від «31» грудня 2025 р. № 560/01-02

2. Строк подання здобувачем роботи: 04.06.2026 р.

3. Вихідні дані до роботи: Елементна база силової електричної частини електромобіля.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

Вступ

Розділ 1 Аналіз вихідних даних та обґрунтування теми кваліфікаційної роботи бакалавра

Розділ 2 Теоретична частина

Розділ 3 Практична частина

Розділ 4 Охорона праці

Висновки

5. Перелік графічного матеріалу

Презентація POWERPOINT

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>Розділ 1 Аналіз вихідних даних та обґрунтування теми випускної роботи бакалавра</i>	<i>Лишук В.В., доцент</i>		
<i>Розділ 2. Теоретична частина</i>	<i>Лишук В. В., доцент</i>		
<i>Розділ 3 Практична частина</i>	<i>Лишук В. В., доцент</i>		
<i>Розділ 4 Охорона праці</i>	<i>Заблоцький В. Ю., доцент</i>		
<i>Нормоконтроль</i>	<i>Селепина Й. Р., доцент</i>		
<i>Гарант ОП</i>	<i>Приступа С. О., доцент</i>		
<i>Показник запозичень тексту</i>			
<i>Академічна доброчесність</i>	<i>Лишук В. В., доцент</i>		

7. Дата видачі завдання 03.02.2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	<i>Розділ 1 Аналіз вихідних даних та обґрунтування теми випускної роботи бакалавра</i>	до 01.03.2026 р.	
2.	<i>Розділ 2. Теоретична частина</i>	до 15.03.2026 р.	
3.	<i>Розділ 3 Практична частина</i>	до 01.04.2026 р.	
4.	<i>Розділ 4 Охорона праці</i>	до 10.04.2026 р.	
5.	<i>Висновки</i>	до 20.04.2026 р.	
6.	<i>Формування списку використаних джерел</i>	до 30.04.2026 р.	
7.	<i>Оформлення пояснювальної записки та ілюстративного матеріалу</i>	до 10.05.2026 р.	
8.	<i>Нормоконтроль</i>	до 20.05.2026 р.	
9.	<i>Інструментальна перевірка на академічний плагіат</i>	до 30.05.2026 р.	
10.	<i>Представлення кваліфікаційної роботи до захисту</i>	до 04.06.2026 р.	

Здобувач вищої освіти _____ Курило М. Ю.

Керівник роботи _____ Лишук В. В.

АНОТАЦІЯ

Курило М. Ю. Система керування силовим інвертором для електродвигуна електромобіля.

Кваліфікаційна робота бакалавра ОП «Автомобільна електроніка». Луцький національний технічний університет. Луцьк, 2026.

Випускна кваліфікаційна робота бакалавра складається із вступу, чотирьох розділів, висновків та переліку використаних джерел. У першому розділі здійснено аналіз літературних джерел щодо топології тягових систем, типів інверторів та приводних електродвигунів.

У другому розділі в комплексі розглянуто основні складові силової електричної частини електромобіля. У третьому розділі розраховано елементну базу силової частини, а саме параметри тягової батареї, підвищуючого DC-DC перетворювача, інвертора та синхронного двигуна. У четвертому розділі проаналізовано потенційні небезпеки, які можуть виникати при обслуговуванні та ремонті силової електричної частини електромобіля.

Ключові слова: тягова електрична батарея, DC-DC перетворювач, тяговий інвертор, електродвигун, електронний ключ.

ANNOTATION

Kurylo M. Power inverter control system for an electric motor of an electric vehicle. Bachelor's qualification work EP «Automotive Electronics». Lutsk National Technical University. Lutsk, 2026.

The bachelor's graduation qualification work consists of an introduction, four sections, conclusions, a list of information sources. The first section analyzes literary sources on the topology of traction systems, types of inverters and drive electric motors.

The second section comprehensively considers the main components of the power electrical part of an electric vehicle. The third section calculates the element base of the power part, namely the parameters of the traction battery, step-up DC-DC converter, inverter and synchronous motor. The fourth section analyzes potential hazards that may arise during maintenance and repair of the power electrical part of an electric vehicle.

Keywords: Traction Electric Battery, DC-DC Converter, Traction Inverter, Electric Motor, Electronic Key.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

У цій пояснювальній записці застосовують такі скорочення:

АС – змінний струм;

BEV – акумуляторний електромобіль;

BMS – система управління батареями (СУБ);

DC – постійний струм;

ЕМ – електромобіль;

HEV – гібридний електромобіль;

IGBT – біполярний транзистор з ізолюваним затвором;

MOSFET – металооксидний напівпровідниковий польовий транзистор;

SMPM – синхронний електродвигун з постійними магнітами;

АД – асинхронний двигун;

ЕТЗ – електричний транспортний засіб;

ЗППН – зворотньоходовий перетворювач постійної напруги;

СТЕО – система тягового електричного обладнання;

СТО – станція технічного обслуговування;

ТАБ – тягова акумуляторна батарея;

ТЕД – тяговий електродвигун;

ТІ – тяговий інвертор;

ШІМ – широтно-імпульсна модуляція

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ВИХІДНИХ ДАНИХ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ТЕМИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ БАКАЛАВРА.....	10
1.1 Топології тягових систем	10
1.2 Топології тягових інверторів.....	12
1.3 Уніфіковані електронні системи для тяги і зарядки акумуляторів...	15
1.4 Синхронні двигуни з постійними магнітами.....	22
РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА.....	24
2.1 Тягова електрична батарея.....	24
2.2 Приклади побудови потужних підвищуючих DC-DC перетворювачів в електромобілі	28
2.3 Контролер керування перетворювачем.....	34
2.4 Принцип широтно-імпульсної модуляції в тяговому інверторі.....	36
2.5 Електрична схема тягової системи електромобіля	40
РОЗДІЛ 3 ПРАКТИЧНА ЧАСТИНА.....	43
3.1 Розрахунок тягової батареї.....	43
3.2 Визначення вхідних і вихідних параметрів ЗППН ЕТЗ.....	45
3.3 Розрахунок елементної бази перетворювача.....	47
3.4 Розрахунок тягового інвертора	54
3.5 Розрахунок та вибір електродвигуна.....	59
РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ.....	62
4.1 Виявлення потенційних небезпек при обслуговуванні силової частини електромобіля	62
4.2 Заходи і норми забезпечення техніки безпеки	64
ВИСНОВКИ	66
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	67

ВСТУП

На сьогодні електромобіль перспективний вид транспорту і на даний момент є майже єдиним рішенням проблеми забруднення атмосфери. Тому в теперішній час багато автовиробників тратять багато сил на вирішення конструктивних проблем електромобіля. Електромобіль – це безрельсовий транспортний засіб з автономним хімічним джерелом струму, що використовується як джерело енергії для руху.

Робота електромобіля заснована на перетворенні електричної енергії на механічну. Коли водій натискає на педаль акселератора, електрична енергія акумуляторів передається через підвищуючий перетворювач на тяговий інвертор після чого на обмотки двигуна, який починає обертати колеса. Цей процес забезпечує плавне та швидке прискорення, що є однією з переваг електромобілів у порівнянні з традиційними автомобілями з двигуном внутрішнього згорання.

Основні переваги електромобілів перед простими автомобілями:

- експлуатаційні витрати в електромобілі нижчі, ніж у автомобіля з ДВЗ. Наприклад, невеликий автомобіль з ДВЗ об'ємом 1,2 літра і ручною коробкою перемикання передач на паливі вартістю орієнтовно 1,5 долари проїжджає близько 20 км. Електромобіль за тарифом на електроенергію орієнтовно 10 центів за 1 кВт·год проїжджає за 1 долар орієнтовно 100 км. Цей оптимістичний розрахунок наведено в українських ЗМІ;

- двигун внутрішнього згорання працює при високих температурах, вібраціях, хімічно активних середовищах та потребує рідинного охолодження, має багато рухомих елементів, що мають властивість до зношування.

Як наслідок, силовий агрегат електромобіля служить набагато довше, ніж двигун внутрішнього згорання. Сам електромобіль також значно довговічніший, ніж автомобіль із ДВЗ. Акумуляторна батарея є єдиним

проблемним елементом електромобіля, оскільки потребує інтенсивного обслуговування та заміни через 5...10 років.

Метою роботи є дослідження та аналіз функціонування тягових інверторів для регульованих електроприводів.

Досягнення поставленої мети здійснюється вирішенням наступних основних наступних завдань:

- провести огляд інформаційних джерел в області функціонування тягових систем та інверторів;
- дослідити електричні процеси в інверторах регульованої електричної енергії;
- здійснити опис структурних, функціональних та принципових електричних схем;
- запропонувати алгоритми функціонування електронними ключами інверторів;
- розрахувати параметри елементної бази системи «ТАБ-DC-DC-підвищуючий конвертер-тяговий інвертор-синхронний двигун з постійними магнітами».

Об'єкт дослідження: силові інвертори електромобілів.

Предмет дослідження: комутаційні ключові процеси в інверторах.

Під час виконання кваліфікаційної роботи бакалавра було використано інструменти штучного інтелекту для редагування та форматування тексту, виключно як допоміжний засіб для пошуку ідей, уточнення формулювань та опрацювання літератури. Усі твердження, висновки та результати дослідження належать автору та ґрунтуються на власному аналізі, а отримані результати від генеративного ШІ були перевірені на достовірність та відповідність академічній доброчесності.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ВИХІДНИХ ДАНИХ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ТЕМИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ БАКАЛАВРА

1.1 Топології тягових систем

Тягові системи для електромобілів є одним із прикладів застосування технологій силової електроніки. Тягові системи можуть працювати з двигунами постійного або змінного струму. Хоча двигуни постійного струму мають переваги, але вони також мають і недоліки, такі як наявність ковзаючого контакту (щітки-колектор), що вимагає періодичного та специфічного обслуговування та як наслідок сприяє зростанню вартості тягових рішень на основі двигунів постійного струму.

Розглядаючи можливі заміни двигунів постійного струму, існують двигуни постійного струму, які в літературі називаються BLDC-двигунами. Окрім відсутності щіток така технологія має характеристики з високими пусковими моментами, вищий ККД та відсутність механічних колекторів. Крім того, двигуни BLDC особливо підходять для випадків, що вимагають вищої густини потужності, зокрема і для електромобілів [8, 10].

Інша технологія електродвигунів, подібна до двигунів BLDC – це синхронні машини з постійними магнітами (PMSM). Ці типи двигунів є безщітковими двигунами змінного струму або двигуни змінного струму з постійними магнітами, оскільки вони використовують постійно намагнічені магніти з метою створення необхідного магнітного потоку. Завдяки цій стратегії зовнішнє джерело постійного струму, контактні кільця та щітки більше не потрібні. Завдяки цьому рішенню можна підвищити надійність та густину потужності електродвигунів електромобілів.

З іншого боку, незважаючи на зазначені переваги PMSM, витрати на придбання, спричинені використанням рідкісних металів на створення магнітів можна вважати деяким недоліком. Тим не менш, електромобілі Toyota Prius, BMW i3 та Nissan Leaf використовують двигуни типу PMSM [4].

Розглядувані вище класичні двигуни постійного струму, двигуни типу BLDC та PMSM є ефективними рішеннями для впровадження в електромобілях, але є й інші можливості – застосування трифазних асинхронних двигунів, що є також високоефективними та менш вартісними [4].

« Реактивні двигуни поєднують в собі ефективність синхронних двигунів (відсутність ковзання) та відсутність постійних магнітів в асинхронних двигунах. Що стосується реактивних двигунів, то їх можна інтерпретувати як крокові двигуни, синхронні реактивні двигуни та двигуни з перемиканням реактивних двигунів. Гібридні реактивні машини з постійними магнітами також є ефективними, поєднуючи продуктивність реактивного двигуна та PMSM, що дозволяє отримати додаткову функцію з точки зору точності керування. Важливо підкреслити, що це сучасна і перспективна технологія з широким та універсальним застосуванням в електромобілях » [15].

Сьогодні, завдяки постійному інноваційному прогресу в галузі силової електроніки, включаючи потужніші імпульсні системи, двигуни змінного струму є більш ефективними.

В питаннях вибору електродвигуна для тягової системи електромобіля критерії повинні бути якомога більш інформаційними, включаючи аспекти механічних та електромагнітних характеристик, а не лише зосереджені на принципах якості та ціни. Незалежно від технології електромобіля, керування може здійснюватися з точки зору швидкості або крутного моменту, де опорне значення встановлюється для контролера на основі потреб водія в кожен момент циклу руху.

Що стосується крутного моменту, то керування передбачає переважно традиційний метод, де педаль акселератора використовується для визначення опорного значення для електродвигуна. Як у випадках керування швидкістю, так і крутним моментом, електродвигун потребує керування, тому вкрай важливо отримувати дані та керувати змінними напруги, частоти та електричного струму.

За допомогою таких змінних керування здійснюється на імпульсній платформі за допомогою силового тягового інвертора [8].

Таким чином в тяговому електроприводі електромобіля незамінним є використання систем силової електроніки, які можуть складатися з одного перетворювача напруги (наприклад, постійного струму в змінний). Значення напруги та частоти, що подаються на електродвигун, контролюються в кожен момент часу, забезпечуючи правильну роботу електродвигуна.

1.2 Топології тягових інверторів

Класифікація тягових інверторів така ж, як і в інших застосуваннях промисловості, де використовуються пасивні елементи ланки постійного струму, якими може бути конденсатор (тобто перетворювач потужності джерела напруги, що зберігає енергію у формі електричного поля) або котушка індуктивності (тобто перетворювач потужності джерела струму, що зберігає енергію у формі магнітного поля). Вибір перетворювача потужності не є повністю незалежним від технології електродвигуна (наприклад, простий трифазний перетворювач потужності (тяговий інвертор) постійного струму в змінний струм, який використовується для керування асинхронним двигуном, відрізняється від інвертора, який використовується для керування реактивним двигуном з перемиканням [3, 5].

Оскільки поширене призначення силової електроніки вимагає використання джерела напруги, тягові інвертори на основі структури джерела напруги є найбільш використовуваними. Крім того, такі перетворювачі, як правило, є більш ефективними.

В контексті інверторів для керування електродвигуном постійного струму найпоширеніша топологія представлена на рисунку 1.1, оскільки вона дозволяє роботу в чотирьох квадрантах напруги та струму, тобто, крім роботи в режимі електродвигуна, електрична машина також може працювати як електричний генератор. Ця можливість надзвичайно важлива для

електромобіля, оскільки вона дозволяє гальмування рекуперативною енергією. Цей перетворювач є трифазним напівмостовим перетворювачем складається з чотирьох транзисторів (ключів) і це топологія джерела напруги, тому він має ємнісний фільтр у ланці постійного струму [5, 6].

Перетворювач може керуватися напругою або струмом в обмотці статора, що дозволяє керувати швидкістю та крутним моментом електродвигуна залежно від застосованого керування та вимог драйвера. З іншого боку, коли метою є керування електродвигуном змінного струму, найпоширеніша топологія перетворювача силової електроніки представлена на рисунку 1.2.

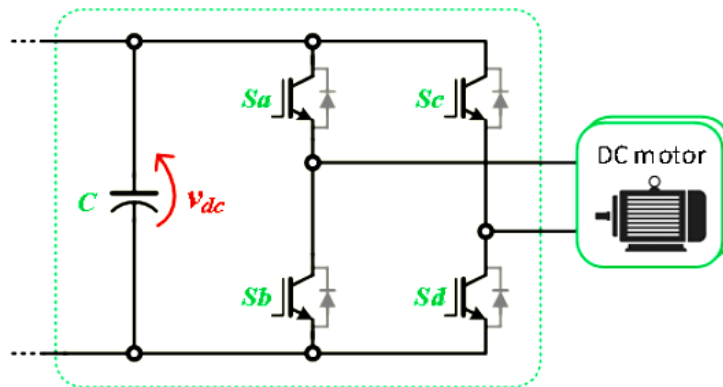


Рисунок 1.1 – Топологія перетворювача для двигуна постійного струму [3]

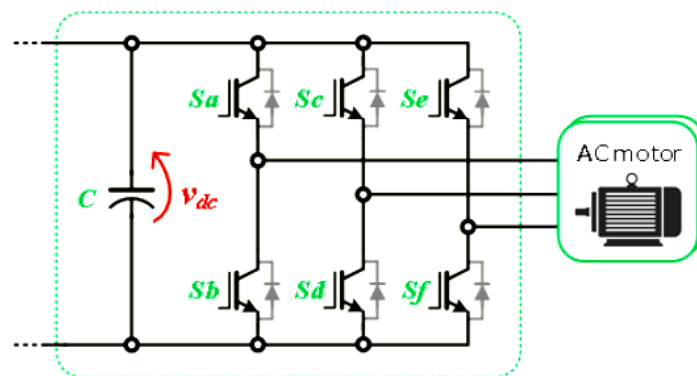


Рисунок 1.2 – Топологія перетворювача для двигуна змінного струму [3]

На рисунку 1.2 інвертор складається з шести керованих транзисторів і також базується на структурі джерела напруги, тому в ланці постійного

струму представлений ємнісний фільтр. Ця топологія в літературі називається трифазним повним мостовим перетворювачем. З точки зору керування, ця топологія також може керуватися напругою та струмом, що також дозволяє роботу в режимі рекуперативного гальмування. Оскільки він перетворює постійний струм на змінний (під час роботи в режимі електродвигуна), він також дозволяє керувати частотою струму асинхронного двигуна, що є фундаментальним для забезпечення очікуваної керованості електромобіля. Такий інвертор є найбільш використовуваною топологією в приводах трифазних електродвигунів змінного струму.

Коли метою є керування двигуном з перемиканням реактивності, максимально підходить інвертор показаний на рисунку 1.3, який також забезпечує роботу в чотириквadrантному режимі напруги та струму.

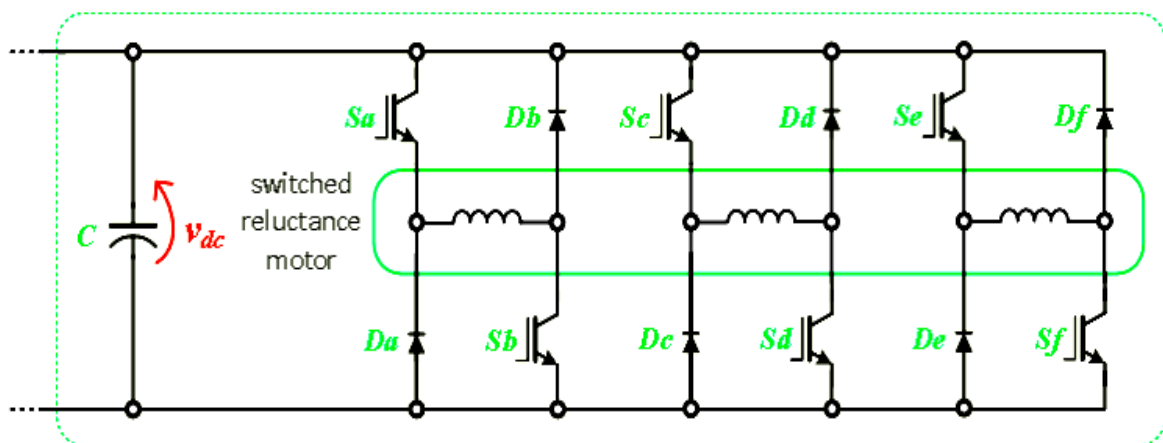


Рисунок 1.3 – Топологія з перемиканням реактивності [3]

Основна перевага цього перетворювача пов'язана з незалежністю керованості, яку можна виконати в кожній окремій фазі. Натомість, така топологія має недолік – загальну кількість використовуваних силових напівпровідникових елементів, оскільки для кожної фази необхідно по два керовані IGBT- або MOSFET-транзистори та два діоди [3, 6].

З метою зменшення загальної кількості напівпровідників можна реалізувати подібний перетворювач, як показано на рисунку 1.4.

Ця топологія називається перетворювачем з розділеним конденсатором, оскільки, порівняно з попередньою, вона має розділений конденсатор постійного струму.

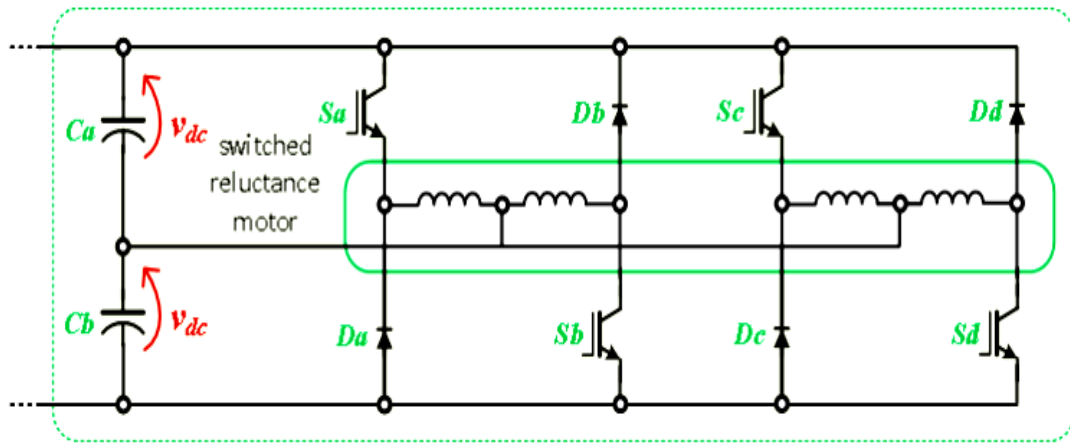


Рисунок 1.4 – Топологія інвертора на основі структури джерела напруги з ланкою постійного струму з розділеним конденсатором та перемиканням реактивності [3]

Фактично, кількість напівпровідникових ключів зменшується вдвічі, але це означає, що напруга, що подається на кожну обмотку статора, відповідає лише половині напруги в ланці постійного струму. Це може бути обмеженням при проектуванні силового електронного перетворювача для конкретного реактивного двигуна з перемиканням. Більше того, цей тяговий інвертор придатний лише тоді, коли застосовується для керування реактивними двигунами з перемиканням з парною кількістю фаз.

1.3 Уніфіковані електронні системи для тяги і зарядки акумуляторів

Електромобіль включає дві основні системи, пов'язані між собою, а саме: систему тяги з електродвигуном і трансмісією та систему накопичення енергії і систему зарядки акумуляторів. Системи пов'язані між собою через спільну ланку постійного струму, де акумулятори з'єднані через

перетворювач постійного струму (ППС), а двигун з'єднаний через ППС в змінний струм (у випадку електродвигуна змінного струму).

При вивченні внутрішньої структури та принципу роботи обох енергосистем, а саме драйвера двигуна та системи зарядки акумулятора, можна виявити значну кількість взаємозв'язків, щодо перетворювачів силової електроніки [4].

Більше того, легко визначити, що обидві системи живлення працюють незалежно, тобто з точки зору електромобіля або використовується драйвер двигуна (під час руху транспортного засобу і заряджання не відбувається), або використовується система заряджання акумулятора (під час заряджання і драйвер двигуна не використовується).

Таким чином, розумно уявити собі єдиний перетворювач силової електроніки, але з двома різними функціями (або драйвер двигуна або драйвер системи заряджання акумулятора). Це справедливо, оскільки обидві системи є внутрішньою частиною електромобіля, тобто не потрібні зовнішні перетворювачі силової електроніки [3, 7].

Тому, комбінуючи алгоритми керування в уніфікованому перетворювачі, можна зменшити об'єм і вагу, а також вартість рішення для приводу двигуна та системи заряджання акумулятора. Елементарна топологія, структурована у два силові перетворювачі, з'єднані спільною ланкою постійного струму та з трифазними інтерфейсами змінного та постійного струму, дозволяє отримати схему, що показана на рисунку 1.5.

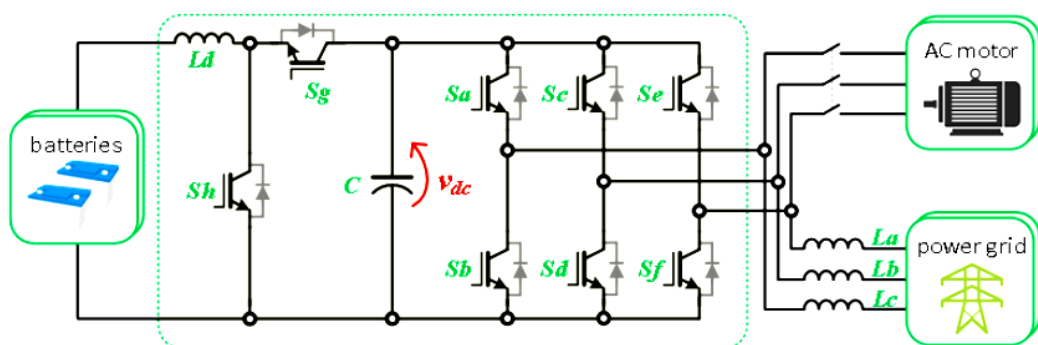


Рисунок 1.5 – Топологія керування двигуном та заряджання акумулятора [3]

Аналізуючи цю топологію з точки зору структури, можна зробити висновок, що головною характеристикою цього можливого рішення є можливість його використання для підключення будь-якого трифазного електродвигуна змінного струму. Ця функція можлива, коли під час процесу заряджання акумулятора електродвигун повністю від'єднаний від силового перетворювача. Під час процесу заряджання акумулятора, коли уніфікований перетворювач використовується для підключення електромережі (змінного струму) до акумулятора (постійного струму), вкрай важливо уникнути збільшення проблем з якістю електроенергії для електромережі (наприклад, з точки зору коефіцієнта потужності та гармонік струму).

Тому при комутації електромобіля з мережею змінного струму необхідно використовувати послідовні індуктивні фільтри зв'язку, оскільки це структура джерела напруги. Такий тип фільтрів зв'язку містить три котушки індуктивності і є недоліком з точки зору додаткової ваги та громіздкості. Це особливо актуально, оскільки такі фільтри зв'язку повинні бути готові до роботи з високими номінальними струмами.

«Топологія, подібна до попередньої, але з основною відмінністю у використанні лише двох індуктивних фільтрів зв'язку замість трьох, також для того ж номінального струму. Враховуючи необхідність трифазного інтерфейсу з енергосистемою, необхідний третій фільтр зв'язку, тому тут це досягається шляхом послідовного з'єднання обмоток електродвигуна. У такому випадку під час заряджання акумулятора електродвигун не повністю від'єднується від системи » [3, 5].

Як і попереднє рішення, це рішення також дозволяє швидко заряджати акумулятор при підключенні до трифазної енергосистеми. Трифазний перетворювач, який використовує обмотки електродвигуна для роботи послідовні індуктивні фільтри в інтерфейсі з енергосистемою, представлено на рисунку 1.6. Слід зазначити, що з метою розгляду застосування цього уніфікованого рішення необхідно передбачити особливу конструкцію електродвигуна змінного струму, оскільки необхідний доступ до всіх

обмоток статора. Крім того, це уніфіковане рішення має недолік, що стосується процесу заряджання акумулятора, тобто якщо розглядати застосування асинхронної машини, тобто зв'язку обмоток статора з енергосистемою. Тут як наслідок, утворюється обертове магнітне поле, що призведе до крутного моменту, який є не потрібним у цьому випадку.

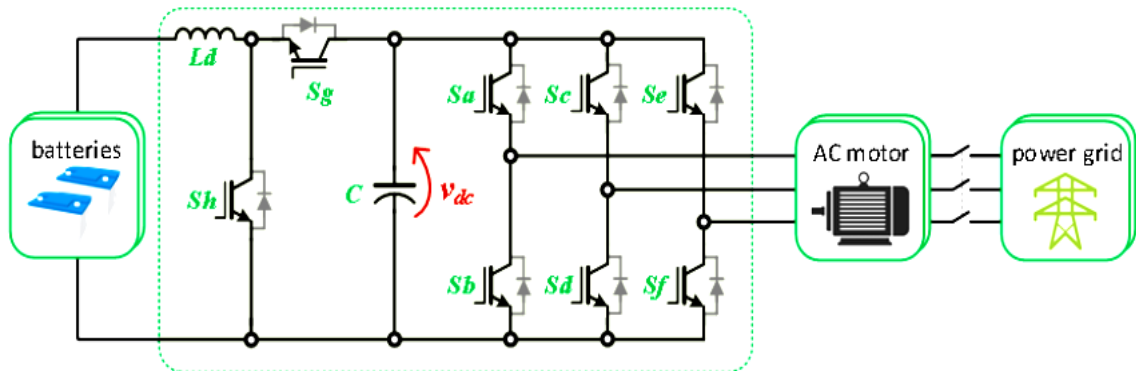


Рисунок 1.6 – Топологія заряду АКБ через інвертор від енергосистеми [3]

Уніфіковане рішення, яке можна застосувати з будь-яким типом трифазного електродвигуна змінного струму, запропоновано в [6]. Воно дозволяє працювати в кількох режимах, включаючи регулювання напруги від акумулятора до ланки постійного струму (тобто це не пряме з'єднання між акумулятором та драйвером), роботу з рекуперативним гальмуванням, поверненням енергії до акумулятора, заряджання або розряджання акумулятора від електромережі та у випадку збоїв в електромережі.

З недоліків відзначається неможливість швидкого заряджання акумулятора. Топологія, яка вимагає використання середніх точок обмоток на інтерфейсі з електромережею є ключовою перевагою з можливістю швидкого процесу заряджання акумулятора. Тим не менш, через топологію електродвигуна, під час процесу заряджання акумулятора може бути необхідним використовувати додаткову гальмівну систему, оскільки ротор може обертатися. Крім того, необхідність доступу до середніх точок обмоток є недоліком, оскільки це додає складності з точки зору електродвигуна [7].

Ще одна топологія, заснована на з'єднанні енергосистеми в середніх точках обмоток статора з розщепленими фазами, показана на рисунку 1.7. Також тут обмотки використовуються як послідовні індуктивні фільтри зв'язку з енергосистемою для операції заряджання акумулятора. Таке рішення структуровано у двох трифазних перетворювачах потужності, які з'єднані з обмоткою електродвигуна, що дозволяє під час роботи в якості драйвера двигуна застосовувати вищі рівні напруги.

Фундаментальним позитивним аспектом цього рішення є відсутність необхідності використання будь-якого контактора під час комутації з електросистемою, але, як і в попередніх випадках, потрібен контакт із середніми точками обмоток статора з розщепленими фазами.

Важливо підкреслити, що інші типи електродвигунів також можуть бути тут використані, а саме електродвигуни змінного струму на основі двостаторної структури.

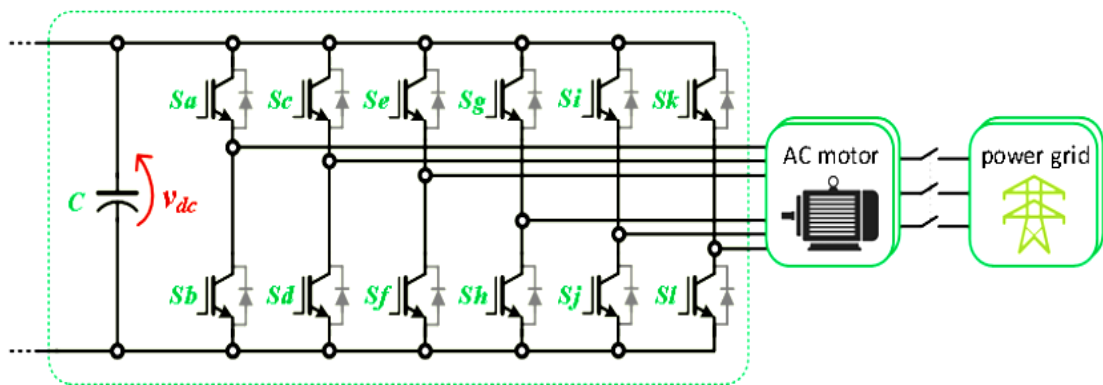


Рисунок 1.7 – Топологія заряду АКБ через інвертор та двигун двостаторної структури [3]

Інша топологія, яка вимагає використання нейтральної точки електродвигуна змінного струму в інтерфейсі з енергомережею, де впроваджена додаткова гальмівна система для електродвигуна під час зарядку акумулятора, оскільки встановлюється односпрямований потік потужності, що не створює крутного моменту [3, 6].

Двонаправлене однофазне схемотехнічне рішення, показане на рисунку 1.8 пропонує можливість роботи в чотирьох різних режимах, а саме: керування двигуном (тобто енергією від акумулятора до електродвигуна); рекуперативне гальмування (тобто енергією від електродвигуна до акумулятора); процес заряджання акумулятора (тобто підключення до однофазної енергомережі); подача енергії до електромережі (тобто енергією від акумулятора до енергомережі).

Тут передбачена робота з рекуперативним гальмуванням та виключається вимога інвертування струму в ланці постійного струму. Контактор розглядається як інтерфейс перетворювача силової електроніки з електродвигуном (тобто для виконання функції драйвера двигуна) або з акумулятором (тобто для виконання заряджання).

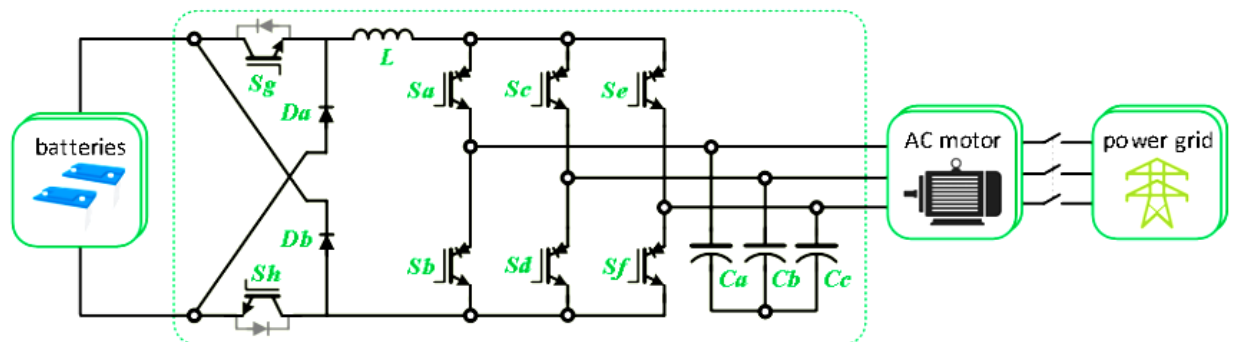


Рисунок 1.8 – Схемотехнічна реалізація заряду АКБ з двонаправленим інвертором і ланкою постійного струму [3]

З метою інтерфейсу індуктора в ланці постійного струму з акумулятором розглядається додатковий перетворювач постійного струму, що дозволяє регулювати струм ланки постійного струму.

Аналізуючи різні технології електричних машин, встановлено, що синхронні машини з постійними магнітами, а також трифазні асинхронні машини є найпоширенішими, що використовуються в електромобілях. Тим не менш, з'являються інші альтернативні технології, такі як реактивні машини, а також гібридні машини з постійними магнітами [7].

Однак зазвичай вибір конкретного електродвигуна накладає необхідність використання спеціального приводу двигуна та контролера, хоча деякі топології, що використовуються в драйверах двигунів, можуть використовуватися з більш ніж однією технологією електродвигуна. Внутрішньо драйвер двигуна складається з силового електронного перетворювача (інвертора) або набору силових електронних перетворювачів, з'єднаних послідовно або паралельно, і за допомогою певного алгоритму керування він може впливати на напругу та частоту, що подаються на електродвигун. Окрім приводу двигуна, для виконання процесу заряджання також необхідна система заряджання акумулятора.

Розглядаючи запропоновані рішення в порівнянні з традиційними підходами (тобто заснованими на незалежних системах тяги та заряджання акумулятора), можна зменшити об'єм, вагу та витрати. Крім того, також можна забезпечити покращені режими роботи для інтеграції електромобілів у контекст розумних мереж. Щодо рівня потужності інверторів, кількість віток перетворювача силової електроніки залежить від кількості обмоток електродвигуна, враховуючи розподілені обмотки, тому для конкретних електродвигунів необхідно впроваджувати спеціальні перетворювачі.

На рисунку 1.9 показано розташування силових електричних та електронних модулів в електромобілі.

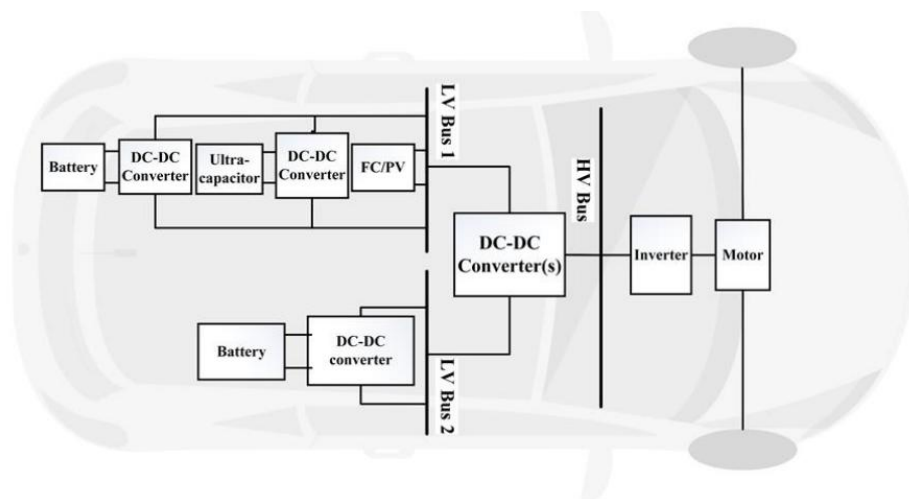


Рисунок 1.9 – Варіант розташування силових модулів у електромобілі [5]

Тут показано максимальну комплектацію силових модулів, а саме класичну батарею свинцевого типу з її зарядкою від DC-DC конвертера, літій-іонну батарею, ультраконденсатор, понижувальний DC-DC конвертер для живлення електрообладнання автомобіля, підвищуючий потужний DC-DC конвертер, вихід якого поступає на інвертор, а з інвертора на двигун.

1.4 Синхронні двигуни з постійними магнітами

Синхронні двигуни з постійними магнітами використовуються в найбільш популярних електромобілях, доступних на ринку, як основний тяговий двигун завдяки високому ККД, високій густині моменту (потужності) та коефіцієнту потужності, меншим габаритам, невеликій вазі, меншому номінальному струму, низькому рівню вібраційного шуму та інерційності. Однак СДПМ за своєю природою мають обмежений діапазон частот обертання із збереженням постійної потужності через досить обмежену здатність до роботи в режимі ослаблення поля [2, 19].

Існує два типи СДПМ: машина з постійними магнітами, розташованими на поверхні ротора (явновиражені полюси) та машина з постійними магнітами, встановленими безпосередньо всередині ротора (неявновиражені полюси). Синхронні двигуни із вбудованими постійними магнітами (СДПМ) мають (явнополюсний) ротор та міцну механічну структуру за рахунок заглиблених (вбудованих) у ротор постійних магнітів. СДПМ може розвивати високі крутні моменти на одиницю об'єму за рахунок магнітної складової моменту постійних магнітів та струму якоря.

« Високі характеристики СДПМ, включаючи високий ККД, малий об'єм, мала вага, висока здатність до роботи в режимі ослаблення магнітного поля, додатковий реактивний момент, є найбільш важливою причиною того, що СДПМ – ідеальний варіант для приводу електромобіля » [2].

Принцип дії СДПМ відрізняється від стандартних синхронних та асинхронних електричних машин. Обертання ротора здійснюється при

зчепленні магнітного поля роторів з обертовим магнітним полем, що наводиться струмами обмоток нерухомої частини двигуна. Відмінність – у полі обертаючого вузла. Поле створюється не обмотками, на які подається постійний струм, а постійними магнітами. При цьому ковзання ротора відсутнє, його швидкість дорівнює частоті обертів магнітного поля статора.

На рисунку 1.10 показано конструкцію СДПМ.

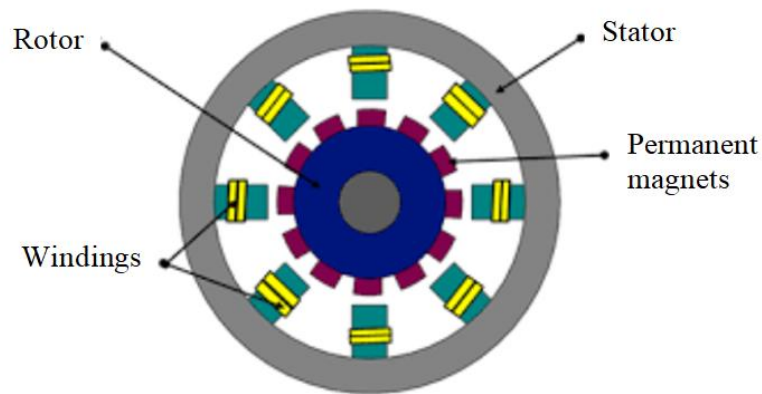


Рисунок 1.10 – Будова СДПМ [2]

Запуск СДПМ не може здійснюватись прямим підключенням до електромережі, для керування електроприводом необхідний частотний перетворювач або сервосистема. Розглянемо базові методи керування приводами з урахуванням синхронних двигунів з постійними магнітами.

Розрізняють 2 базові принципи керування електродвигунами такого типу: трапецеїдальне (комутацією обмоток) і синусоїдне (полеорієнтоване, пряме керування моментом). Комутація обмоток СДПМ – найпростіший метод. За рахунок простоти схеми такий спосіб активно застосовують у приводах, де не потрібно особливо точне керування.

Регулювання моменту і частоти із зворотним зв'язком реалізовується за допомогою датчиків положення валу або шляхом обчислення кута повороту валу за наявними функціями. Такі схеми дозволяють організувати досить точне керування, однак, мають деякі недоліки, що полягають в введенням у схему датчиків Холла або застосування контролерів більшої швидкодії.

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА

2.1 Тягова електрична батарея

Ключовим компонентом тягового електроприводу електромобіля є тягове джерело енергії – акумуляторна батарея, вартість якої складає близько 40% вартості електромобіля [12, 18]. Для сучасних моделей ЕМ практично безальтернативним варіантом сьогодні є використання батарейки на основі літій-іонних акумуляторів (LIA).

Застосування літій-іонної технології в області хімічних джерел струму для електромобілів має свої особливості і суттєво відображається на кінцевій вартості експлуатації вказаного виду ТЗ. Характеристики тягового джерела енергії на основі LIA залежать від особливостей електрохімічних процесів, що протікають в акумуляторі, конструкції батареї, а також від режимів експлуатації, що мають безпосередньо вплив на ресурс.

При циклічних процесах заряду / розряду LIA відбуваються механічні зміни структури активного матеріалу, в тому числі розшарування графіту, зменшення активної поверхні електродів і, безпосередньо пов'язане з цим процесом, зниження номінальної ємності. Бажання виробників електромобілів максимально використовувати ефективну доступну енергію, накопичену в акумуляторній батареї без втрати її ресурсу, накладає особливі вимоги до тягового електрообладнання.

« Найбільш значущим споживачем електричної енергії в електромобілі є електричний привод, при цьому джерелом механічної енергії, необхідної для руху ТЗ, є виключно тяговий електродвигун (ТЕД), а функцію перетворення електроенергії для електроживлення та управління ТЕД виконує тяговий інвертор (ТІ). Відповідність характеристики тягової акумуляторної батареї (ТАБ) і тягового електричного приводу, а також вибір оптимального алгоритму роботи тягового інвертора – запорука надійної роботи ТАБ » [19].

У сучасній промисловості тягові акумулятори займають чільне місце, забезпечуючи надійне та ефективне енергопостачання для різних транспортних та промислових систем. Ці пристрої є ключовим елементом електричних систем, що використовуються у вантажних автомобілях, вилкових навантажувачах, електричних транспортних засобах та інших областях.

« Тяговий акумулятор є електрохімічним пристроєм, розробленим для постачання енергії в електричні транспортні засоби та інші машини. На відміну від звичайних кислотних акумуляторів, тягові акумулятори спроектовані для забезпечення високої енергетичної потужності, витримуючи інтенсивні цикли заряду-розряду. Вони відіграють ключову роль у підтримці електричної мобільності, забезпечуючи стійке та ефективне енергопостачання всіх вузлів. Від їхньої надійності та продуктивності залежить ефективна робота електричних транспортних засобів та обладнання, роблячи тягові акумулятори невід'ємною частиною сучасних технологічних рішень [6].

Принцип дії тягового акумулятора ґрунтується на електрохімічних процесах, що відбуваються всередині його комірок. Такі акумулятори, як свинцево-кислотні або літій-іонні, функціонують шляхом перенесення зарядів між анодом та катодом через електроліт.

У процесі розряду, коли акумулятор надає енергію, електрохімічні реакції призводять до переміщення електронів через зовнішнє коло, створюючи електричний потенціал. При заряді відбувається зворотний процес, що відновлює енергію, яка зберігається. Ця безперервна взаємодія хімічних елементів усередині тягового акумулятора забезпечує надійне живлення, ефективно підтримуючи роботу електричних транспортних засобів.

Основні компоненти тягового акумулятора включають анод, катод і електроліт. Анод є позитивним електродом, на якому відбувається окислювальна реакція під час розряду акумулятора. Катод, що є негативним

електродом, на той момент піддається відновлювальній реакції. Електроліт, що знаходиться між анодом і катодом, служить провідником іонів і забезпечує хімічні реакції, необхідні для передачі заряду.

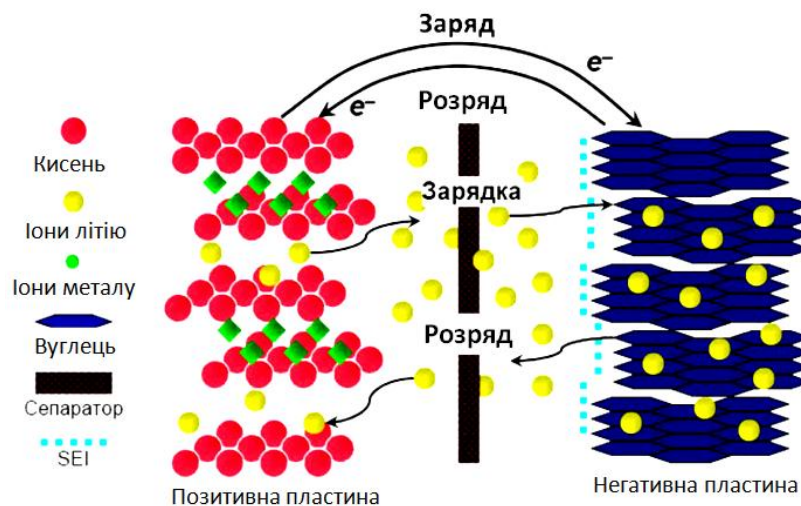


Рисунок 2.1 – Електрохімічне пояснення процесів заряду-розряду [4]

Різні типи тягових акумуляторів можуть використовувати різні матеріали для цих компонентів, що впливає на їх характеристики, продуктивність та сферу застосування. Колективно ці елементи створюють систему, здатну ефективно зберігати та віддавати енергію у межах промислових та транспортних засобах. Тягові акумулятори широко застосовують у різних секторах промисловості, надаючи ефективні рішення для електричних енергосистем. Ось кілька ключових областей їх використання:

Переваги тягових акумуляторів:

- екологічна стійкість: тягові акумулятори, особливо літій-іонні, вважаються більш екологічними порівняно з традиційними джерелами енергії, такими як газ або дизель. Вони не виробляють шкідливих викидів в атмосферу;

- енергоефективність: тягові акумулятори мають високий рівень енергоефективності, що дозволяє ефективно використовувати електричну енергію та забезпечувати тривалий час роботи електромобіля;

- низькі експлуатаційні витрати: у порівнянні з традиційними паливними системами, тягові акумулятори можуть мати нижчі витрати, оскільки вони не потребують постійної купівлі палива;

- гібридні рішення: тягові акумулятори інтегруються в гібридні енергосистеми, що дозволяє використовувати кілька джерел енергії (наприклад, сонячні панелі або генератори) для підвищення загальної ефективності роботи.

Недоліки тягових акумуляторів:

- обмежений термін служби: тягові акумулятори мають обмежений цикл заряду-розряду, після якого їх ємність знижується, що може вимагати періодичної заміни;

- вага та об'єм: деякі типи тягових акумуляторів, особливо літій-іонні, можуть бути відносно важкими і займати багато місця, що може бути проблематичним у деяких застосуваннях;

- залежність від температури: ефективність тягових акумуляторів може знижуватися при низьких або високих температурах, що обмежує їх застосування в екстремальних умовах;

- проблеми з утилізацією: утилізація старих тягових акумуляторів викликає виклик через вміст шкідливих хімічних речовин, вимагаючи відповідних процедур і стандартів.

Отже, тягові акумулятори займають важливе місце у сучасній промисловості, граючи ключову роль електрифікації транспорту та оптимізації його роботи. Їхні переваги, такі як екологічна стійкість, висока енергоефективність та технологічні можливості, відкривають нові горизонти для інноваційних технологій та сталого розвитку.

Незважаючи на деякі обмеження, такі як обмежений термін служби та високі початкові витрати, тягові акумулятори продовжують еволюціонувати, підтверджуючи свою значущість у переході до енергетичної ефективності та екологічності [1, 15].

2.2 Приклади побудови потужних підвищуючих DC-DC перетворювачів в електромобілі

На сьогодні тенденція застосування високих напруг, що подаються на обмотки двигуна все ширше й ширше розвивається. Як відомо, робота електродвигунів на високих напругах потребує менших струмів при тих же електричних потужностях. Тому підвищення напруги акумуляторних батарей потребує встановлення підвищуючих DC-DC конверторів.

« При розробці високовольтних ТАБ збільшення напруги досягається за рахунок збільшення кількості послідовно підключених одиничних акумуляторів в пакеті акумуляторної батареї. Це відповідно ускладнює систему контролю стану АКБ і знижує її надійність. З одного боку, збільшення робочої напруги ТЕД за рахунок збільшення кількості батарей в АКБ створює сприятливі умови для отримання покращених тягових характеристик, так як знижуються струмові навантаження і збільшується крутний момент двигуна, з іншого боку, збільшується складність системи контролю за батареями і підвищуються масогабаритні показники АКБ » [3].

За результатами теоретичних досліджень було виявлено, що напруга АКБ, що виробляється на даний момент електромобілів, в середньому знаходиться в діапазоні 250...400 В. Такий діапазон напруги АКБ, що випускається на сьогоднішній день є оптимальним з точки зору співвідношення масогабаритних показників і вартості, для живлення високовольтної системи електромобіля без істотного ускладнення силового електрообладнання пропонується використовувати зворотний перетворювач постійної напруги. Функцією даного ЗППН є перетворення низької напруги постійного струму АКБ у високу напругу (до 800 В) постійного струму. Це дає можливість використовувати двигуни з високою напругою і більш широким діапазоном тягових і швидкісних характеристик [4, 9].

Збільшення робочої напруги, як зазначалось вище, призведе до зниження струмових навантажень і до покращення масогабаритних показників,

так як перерізи проводів обмотки електродвигунів залежить від струмів у обмотках [13].

Крім того, стабільна вихідна напруга перетворювача постійної напруги забезпечує незалежність тягових характеристик електродвигуна і відповідно електромобіля від зниження напруги акумуляторної батареї.

Структура системи керування електричним транспортним засобом з використанням ЗППН показана на рисунку 2.2.

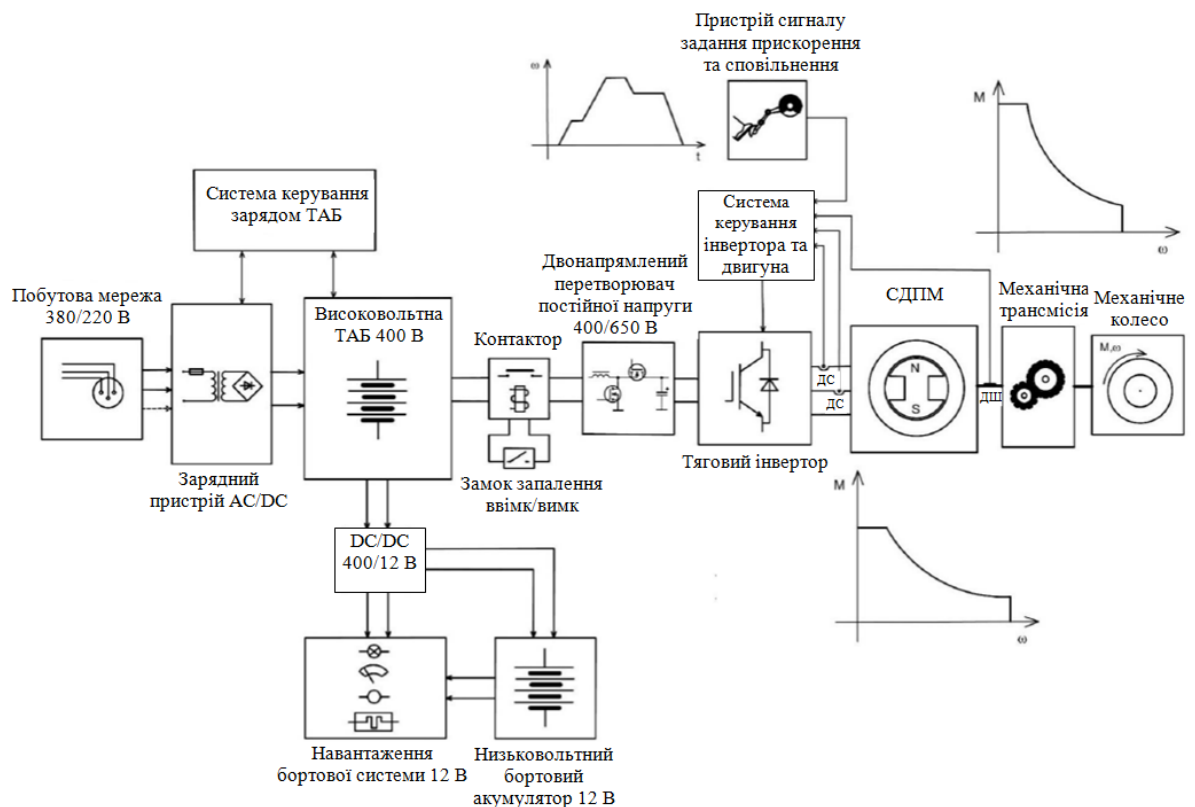


Рисунок 2.2 – Структурна схема силової установки електромобіля [7]

Важливою властивістю даних перетворювачів є принцип зворотності, що полягає в передачі потужності рекуперації, що виробляється двигуном в генераторному режимі через тяговий інвертор в напрямку тягової акумуляторної батареї.

Вибір типу перетворювача в залежності від потужності навантаження є важливою частиною проектуваного ЗППН. Діапазон напруг і потужностей застосовуваних перетворювачів показано на рисунку 2.3.

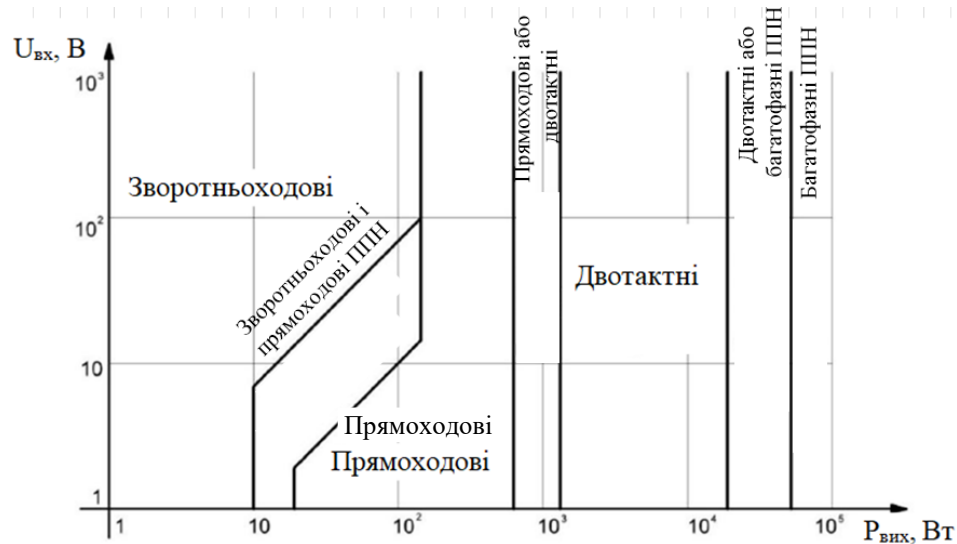


Рисунок 2.3 – Діаграма застосування перетворювачів напруги [10]

Для ЗППН потужністю близькою до 50 кВт і більше, що характерно для силової частини електромобіля, використання перетворювача з триканальною структурою є більш доцільним в порівнянні двотактними та зворотньоходовими, так як даний вид перетворювача побудований за зовсім іншою топологією (рис. 2.4). Незважаючи на складність управління багатоканальним перетворювачем, сумісна робота кількох складових перетворювачів забезпечує значне зниження струмових навантажень на силові ключі, так як загальне навантаження рівномірно розподіляється на кількість спільно працюючих перетворювачів [7].

Відповідно, для окремого перетворювача в триканальній схемі потрібні ключові елементи меншої потужності в порівнянні з перетворювачем з одноканальної схемою. Таким чином, оптимальним варіантом DC-DC перетворювача для установки в електромобіль є застосування триканального перетворювача постійної напруги. Фазовий зсув при цьому становитиме $\varphi = 2\pi / n = 120^\circ$.

Перетворювач складається з трьох паралельно включених складових перетворювачів з однаковими вхідними і вихідними параметрами. Режим роботи цих перетворювачів, що працюють на одиничних частотах, відрізняються тільки зсувом по фазі керуючих імпульсів U_y .

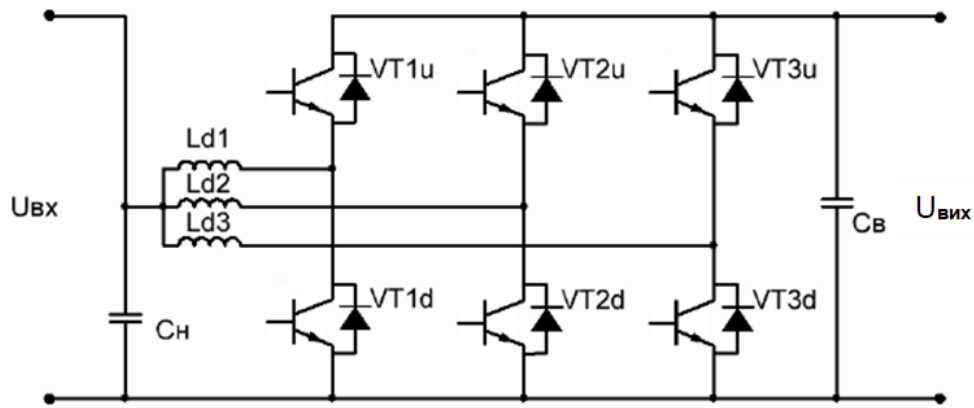


Рисунок 2.4 – Схема триканального ЗППН [9]

Таким чином, ЗППН триканальної структури працює за принципом чергування каналів, тобто перемикання котушок $L1...L3$ відбувається по черговому, за допомогою силових ключів $VT1d...VT3d$ в режимі підвищення (boost) і $VT1u...VT3u$ в режимі зниження (buck) напруги (рис. 2.5).

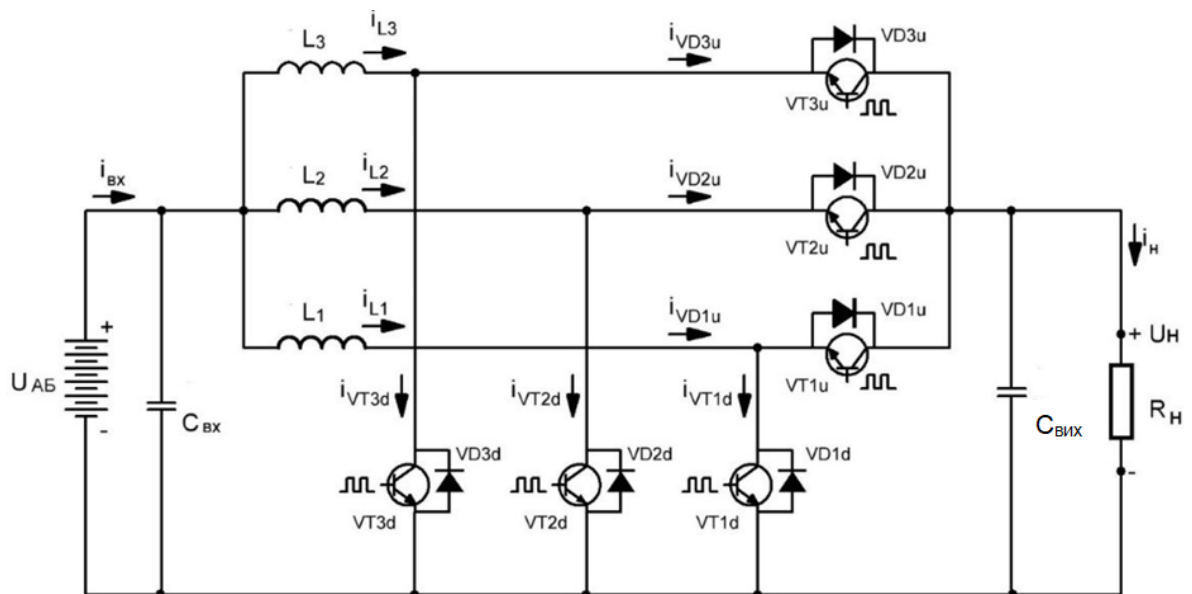


Рисунок 2.5 – ЗППН триканальної структури [9]

Позначення на рисунку 2.5: U_{AB} – напруга акумуляторної батареї; $C_{вх}$, $C_{вих}$ – входні та вихідні конденсатори фільтрів; $L1...L3$ – котушки індуктивності; $VT1u...VT3u$, і $VT1d...VT3d$ – силові транзисторні ключі, що працюють відповідно в режимах підвищення і зниження напруги;

$VD1u...VD3u$ і $VD1d...VD3d$ – зворотні діоди, відповідно, що працюють в режимах підвищення і зниження напруги; R_H – опір навантаження.

На рисунку 2.6 показано часові діаграми перетворювача. У момент часу t_0 відкривається транзистор $VT1d$ і котушка індуктивності $L1$ виявляється під напругою і починає накопичувати в собі енергію у вигляді магнітного поля. При досягненні моменту часу t_1 транзистор $VT1d$ закривається і через зворотний діод $VD1u$ струм буде протікати по колу $U_{ex} - L1 - R_H$.

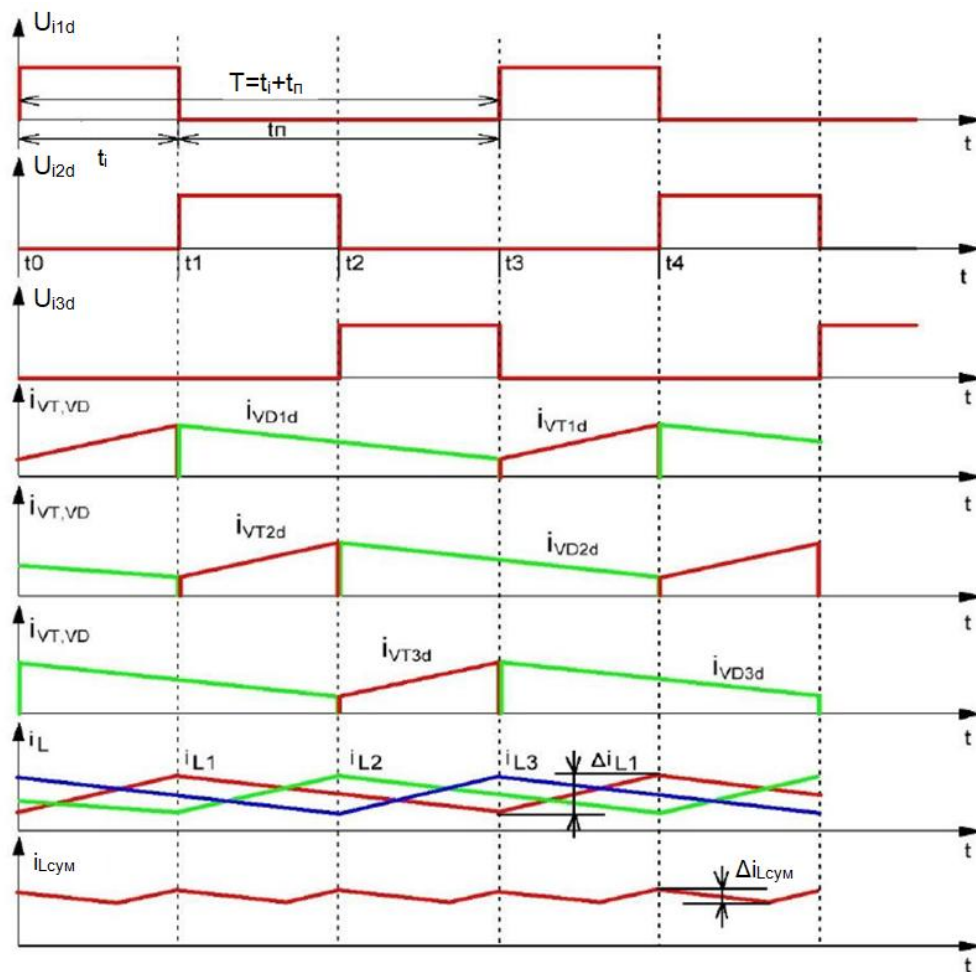


Рисунок 2.6 – Часові діаграми роботи ЗППН з триканальною структурою

У момент часу t_1 при закритті транзистора $VT1d$ одночасно відкривається транзистор $VT2d$ другого каналу. В результаті під напругою виявляється котушка $L2$. При цьому по колу котушки $L1$ і навантаження продовжує протікати струм.

У момент часу t_2 закривається транзистор VT2d і струм буде протікати по зворотному діоду VD2u кола $U_{ex} - L2 - R_n$ і сумується з зі струмом котушки $L1$. Одночасно із закриттям транзистора VT2d відкривається транзистор VT3d і котушка $L3$ відкривається під напругою. При цьому по колах котушок $L1$ і $L2$ продовжує протікати струм в навантаження.

При досягненні моменту часу t_3 транзистор VT3d закривається і струм буде протікати через зворотний діод VD3u по колі $U_{ex} - L3 - R_n$ і сумуватися з струмами i_{L2} та i_{L1} . Одночасно при досягненні моменту часу t_3 відкривається транзистор VT1d і до котушки $L1$ знову прикладається напруга джерела з подальшим накопиченням енергії магнітного поля.

Таким чином цикл повторюється. Перевага цієї схеми при порівнянні з одноканальною полягає в тому, що при зниженні струму першого каналу, з'являється струм другого каналу, а при зниженні струму другого, з'являється струм третього. Тут отримуємо випадок, коли струм навантаження при роботі перетворювача ніколи не досягне нульового значення, а розмах його пульсацій значно знизиться, що дає можливість знизити потужність фільтруючих конденсаторів [3, 14].

Розглянемо необхідні вхідні та вихідні параметри ЗППН, а також вимоги до них. Вимоги до електричних та електронних компонентів електромобілів, як і до будь-яких інших транспортних засобів є жорсткими і передбачають забезпечення високої надійності і безпеки. До основних таких вимог можна віднести:

- номінальна вхідна напруга перетворювача повинна відповідати напрузі блоку акумуляторної батареї;
- діапазон зміни вихідної напруги перетворювача повинні відповідати напрузі на вході трифазного інвертора;
- вихідна напруга перетворювача повинна бути стабілізованою незалежно від рівня заряду АБ;
- наявність захисту і сигнальних попереджень при коротких замиканнях і перевантаженнях;

- наявність системи охолодження (повітряне або рідинне);
- за функціональністю ЗППН має бути двонапрямленим для зворотної передачі потужності рекуперації в гальмівних режимах ЕТЗ.

Крім перерахованих вимог система керування багатоканальним перетворювачем повинна відключити будь-який із паралельно працюючих каналів при коротких замиканнях без відключення інших працюючих перетворювачів. Дана специфічна вимога до ЗППН транспортного призначення пред'являється з метою забезпечення безперебійного електроживлення тягового електроприводу електромобіля з точки зору його безпечної експлуатації.

2.3 Контролер керування перетворювачем

Як відомо в процесі експлуатації електромобіля при його їзді акумуляторна батарея розряджується. Для контролю її заряду застосовують контролери із зворотнім зв'язком, що разом із перетворювачем стабілізують напругу на вході інвертора.

Структурна схема системи керування триканального зворотного перетворювача постійної напруги (рис. 2.7) реалізовує можливість трансформації енергії як у бік підвищення напруги, тобто перетворення і передачі енергії від акумуляторної батареї до синхронного електродвигуна, так і у бік зниження напруги, тобто зворотне перетворення енергії при рекуперації [2, 11].

Сучасні контролери мають багато функціональних можливостей, зокрема захист від різних позаштатних режимів роботи перетворювача. У цифрових контролерах сигнали керування комутуються з високою частотою і точністю. Висока точність імпульсів, що генеруються, забезпечує мінімізацію незбалансованості струмів між фазами.

Однією з переваг багатоканального ЗППН є висока надійність забезпечення живлення навантаження, так як при виході з ладу одного з

паралельно працюючих віток контролер не припиняє роботу і вимикає пошкоджений канал без розриву навантаження з джерелом.

Це є дуже важливим у прикладному аспекті, оскільки до надійності електроживлення тягового електроприводу електромобіля висуваються жорсткі вимоги щодо безперебійної роботи для безпечної експлуатації.

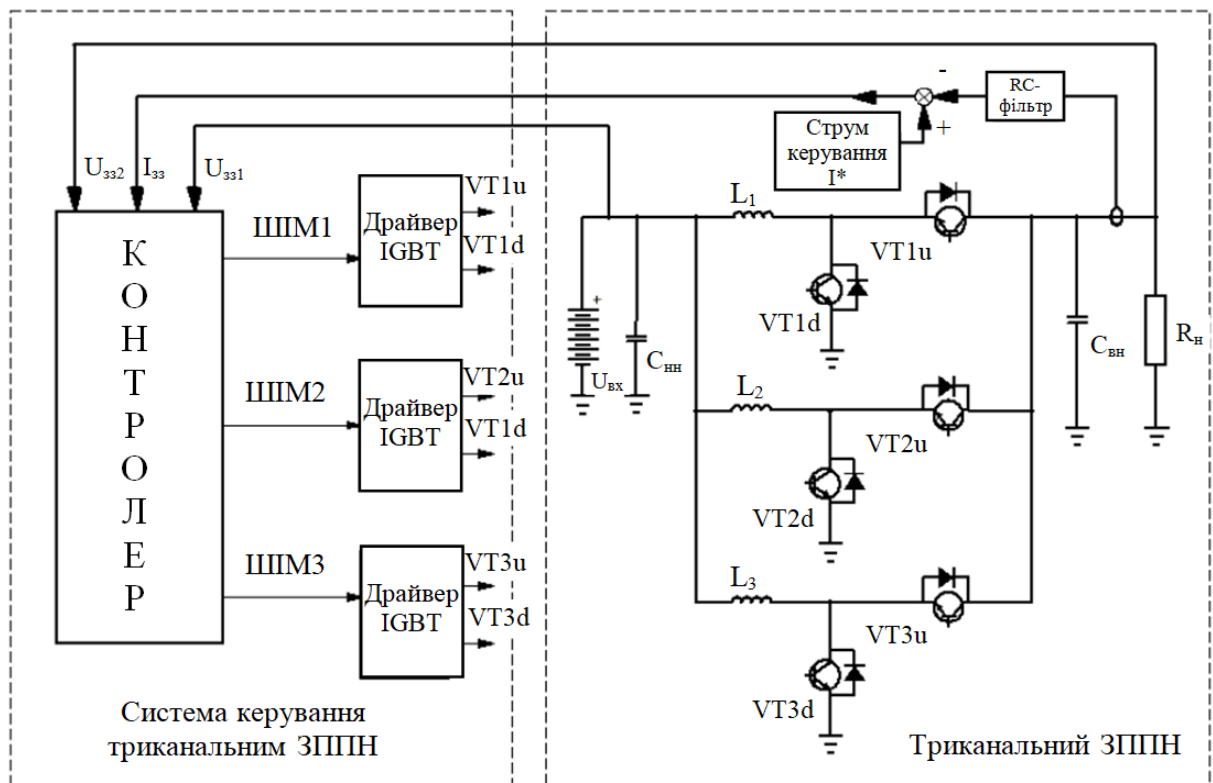


Рисунок 2.7 – Структурна схема системи керування перетворювачем [9]

У схемі рисунка 2.7 можна виділити три основні блоки: програмований контролер, драйвери транзисторів, що керуються широтно-імпульсною модуляцією і власне схема триканального ЗППН.

Драйвери формують необхідний рівень керуючих сигналів з попереднім їх підсиленням для силових ключових транзисторів VT1u...VT3u та VT1d...VT3d, а також захищають силові транзистори, шляхом паралельного ввімкнення зворотніх діодів при перевищенні допустимого струму, що протікає шляхом припинення подачі керуючих сигналів на відкриття транзисторів.

2.4 Принцип широтно-імпульсної модуляції в тяговому інверторі

Основу системи тягового інвертора складають ключові електронні елементи – транзистори. При синтезі алгоритмів управління ШІМ важливо прагнути до зниження комутаційних втрат в ключових елементах інвертора і пульсації струму в навантаженні, тобто в електродвигуні [5].

Основна задача ШІМ полягає у формуванні напруги на навантаженні, форма якої повинна бути в максимальній мірі наближена до синусоїди. При цьому має місце дискретна апроксимація бажаної синусоїдальної функції напруги імпульсами. Якість модуляції визначається точністю такої апроксимації. Важливим фактором, що в істотній мірі впливає на показник якості ШІМ є частота слідування імпульсів.

« При побудові алгоритмів керування процесом ШІМ частота перемикачів транзисторів повинна по мірі бути якнайбільшою, оскільки в цьому випадку може бути отримана більш висока точність апроксимації бажаної синусоїдної функції напруги імпульсами. Разом з тим, збільшення частоти комутації електронних ключів інвертора призводить до появи втрати електричної енергії, яка виділяється у вигляді тепла. Таким чином, задача підвищення якості процесу ШІМ є багатокритеріальною » [12].

На практиці найбільш широке застосування знаходять трифазні системи ШІМ, якщо вважати, що втрати енергії в трифазному електронному ключевому мості обмежені лише здатністю її розсіювання без порушення працездатності моста, то при заданих динамічних втратах енергії в інверторі принципово можна збільшити частоту ШІМ, що призведе до зниження пульсації струму в обмотках двигуна. Відомі алгоритми ШІМ, оптимальні за тим чи іншим критерієм, припускають, що частота модуляції f фіксована. Основна задача ШІМ полягає у формуванні на виході інвертора такої напруги, яка є майже періодичною функцією.

На практиці часто потрібно, щоб напруга на виході інвертора змінювалася по синусоїдному закону. При цьому основною складовою такої

функції служить модулююча періодична функція напруги $g_X(t)$. Період T_1 функції $g_X(t)$ істотно більша за період модуляції T_0 . Крім того, період T_1 – це не постійна величина, а змінна. Відношення $f^* = T_1 / T_0$ називають відносною частотою модуляції. При мінімізації кількості включених і відключених транзисторів втрати енергії можуть бути знижені. Це зумовлено тим, що на півперіоді струму з роботи буде виключений один із півмостів. Значення коефіцієнта k , що визначає ступінь зниження цих втрат, може бути вираховано за формулою:

$$k = \frac{3f_n^*}{2f_n^* + 6}. \quad (2.1)$$

При реалізації алгоритму відносна частота модуляції буде залишатися незмінною рівний відносною номінальної частоти f_n^* . Таким чином, при мінімально можливому числі комутацій ключових елементів тягового інвертора f_n^* можна збільшити в k разів. Це призведе до зниження дисперсії струму в навантаженні. Отриману частоту модуляції позначимо f_n^{**} і будемо називати номінальною відносно частотною модуляції:

$$f_n^{**} = kf_n^*. \quad (2.2)$$

Розглянемо найбільш широко застосовуваний на практиці випадок трифазної ШІМ. Відомо, що реалізується ШІМ трифазної напруги на трьох електронних ключевих півмостах інвертора. Візьмемо до уваги, що обмотки двигуна ввімкнені за схемою трикутника (рис. 2.8).

Півмости трифазного електронного ключового моста позначаються А, В, С. Комутація цих півмостів здійснюється таким чином, що працює або нижній або верхній ключ. Звідси слідує, що для аналітичного опису процесу керування півмостами $X = A, B, C$ можна обмежити задання комутаційних імпульсних функцій тільки верхніх ключів моста. При цьому стани «мертвого часу» не враховуються [2, 5].

Припустимо, що задані модульні функції фазних напруг $g_A = u_A / U_d$; $g_B = u_B / U_d$; $g_C = u_C / U_d$. Тут u_A, u_B, u_C – фазні напруги на навантаженні; U_d – напруга на вході інвертора. Ці функції задовольняють співвідношенню $g_A = g_B + g_C = 0$.

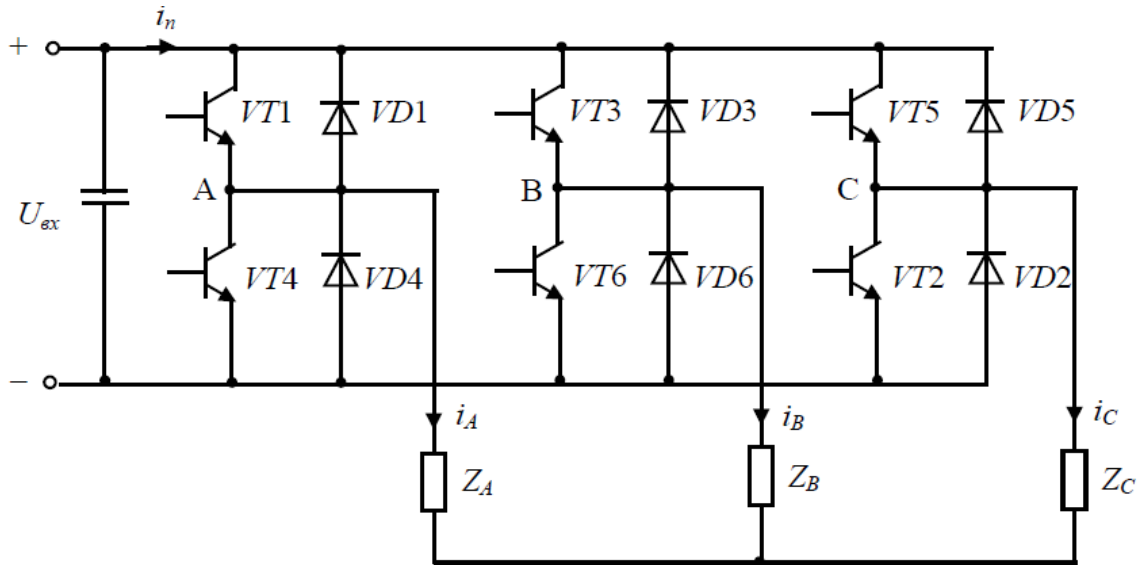


Рисунок 2.8 – Ілюстрація широтно-імпульсної модуляції напруги

Модулюючі функції лінійних напруг $g_{AB} = u_{AB} / U_d$, $g_{BC} = u_{BC} / U_d$, $g_{CA} = u_{CA} / U_d$ можуть бути отримані через модульні функції фазних напруг і потенціалів напівмостів інвертора на основі відомих формул [6]:

$$g_{AB} = g_A - g_B = \gamma_A - \gamma_B; \quad g_{BC} = g_B - g_C = \gamma_B - \gamma_C; \quad g_{CA} = g_C - g_A = \gamma_C - \gamma_A. \quad (2.3)$$

Тут γ_X – шпаруватість імпульсів в півмості $X = A, B, C$.

Під час реалізації ШІМ в схемі рисунка 2.8 має місце шість випадків роботи ключів. Їх комутаційні стани показані в таблиці 2.1.

Тут напруга лінійні напруги знаходиться як геометрична різниця фазних напруг.

На рисунку 2.9 показано формування фазної напруги вищевказаним способом.

Таблиця 2.1 – Стани ключів та значення напруг у тяговому інверторі

Номер стану	Стан ключів						Значення напруг			
	VT1	VT3	VT5	VT4	VT6	VT2	U_A	U_B	U_C	U_{CA}
I	1	0	0	0	1	1	$U_d/2$	$-U_d/2$	$-U_d/2$	U_d
II	1	1	0	0	0	1	$U_d/2$	$U_d/2$	$-U_d/2$	0
III	0	1	0	1	0	1	$-U_d/2$	$U_d/2$	$-U_d/2$	$-U_d$
IV	0	1	1	1	0	0	$-U_d/2$	$U_d/2$	$U_d/2$	$-U_d$
V	0	0	1	1	1	0	$-U_d/2$	$-U_d/2$	$U_d/2$	0
VI	1	0	1	0	1	0	$U_d/2$	$-U_d/2$	$U_d/2$	U_d
VII	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
VIII	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0

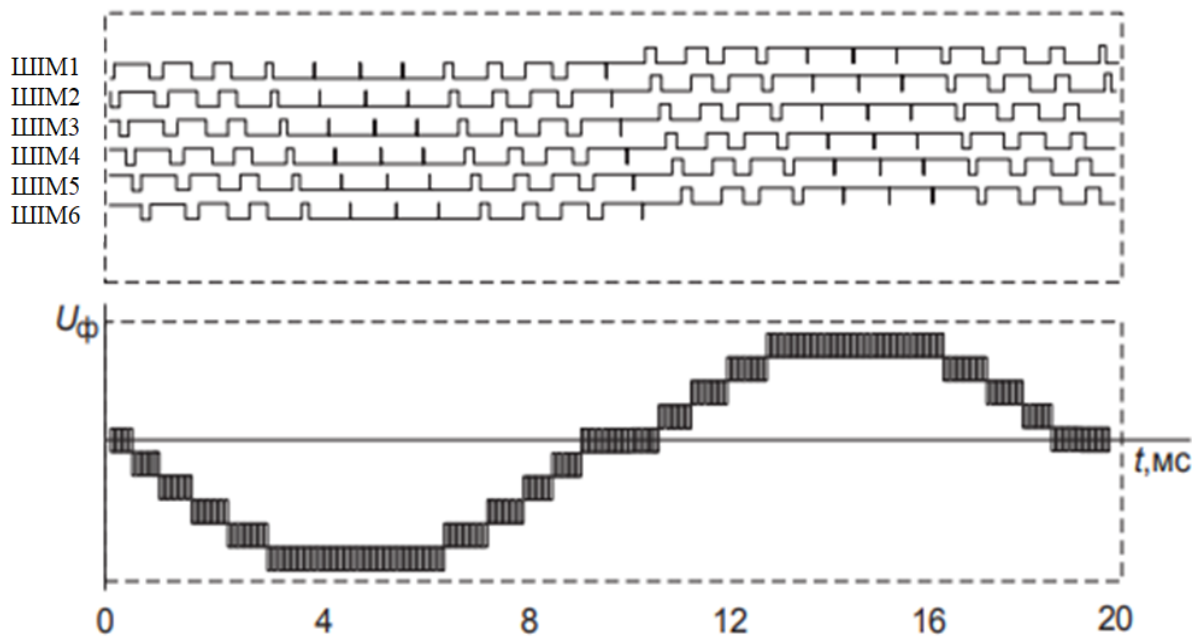


Рисунок 2.9 – Графік роботи ключів та формування напруги інвертора [6]

Отже, застосування трифазних транзисторних тягових інверторів в силовій системі електромобіля напруги дало змогу витіснити інерційні тиристорні інвертори.

Заданий широтно-імпульсний спосіб регулювання як напруги так і частоти струму забезпечує мінімальні пульсації струмів в обмотках приводного двигуна та широко використовується в тягових електроприводах електромобілів [5, 16].

2.5 Електрична схема тягової системи електромобіля

Електрична схема силової частини тягового електроприводу електромобіля включає в себе такі основні блоки: тягова електрична батарея (ТАБ), інтегрований зарядний пристрій або зворотньоходовий підвищуючий DC-DC-перетворювач (ЗППН), тяговий інвертор (ТІ), блок керування інвертором, синхронний двигун з постійними магнітами (СДПМ) та допоміжне комутаційне обладнання. На рисунку 2.10 показано електричну схему такої системи.

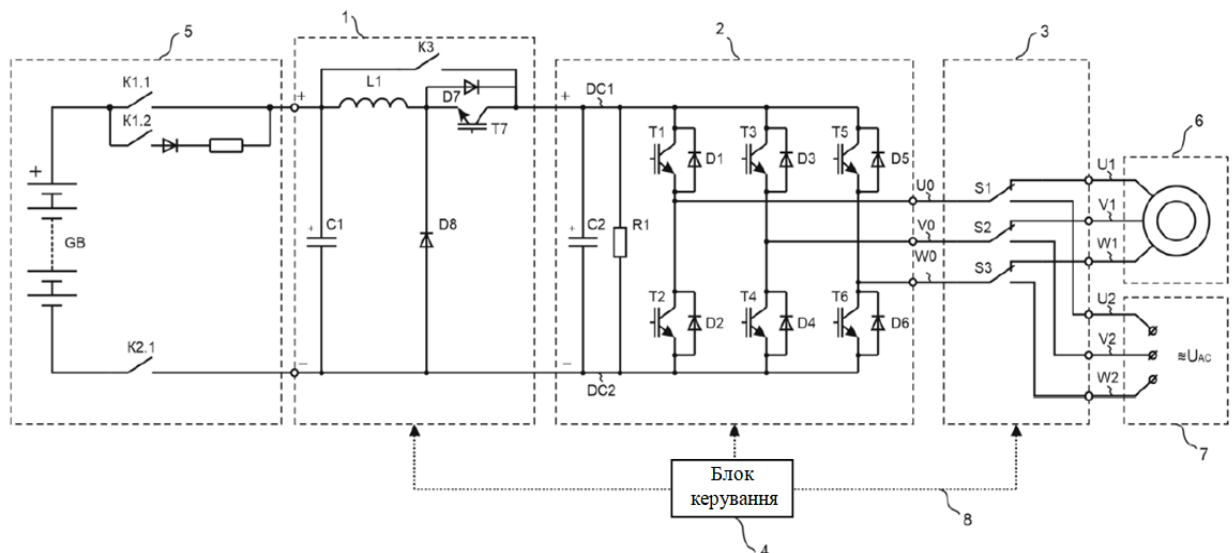


Рисунок 2.10 – Електрична схема тягового електроприводу електромобіля [7]

- 1 – зарядний пристрій (підвищуючий DC-DC-перетворювач); 2 – тяговий інвертор; 3 – комутаційний пристрій; 4 – блок керування; 5 – тягова акумуляторна батарея та блок силової комутації; 6 – електричний двигун; 7 – зовнішня електрична мережа

Інвертор для керування електричним двигуном складається з ряду напівпровідникових ключів і напівпровідникових діодів, які включені антипаралельно, конденсатор великої ємності у входному колі інвертора між силовими шинами постійного струму. Інвертор складається з ряду біполярних IGBT-транзисторів з ізольованим затвором VT1...VT6 із

зворотними діодами VD1...VD6. У вхідному колі інвертора ввімкнений ємнісний накопичувач C2, а також розрядний резистор R1. Силові фазні виводи U_0 , V_0 , W_0 інвертора з'єднані з комутаційним перемикаючим пристроєм.

Функціональні характеристики інвертора мають бути співмірними з тяговим електродвигуном, оскільки від цього залежить реалізація вихідних функціональних і тягових характеристик ТЕД. Зрозуміло, що завищення значень функціональних характеристик інвертора в порівнянні з ТЕД призведе до погіршення масогабаритних показників, збільшення електричних втрат та погіршення ефективності силової системи в цілому. З іншого боку, заниження показників інвертора призведе до неможливості забезпечення потужнісних параметрів ТЕД та його нераціонального використання зі зменшенням тягово-динамічних характеристик електромобіля.

Імпульсний зворотньоходовий підвищуючий перетворювач постійної напруги (ЗППН) є одночасно зарядним пристроєм при рекуперації та статичній зарядці, підключений до тягового джерела енергії та складається з індуктивного накопичувача електричної енергії L1, ємнісного накопичувача електричної енергії C1, напівпровідникового ключа VT7, напівпровідникових діодів VD7 та VD8, силового контактора K3. Висока якість вихідної постійної напруги перетворювача забезпечується Г-подібним LC-фільтром [4, 8, 16].

Джерелом енергії для заряду ТАБ є зовнішня мережа змінного струму. При цьому вхідним колом зарядного пристрою є випрямляч напруги, сформований на антипаралельних транзисторних ключах та діодах тягового інвертора, ввімкнених за схемою Греца або Ларіонова відповідно для однофазної або трифазної мережі.

Комутаційний перемикач для ЗППН реалізує можливість відключення електродвигуна від вихідного кола тягового інвертора і подальшого підключення зовнішнього джерела електричної енергії для заряду ТАБ.

Блок керування керує комутацією напівпровідникових ключів інвертора, перетворювача та комутаційного перемикаючого пристрою. Він

забезпечує формування та трансляцію команд керування перетворювачем, інвертором, комутаційним перемикаючим пристроєм каналом зв'язку. У режимі руху електромобіля ТАБ під'єднана до вхідного кола ЗППН, при цьому силовий контактор КЗ забезпечує протікання розрядного струму тягового джерела в коло інвертора.

Блок керування формує керуючі команди для комутації транзисторів VT1...VT6 інвертора за певним алгоритмом, зокрема алгоритм синусоїдної або векторної широтно-імпульсної модуляції. Внаслідок комутації зазначених напівпровідникових елементів здійснюється перетворення постійної напруги тягового джерела струму в регульовану за величиною та частотою змінну напругу для електроживлення та керування електродвигуном у тяговому та гальмівному режимах.

У режимі гальмування транспортного засобу діодний міст VD1...VD6 інвертора здійснює випрямлення трифазної напруги ТЕД у процесі електричного гальмування транспортного засобу та передачу електричної енергії до ТАБ.

РОЗДІЛ 3

ПРИКЛАДНА ЧАСТИНА

3.1 Розрахунок тягової електричної батареї

Протяжність ходу електромобіля на одному заряді акумулятора зумовлена не тільки ємністю батареї, але і технологічними особливостями прогріву чи охолодження контуру батареї, хімічним складом комірок, потужністю електродвигуна, вагою електромобіля та іншими параметрами. Запас ходу частіше всього відображається в документах від випробувальної лабораторії, яка проводила дослідження і видавала дозвільні документи для експлуатації на території України. На витрату акумуляторної батареї електромобіля впливають перепад висот на дорозі, тип коліс, робота системи опалення або кондиціонування, сумарна маса пасажирів і вантажів у авто, швидкість руху (середня, мінімальна, максимальна), інтенсивність і частота процесів прискорення і сповільнення автомобіля (дорожні умови і стиль водіння) та інше.

Слід відзначити, що для електромобілів характерна зворотна пропорція витрат енергії на їзді по місту і трасі в порівнянні з авто на двигуні внутрішнього сгорання. Менша витрата електроенергії при їзді по місту пов'язана з особливостями рекуперативного гальмування, що передбачає «повернення» енергії акумулятора в момент гальмування авто.

Наприклад, для базової моделі Tesla Model S P85 з акумуляторною батареєю ємністю 85 кВт·год запас ходу при швидкості 80 км/год і температурі навколишнього середовища близько 0°C становить 380 км. Цей же автомобіль при температурі повітря -20 °C проїжджає на повному заряді акумулятора всього 180 км, а при -26°C і всього 160 км [3]. Показники цієї моделі за міжнародними методами розрахунку дальності ходу EPA і NEDC становлять 426 і 502 км відповідно. Реальні можливості електрокара в цьому випадку нижче заявлених [17]. Популярний електрокар Nissan LEAF, який захопив в 2021 році 70% ринку електрокарів в Україні, зараз пропонує

покупцям нову версію авто SV Plus з батареями 60 кВт з запасом ходу 321 км, а в базовій сучасній версії з батареями 40 кВт·год – 240 км.

Volkswagen ID4 в базовій комплектації з батареєю 55 кВт·год проїжджає на одному заряді 360 км, а в комплектації з батареєю 85 кВт·год вже 520 км.

Розрахуємо ємність тягової батареї для двигуна потужністю 65 кВт. Енергоємність акумулятора складає:

$$E = \frac{L \cdot C}{100\eta} = \frac{400 \cdot 20}{100 \cdot 0,9} = 68 \text{ кВт} \cdot \text{год}, \quad (3.1)$$

де L – бажаний запас ходу, км;

$C = (15 \dots 20)$ кВт·год/100км – середній розхід енергії електромобіля;

$\eta = 0,9$ – коефіцієнт корисної ємності (батарею не можна розряджати до нуля задля збереження циклів заряду-розряду).

Для того, щоб отримати ємність з окремих акумуляторів, потрібно розрахувати кількість послідовних та паралельних комірок в самій батареї.

Відомо, що послідовне з'єднання літій-іонних акумуляторів (елементів) визначає сумарну напругу АКБ, а паралельне її ємність. Номінальна напруга АКБ складає 400 В, а номінальна напруга одного елементу – 4,2 В. Тоді кількість послідовно з'єднаних елементів складає $n_s = 400/4,2 = 95$ штук.

Ємність одного літій-іонного елементу типу 18650 лежить в межах 3 А·год. Тоді кількість паралельно ввімкнених елементів дорівнює $n_p = E / U_{ном} = 68000/400 = 170$.

Отже, створення батареї з такими параметрами вимагає конфігурацію 95S-170P. Загальна кількість елементів 16150 штук.

Важливим компонентом тягової електричної батареї є контроль її заряду-розряду. Для цього у всіх електромобілях задіюється система керування BMS (Battery Management System), що складається з блоку збору даних і блоку керування. Ці компоненти працюють разом, щоб гарантувати роботу акумулятора в безпечних межах, оптимізуючи продуктивність і

тривалий термін служби. BMS автоматично вимикає батарею при перезарядженні, глибокому розряді, короткому замиканні, перегріві або переохолодженні, а також здійснює балансування комірок.

3.2 Визначення вхідних і вихідних параметрів ЗППН ЕТЗ

Потужність ЗППН визначається вихідною потужністю силового електроприводу з урахуванням втрат потужності енергії:

$$P_{ЗППН} = \frac{P_{ТЕД}}{\eta_I \cdot \eta_{ТЕД}} = \frac{M_{ТЕД} \cdot \omega_{ТЕД}}{\eta_I \cdot \eta_{ТЕД}}, \quad (3.2)$$

де $P_{ЗППН}$ – потужність ЗППН;

η_I – ККД трифазного тягового інвертора;

$\eta_{ТЕД}$ – ККД трифазного електродвигуна;

$M_{ТЕД}$ – крутний момент двигуна;

$\omega_{ТЕД}$ – кутова частота обертання тягового електродвигуна.

На рисунку 3.1 представлена функціональна схема системи тягового електрообладнання ЕТЗ з використанням ЗППН.

Як тяговий ЕД у розрахунках використаємо синхронний двигун із збудженням від постійних магнітів (СДПМ). Вибір вихідної напруги перетворювача проводиться виходячи з максимально можливих характеристик високовольтного ТЕД та інвертора, обраного для даного електромобіля, з урахуванням наявності надійної ізоляції високовольтних шин від корпусу автомобіля для забезпечення електробезпеки під час експлуатації ЕТЗ. Висока напруга забезпечить менші струми при заданій потужності електродвигуна [5, 14].

Аналізуючи технічні характеристики СТЕО ЕТЗ, у тому числі високовольтного ТЕД, обраного для електромобіля, вихідну напругу ЗППН візьмемо рівною $U_d = 660$ В.

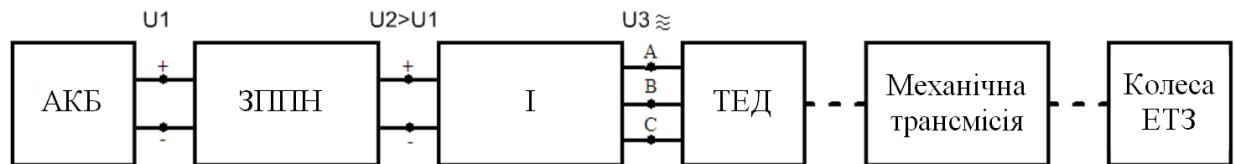


Рисунок 3.1 – Функціональна схема системи тягового електрообладнання (СТЕО) ЕТЗ із застосуванням ЗППН: — — електричний зв'язок;
----- — механічний зв'язок

Вибір значення напруги 660 В головним чином зумовлений максимальною робочою напругою обраного електродвигуна. На рисунку 3.2 показана спрощена функціональна схема СТЕО з використанням ЗППН. Тут наступна ланка «інвертор-ТЕД», замінена умовним еквівалентним опором.

Параметри АКБ: $U_{АКБ} = 400$ В, межі зміни напруги АКБ: $U_{exmin} = 0,8 \cdot U_{ном} = 320$ В, $U_{exmax} = 1,15 \cdot U_{ном} = 460$ В, $U_{вих\ ЗППН} = 660$ В, номінальна електрична потужність двигуна: $P_{ex} = 70$ кВт – вхідна потужність ЗППН при номінальному навантаженні.

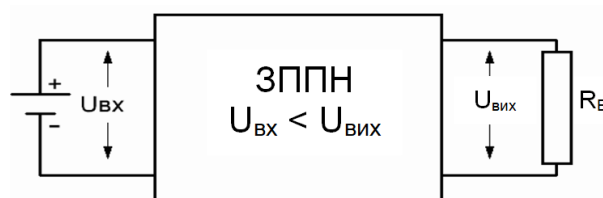


Рисунок 3.2 – Спрощена схема ЗППН

Номінальний вхідний та максимальний струми ЗППН визначається згідно рівнянь:

$$I_{exn} = \frac{P_{exn}}{U_{ex}} = \frac{70000}{400} = 175 \text{ А.} \quad (3.3)$$

$$I_{exmax} = \frac{P_{ex}}{U_{exmin}} = \frac{70000}{320} = 226 \text{ А.} \quad (3.4)$$

Максимальний і номінальний струми одного каналу ЗППН:

$$I_{\text{вих max кан}} = \frac{I_{\text{вих max}}}{3} = \frac{226}{3} = 75,3 \text{ А.} \quad I_{\text{вих ном кан}} = \frac{I_{\text{вих ном}}}{3} = \frac{175}{3} = 58,3 \text{ А.} \quad (3.5)$$

Максимальна величина пульсацій вихідної напруги ЗППН складає 3% від вихідної напруги: $\Delta U_{\text{вих max}} = 0,03 \cdot 660 = 20 \text{ В.}$

Максимальний струм навантаження визначається через ККД перетворювача, який складає 0,96.

$$I_{\text{вих max}} = \frac{P_{\text{вих}}}{\eta \cdot U_{\text{вих}}} = \frac{70000}{0,96 \cdot 660} = 110 \text{ А.} \quad (3.6)$$

Слід відмітити, що дана методика розрахунку справедлива і для багатоканальних перетворювачів

3.3 Розрахунок елементної бази перетворювача

Для розрахунку індуктивності котушок ЗППН триканальної структури необхідно визначити величину пульсації струму котушки індуктивності.

Приблизна величина пульсації струму котушки становить:

$$\Delta I_L = (0,2 \dots 0,4) I_{\text{вих max}} \cdot \frac{U_{\text{вих н}}}{U_{\text{вх н}}} = 0,3 \cdot 110 \cdot \frac{660}{400} = 55 \text{ А.} \quad (3.7)$$

Коефіцієнт заповнення імпульсів:

$$\gamma = 1 - \frac{U_{\text{вих max}}}{U_{\text{вх н}}} = 1 - \frac{460}{660} = 0,3. \quad (3.8)$$

Повна індуктивність трьох котушок, враховуючи частоту перемикання транзисторних ключів $f = 5 \text{ кГц}$ становить:

$$L_{\Sigma} = \frac{U_{\text{ex}}(U_{\text{вих}} - U_{\text{ex}})}{\Delta I_L \cdot f \cdot U_{\text{вих}}} = \frac{400 \cdot (660 - 400)}{55 \cdot 5 \cdot 10^3 \cdot 660} = 0,5 \text{ мГн.} \quad (3.9)$$

Індуктивність одного каналу складає $L_1 = 0,5/3 = 0,17 \text{ мГн}$.

Мінімальна ємність вихідного конденсатора визначається з формули:

$$C_{\min} = \frac{I_{\text{вих max}}(1 - \gamma)}{f \cdot \Delta U_{\text{вих}}} = \frac{110 \cdot (1 - 0,3)}{5 \cdot 10^3 \cdot 20} = 0,7 \text{ мФ.} \quad (3.10)$$

Розрахунковий період такту складає $T = 1 / f = 1 / 5000 = 0,2 \text{ мс}$, а період імпульсу в одному каналі $T_1 = T / 3 = 0,067 \text{ мс}$.

Розрахункові час імпульсу та паузи відповідно дорівнюють $t_i = T_1 \cdot \gamma = 0,067 \cdot 0,3 = 0,02 \text{ мс}$, $t_i = T_1 \cdot (1 - \gamma) = 0,47 \text{ мс}$.

« На даний час в силових системах електромобіля є застосування різних типів силових транзисторів. Компромісним технічним рішенням, що дозволило об'єднати позитивні якості як біполярних і польових транзисторів, стало створення монолітних IGBT структур, тобто біполярні транзистори із ізольованим затвором. Аналогічно польовому транзистору, при закритому стані структури зовнішню напругу прикладено до збідненої області епітаксійного n-шару, характеристики якого визначають значення робочих напруг IGBT. При подачі на ізольований затвор позитивного зміщення виникає провідний канал в р-області осередку і між зовнішніми виводами транзистора – колектором та емітером починає протікати струм » [7].

Оскільки високолегований р+-шар колектора знаходиться під впливом позитивної зовнішньої напруги, вглиб низькоомної епітаксійної n-області починається інжекція неосновних носіїв, що здійснюють модуляцію провідного каналу. Ця властивість визначила назву IGBT як структури з

модульованою провідністю. При цьому надається можливим значне зниження опору у відкритому стані, невластивий MOSFET-транзисторам [1]. Схемотехнічно структуру IGBT можна представити комбінацією двох головних складових: керуючого MOSFET-транзистора VT1 та біполярного силового р-п-р-транзистора VT2 (рис. 3.3).

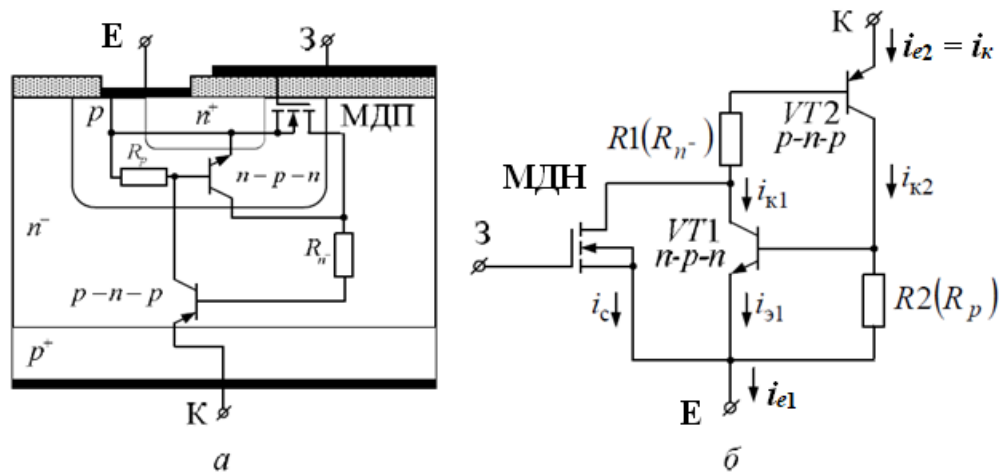


Рисунок 3.3 – Структура IGBT-транзистора (а) та його заступна схема (б) [4]

« Утворена структура з транзисторів VT1 і VT2 має додатній внутрішній зворотний зв'язок, так як базовий струм транзистора VT1 є частиною колекторного струму транзистора VT2 і навпаки – базовий струм транзистора VT2 є частиною колекторного струму транзистора VT1 » [9].

Тоді струми такого транзистора визначаються з виразів

$$i_{k2} = i_{e2} \alpha_2, \quad i_{k1} = i_{e1} \alpha_1, \quad i_{e2} = i_{k1} + i_{k2} + i_c. \quad (3.11)$$

Струм стоку MOSFET-транзистора визначається з виразу:

$$i_c = i_e (1 - \alpha_1 - \alpha_2) \quad \text{або} \quad i_c = S U_{3e}. \quad (3.12)$$

$$i_k = i_e \frac{S U_{3e}}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)} = S_{екв} U_{3e}. \quad (3.13)$$

Процес включення IGBT можна розділити на два етапи: після подачі позитивної напруги між затвором і витоком проходить відкриття польового транзистора. Рух зарядів з області n в область p призводить до відкриття біполярного транзистора і виникнення струму від емітера до колектора. Таким чином, польовий транзистор керує роботою біполярного.

« Комутаційними електронними ключами в такому перетворювачі як і в інверторі є IGBT-транзистори. IGBT поєднують вхідні характеристики біполярного транзистора і вихідні характеристики MOSFET транзистора. Перевага біполярного транзистора IGBT з ізольованим затвором перед MOSFET полягає в тому, що він забезпечує більший коефіцієнт підсилення потужності, ніж стандартний біполярний та польовий транзистор, а також більш високу робочу напругу і менші вхідні втрати. IGBT являє собою перемикаючий транзистор з низькою напругою включення навіть при високій напрузі пробою. Як вище показано, шар, найближчий до області колектора, являє собою $(p+)$ -підложку, область інжекції; над нею знаходиться область дрейфу N , що включає N -шар. Область інжекції інжектуює частину носіїв (діркових струмів) з $(p+)$ в N -шар » [8].

IGBT – це транзистор, що ідеально підходить для високовольтних і сильноточових приладів. Доступні з номінальною напругою від 400 В до 2000 В і номінальним струмом від 5 А до 1000 А, IGBT широко використовуються в промислових пристроях, таких як інверторні системи або як контролери двигунів електромобілів (EV).

IGBT працюють шляхом включення або виключення активацією або деактивацією виводів затвора. Якщо через затвор проходить додатня вхідна напруга, включається схема управління утриманням емітера. З іншого боку, якщо напруга на виводі затвора IGBT рівна нулю або мінімально від'ємна, схема вимикається. Для біполярного транзистора величина підсилення дорівнює відношенню вихідного струму до вхідного, який називається коефіцієнтом β . З іншої сторони для MOSFET-транзистора вхідний струм відсутній, оскільки виводи закривають ізолюють струм основного каналу.

N-канальний IGBT проводить струм (є відкритим), коли колектор має позитивний потенціал по відношенню до емітера, а затвор також має достатньо позитивний потенціал по відношенню до емітера. У результаті цього безпосередньо під затвором утворюється шар зворотного типу, який створює канал, і струм починає протікати від колектора до емітера [4, 17].

Струм колектора I_k в IGBT складається з двох компонентів: I_e і I_o . Струм I_e , який протікає від колектора до емітера за рахунок інжекттованих електронів через шар інжекції, дрейфовий шар і, в кінцевому результаті, канал, а I_o струм дірки, який протікає від колектора до емітера. Таким чином, струм дірки є досить малим, тобто $I_k \approx I_e$. Вихідні характеристики мають вигляд на рисунку 3.4.

Оскільки характеристики IGBT залежать від напруги, для підтримки їх у включеному стані на виводі затвора потрібна дуже невисока напруга, на відміну від біполярних силових транзисторів, яким потрібний безперервний струм бази в базі, щоб підтримувати їх насичення.

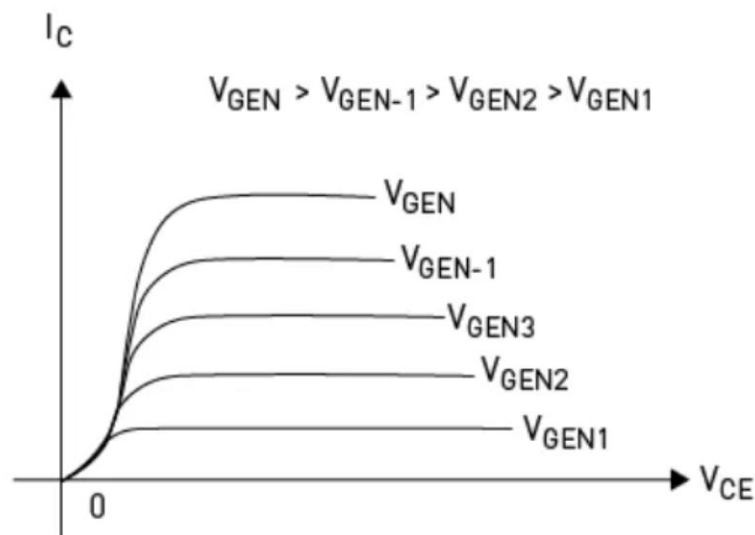


Рисунок 3.4 – Вихідні характеристики IGBT транзисторів

БТІЗ є односпрямованими пристроями, а це означає, що вони можуть перемикатися тільки в прямому напрямку (від колектора до емітера). БТІЗ є протилежністю польових транзисторів, які мають двонаправлений

процес перемикання струму; останні керуються у прямому напрямку, а зворотна напруга не контролюється.

Крім того, через IGBT протікає невеликий струм витоку, коли напруга затвор-емітер нижче порогової напруги, в цей момент напруга колектор-емітер майже дорівнює напрузі живлення, і тому IGBT працює в режимі відсічки [1].

Переваги IGBT транзисторів:

- можливість роботи з вищою напругою та струмом;
- високий вхідний опір;
- високий струм комутації за допомогою низької напруги;
- керується напругою, тобто не має вхідного струму та має низькі вхідні втрати;
- простота вмикання і вимикання. Вмикається поданням додатньої напруги, а вимикається нульовою чи від'ємною напругою;
- висока густина струму, що дозволяє використовувати чіп меншого розміру;
- вищі коефіцієнт посилення потужності та швидкість перемикання, ніж у біполярного та польового транзистора.

Недоліки:

- неможливість блокування більш високої зворотної напруги;
- дорожчі, ніж IGBT та біполярні.

IGBT широко використовуються у різних пристроях високої потужності. IGBT є невід'ємними компонентами регулювання та контролю швидкості електродвигунів у промисловості, включаючи автомобільну, аерокосмічну та побутову техніку. У контексті моторних приводів IGBT використовуються в інверторах джерела напруги для перетворення фіксованої напруги постійного струму в напругу змінного струму зі змінною частотою та амплітудою.

Ця електрична напруга змінного струму потім використовується для регулювання швидкості та крутного моменту двигуна. Висока пропускна

здатність струму та висока швидкість перемикання IGBT сприяють ефективному та точному керуванню двигуном, тим самим підвищуючи продуктивність, енергоефективність та знижуючи витрати на технічне обслуговування [3, 11].

IGBT також використовуються в тягових інверторах електромобілів, оскільки ці інвертори відповідають за регулювання потужності, що подається на двигуни, що приводять в рух транспортний засіб. Високі номінальні значення напруги та струму IGBT дозволяють їм ефективно керувати високою потужністю силових установок електромобілів.

Крім того, їх висока швидкість перемикання та мінімальне падіння напруги у відкритому стані сприяють підвищенню ефективності та зниженню тепловиділення, що є вирішальним фактором у збільшенні запасу ходу та терміну служби АКБ.

Попередній вибір IGBT – транзисторів здійснюється за величиною постійного струму колектора I_k . Подальше уточнення проводиться з використанням графіків залежності величини допустимого постійного струму колектора від температури корпусу, що наводяться у довідкових даних для конкретних типів транзисторів.

При цьому необхідною умовою струму колектора є:

$$I_{k,max} \leq I_{k,ном} \quad (3.14)$$

Другий параметр – це допустима робоча напруга кола колектор-емітер $U_{ке}$. Значення допустимої робочої електричної напруги необхідно вибрати з урахуванням забезпечення запасу по напрузі, щоб уникнути виходу з ладу транзистора при стрибкоподібному збільшенні напруги на високих частотах перемикання.

$$U_{ке max} + \Delta U_q \leq U_{ке ном} \quad (3.15)$$

Після вибору транзисторів за умовами (3.14), (3.15) обов'язковою умовою є аналіз теплових втрат, оскільки цей параметр характеризує ККД перетворювача. Втрати у IGBT-транзисторах складаються зі статичних втрат відкритого стану, динамічних втрат, тобто втрат при перемиканні.

Статичні втрати потужності виникають через наявність спаду напруги у відкритому стані транзистора і визначаються такою формулою (3.16):

$$\Delta P_c = U_{ke\text{ ввімк}} \cdot I_k. \quad (3.16)$$

Для визначення динамічних втрат транзистора необхідно з довідників взяти такі параметри:

- потужність, що витрачається на включення $P_{\text{ввімк.}}$;
- потужність, що витрачається на вимкнення транзистора $P_{\text{вимк.}}$.

Використовуючи ці параметри, необхідно розрахувати сумарну потужність на комутацію ΔP_∂ :

$$\Delta P_\partial = (P_{\text{ввімк.}} + P_{\text{вимк.}}) \cdot f. \quad (3.17)$$

Слід зазначити, що розглянути й регулятор доволі потужний і його робота супроводжується виділенням тепла. Для цього силову електроніку монтують на радіатори, а також застосовують охолодження вентиляторами.

3.4 Розрахунок тягового інвертора

Правильний розрахунок елементної бази тягового інвертора є запорукою успішного функціонування приводного двигуна та оптимальних тягових і швидкісних характеристик електромобіля.

На рисунку 3.5 показано зовнішній вигляд тягового інвертора потужністю 70 кВт електромобіля.



Рисунок 3.5 – Зовнішній вигляд інвертора [15]

Максимальний струм, що протікає через ключі I_{kmax} , є одним із ключових показників, що визначають надійність роботи IGBT-модуля у складі тягового інвертора. Скористаємось схемою, показаною на рисунку 1.5 в першому розділі роботи. Так, на підставі результатів тягово-енергетичного розрахунку, виконується оцінка максимального струму через ключі згідно з наступним виразом [5]:

$$I_K = \frac{\sqrt{2}k_1 \cdot k_2 \cdot P_n}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot \eta_n \cdot \cos\varphi_n} = \frac{\sqrt{2} \cdot 1,3 \cdot 1,2 \cdot 64000}{\sqrt{3} \cdot 390 \cdot 0,95 \cdot 0,92} = 240 \text{ A}, \quad (3.18)$$

де P_n – орієнтовна потужність тягової електричної машини типу PWSM, Вт;

$k_1 = 1,2 \dots 1,5$ – коефіцієнт короткочасного навантаження струмом;

$k_2 = 1,1 \dots 1,2$ – коефіцієнт допустимої миттєвої пульсації струму;

$\eta_{\text{ТЕД}}$ – номінальний ККД ТЕД;

U_2 – напруга на обмотці статора електричної машини, В.

У випадку, якщо в паспортних даних електричної машини замість лінійної вказано номінальну напругу шини постійного струму (наприклад, у каталогах зарубіжних тягових електричних машин), то можна скористатися виразами, що зв'язують лінійну напругу U_2 і напругу постійного струму від батареї U_b . При двополярній синусоїдній ШІМ:

$$U_2 = \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} U_b = 0,6 \cdot 650 = 390 \text{ В.} \quad (3.19)$$

У кваліфікаційній роботі як тягове джерело електроенергії розглядається акумуляторна батарея. Значення напруги тягової акумуляторної батареї U_b при розряді є залежністю від часу t при постійних значеннях розрядного струму I і температури батареї T_b .

У реальній системі значення струму та температури акумуляторів не постійні, крім того, температура окремих акумуляторів у складі ТАБ може суттєво відрізнятися.

У режимі тяги (розряду ТАБ) напруга на вході тягового інвертора дорівнює напрузі ТАБ $U_b = U_1$. Розрахунок напруги U_1 при такій кількості залежностей стає складним завданням, впоратися з яким дозволяють сучасні програмні комплекси, проте для вибору IGBT-модулів достатньо провести розрахунок номінальної, максимальної та мінімальної напруги. При цьому значення максимального напруги на вході інвертора U_{1max} диктується максимальною напругою тягової акумуляторної батареї в повністю зарядженому стані [2].

Тоді з урахуванням цього вираз для визначення максимальної напруги набуде вигляду:

$$U_1 = U_c \cdot n_s, \quad (3.20)$$

де U_c – напруга одного або кількох паралельно з'єднаних акумуляторів;

n_s – кількість послідовно з'єднаних акумуляторів.

Кількість послідовно з'єднаних акумуляторів може бути оцінена відповідно до наступного виразу:

$$n_s = U_b / U_c. \quad (3.21)$$

Для літій-іонних акумуляторів $U_{сmax} = 4,2$ В та $U_{сmin} = 3,0$ В при номінальній напрузі $U_c = 3,0$ В. Напруга U_b є вихідною точкою для визначення класу IGBT-модуля для подальшого вибору.

Вибираємо транзисторний IGBT-модуль (рис. 3.6) марки Infineon FF300R12KS4 1200V 300A 6-pack [12] за умовою $I_K \geq I_{Kmax}$ і $U_{ке} \geq U_b$.

Характеристики модуля:

- $U_{KE} = 1200$ В – максимальна напруга колектор-емітер;
- $I_K = 300$ А – максимальний струм колектора;
- $P_K = 1850$ Вт – максимальна потужність розсіювання;
- $U_{KE on} = 4,5$ В – напруга насичення кола колектор-емітер;
- $t_{on} = 0,1$ мкс – час затримки ввімкнення;
- $t_{off} = 0,5$ мкс – час затримки вимкнення.



Рисунок 3.6 – Вигляд IGBT-модуля [12]

На рисунку 3.7 показано ВАХ IGBT-модуля тягового інвертора FF300R12KS4 1200V 300A 6-pack.

Електричні втрати в транзисторах відіграють ключову роль при проектуванні інвертора. Втрати в IGBT у відкритому стані знаходимо за формулою (3.22).

$$\Delta p_{onVT} = I_{cp} \cdot U_{KE on} \left(\frac{1}{3} + \frac{D}{3\pi} \cdot \cos \varphi_n \right) = 170 \cdot 4,5 \cdot \left(\frac{1}{3} + \frac{1}{9,42} \cdot 0,8 \right) = 320 \text{ Вт.} \quad (3.22)$$

Тут $I_{cp} = I_{Kmax} / k_1 = 240 / 1,41 = 170$ А – середній струм транзистора.

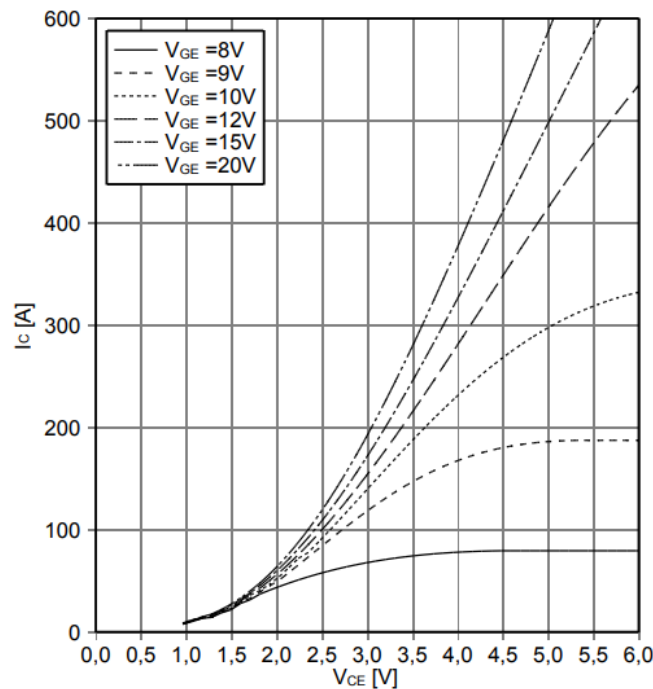


Рисунок 3.7 – ВАХ IGBT-модуля

Перевірку діодів не проводимо, оскільки втрати в них є набагато меншими, ніж в транзисторі. Тепловідвід забезпечується радіаторами. Втрати кожного з IGBT-транзисторів згідно [5] при комутації становлять:

$$\begin{aligned} \Delta p_{switchVT} &= \frac{1}{2 \cdot \sqrt{2} \pi k_1} \cdot I_{Kmax} \cdot U_b \cdot (t_{on} + t_{off}) \cdot f_{switch\ min} = \\ &= \frac{1}{2 \cdot \sqrt{2} \cdot 3,14 \cdot 1,4} \cdot 240 \cdot 650 \cdot (0,1 + 0,5) \cdot 10^{-6} \cdot 5000 = 37 \text{ Вт.} \end{aligned} \quad (3.23)$$

Сумарні втрати в IGBT:

$$\Delta p_{\Sigma VT} = \Delta p_{on} + \Delta p_{switch} = 320 + 37 = 357 \text{ Вт.} \quad (3.24)$$

Для цілого модуля (шести транзисторів) втрати складуть приблизно 1500 Вт, але з урахуванням втрат у діодах наблизатимуться до паспортних

1800 Вт, заданих у даташит. Отже, розрахунок і вибір транзисторного модуля для тягового інвертора проведено правильно.

3.5 Розрахунок та вибір електродвигуна

Попередні розрахунки необхідної потужності електродвигуна та його максимального крутного моменту проводимо виходячи із заданої максимальної швидкості електромобіля та часу прискорення до цієї швидкості. За результатами попереднього розрахунку підберемо найбільш підходящий тип електродвигуна виходячи з таких параметрів як термін служби, питома потужність та ККД.

У роботі як вихідні дані були взяті параметри, відповідні середньостатистичному міському автомобілю і наведені у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Параметри електромобіля для проведення розрахунків

Параметр	Значення
Маса електромобіля m , кг	1250
Радіус ведучого колеса r , м	0,32
Максимальна швидкість $V_{\max}$, м/с	45
Час розгону до максимальної потужності t_p , с	20
Аеродинамічний коефіцієнт сили лобового опору c_x	0,45
Площа лобового опору повітря A , м ²	1,55
ККД трансмісії	0,93
Передаточне число трансмісії i_1	9
Коефіцієнт опору коченню f_0	0,015
Густина повітря ρ , кг/м ³	1,2
Коефіцієнт залежності опору кочення шини від швидкості A_f , м ² /с ²	$5 \cdot 10^{-4}$
Кут нахилу дорожнього полотна α , °	0

Визначимо на початку коефіцієнт залежності опору f_k від швидкості [7]:

$$f_k = f_0 (1 + A_f V_{\max}^2) = 0,015 \cdot (1 + 5 \cdot 10^{-4} \cdot 45^2) = 0,03. \quad (3.25)$$

Тягово-швидкісні характеристики електромобіля визначаються характеристиками тягового електродвигуна, першою основною такою характеристикою є потужність двигуна. Використовуючи загальне аналітичний вираз [4], виконаємо розрахунок потужності електродвигуна електромобіля згідно даних таблиці 3.1.

$$P_{\text{дв}} = \frac{m \cdot g \cdot f_k \cdot V_{\text{max}} + 0,5c_x \cdot \rho \cdot AV_{\text{max}}^3}{\eta_{\text{мп}}} = \frac{1250 \cdot 9,81 \cdot 0,03 \cdot 45 + 0,5 \cdot 0,45 \cdot 1,2 \cdot 1,55 \cdot 45^3}{0,93} = 58,8 \text{ кВт.} \quad (3.26)$$

Номінальний струм статора синхронного двигуна з постійними магнітами дорівнює вихідному струму інвертора (240 А), розрахованому у попередньому пункті роботи.

Другою важливою характеристикою будь-якого електроприводу є крутний момент на валу. Від його величини залежить час розгону авто до необхідної швидкості а також, чим вищий крутний момент двигуна, тим менше передатне число повинен мати редуктор. Це підвищує загальний ККД трансмісії. Щоб знайти мінімальний крутний момент використовується аналітичний вираз (3.27). Тут у чисельнику в дужках фігурує сила тяги, що є сумою сил, які діють на авто, а саме сила опору кочення, сила опору нахилу дороги, сила опору повітря та динамічна сила інерції відповідно:

$$M_{\text{дв}} = \frac{(m \cdot g \cdot f_k \cdot \cos \alpha + m \cdot g \cdot \sin \alpha + 0,5c_x \cdot \rho \cdot AV_{\text{max}}^2 + m \cdot a) \cdot r}{\eta_{\text{мп}} \cdot i_1}. \quad (3.27)$$

$$M = \frac{\left[1250 \cdot 9,81 \cdot 0,03 \cdot 1 + 0 + 0,5 \cdot 0,45 \cdot 1,2 \cdot 1,55 \cdot 45^2 + 1250 \cdot \left(\frac{45}{20} \right) \right] \cdot 0,32}{0,93 \cdot 12} = 190 \text{ Нм.}$$

Тут $a = V / t_p = 2,25 \text{ м/с}^2$ – прискорення авто.

Швидкість ротора електродвигуна становитиме:

$$n_{ed} = \frac{9,55P}{M} = \frac{9,55 \cdot 58800}{190} = 2880 \text{ об/хв.} \quad (3.28)$$

Значення потужності вибираємо з умов максимального перевантаження 10% (64 кВт) для забезпечення необхідного крутного моменту та необхідної швидкості авто. Як показали результати розрахунків орієнтовні значення потужностей як тягової електричної батареї, тягового інвертора та приводного синхронного двигуна на рівні 70 кВт забезпечуватимуть тягові та експлуатаційні характеристики електромобіля.

РОЗДІЛ 4

ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Виявлення потенційних небезпек при обслуговуванні силової частини електромобіля

У кваліфікаційній роботі бакалавра розглянуто високовольтну систему електромобіля, а саме тягову електричну батарею, підвищувальний перетворювач DC-DC як пристрій вторинного електроживлення для тягового інвертора, що керує синхронним електродвигуном. Проаналізувавши дані пристрої з точки зору охорони праці показано, що одним із небезпечних факторів є наявність відносно високих електричних напруги ($> 400 \text{ В}$) та струму ($> 200 \text{ А}$).

Робота тягових батарей, перетворювачів та електроприводу електромобіля тісно пов'язана з використанням електричної енергії постійного і змінного струмів. Електробезпека являє собою комплекс організаційних і технічних заходів та засобів, спрямованих на захист людини від небезпечного впливу електричного струму. Проходячи через тіло, струм чинить термічну, електролітичну та біологічну дію, що може призводити як до локальних, так і до загальних електротравм. Ураження супроводжується пошкодженням тканин і органів, зокрема механічними травмами, електричними знаками, металізацією шкіри та опіками. Як бачимо з результатів роботи значення напруг і струмів є доволі небезпечними для обслуговуючого персоналу [5, 11].

Обізнаність з правилами електробезпеки дозволяє організувати роботу таким чином, щоб уникнути або мінімізувати вплив небезпечних чинників на людину. Постійний струм вважається більш небезпечним, ніж змінний. Особливість електричної небезпеки полягає в тому, що вона не відчувається до моменту контакту зі струмоведучими частинами, що ускладнює її своєчасне виявлення. Тому під час роботи з перетворювальними установками необхідно бути особливо обережним.

Напруга понад 40 В становить загрозу для життя людини, а тяжкість ураження визначається шляхом проходження струму через тіло. Під час розробки, налагодження, випробування та обслуговування силової частини електромобіля рекомендується працювати однією рукою, щоб уникнути одночасного контакту з струмоведучими частинами обома руками.

При монтажі пристроїв із гальванічною розв'язкою важливо забезпечити надійну ізоляцію. Необхідно також враховувати вплив кліматичних умов: підвищена вологість, робота на відкритому повітрі чи різкі температурні коливання можуть погіршити ізоляційні властивості матеріалів і підвищити ризик ураження струмом.

Монтаж чи ремонт слід виконувати на безпечній відстані від заземлених конструкцій (водопровідних труб, радіаторів опалення) або вживати заходів для запобігання контакту з ними.

На станціях технічного обслуговування, де розташовані джерела вторинного електроживлення та працює оперативно-ремонтний персонал, наявні небезпечні й шкідливі фактори. До фізичних належать: підвищений рівень шуму й вібрації, висока температура поверхонь обладнання, небезпечні рівні напруги та недостатнє освітлення. До психофізіологічних – фізичні перевантаження та нервово-психічне напруження, зокрема через монотонність роботи чи перевтому.

Робочі місця повинні бути сухими, добре освітленими й теплими, а також обладнаними роздягальнями. Площа приміщення має забезпечувати не менше 5 м² на одного працівника. Стіни рекомендується фарбувати у світлі тони, а стелю – у білий колір.

Під час робіт, пов'язаних із дотиком до струмоведучих частин перетворювача або електродвигуна, двигун необхідно попередньо зупинити за допомогою пристроїв автоматики. Забороняється знімати захисні огороження з працюючого обладнання або рухомих частин двигунів. На сусідніх установках, де можливе проведення ремонтних робіт, слід розміщувати попереджувальні плакати «Стій! Напруга!».

Для надання першої допомоги в разі нещасних випадків приміщення повинно бути забезпечене аптечкою з необхідними матеріалами та медикаментами. Також не допускається захаращення робочого простору сторонніми предметами.

4.2 Заходи і норми забезпечення техніки безпеки

Обслуговування тягових інверторів та електродвигунів пов'язане з небезпекою отримання механічних ушкоджень від обертових частин і пошкоджень електричним струмом. Шліфування контактних кілець потрібно проводити в захисних окулярах за допомогою колодок з ізоляційного матеріалу. Не слід одночасно торкатись струмопровідних і заземлених частин тягової системи. Інструмент інструмент застосовувати тільки з ізольованими ручками.

В електроустановках змінного струму напругою до 1000 В до яких належить силова частина електроприводу електромобіля перевірку зручно виконувати однополюсним вказівником напруги.

Перевірка ізоляції підвищеною напругою та вимірювання її опору становлять особливу небезпеку для електротехнічного персоналу та повинні виконуватися з дотриманням додаткових заходів безпеки. Ці контрольні операції повинні виконуватися бригадою СТО в складі не менше двох осіб, що пройшли спеціальну підготовку. Корпус і кожухи повинні бути при випробуванні заземлені.

Опір ізоляції вимірюють мегаомметрами при напрузі порядку 1000 або 2500 В. Дотик до затискачів самого мегаомметра небезпечно із-за малої потужності його генератора та великого внутрішнього протидії.

Щодо роботи з акумуляторами, то тут вимагається особлива увага до техніки безпеки, оскільки недотримання стандартів може призвести до серйозних аварій, пошкодження обладнання та загрози здоров'ю обслуговуючого персоналу.

Акумулятори містять хімічно активні речовини, які за певних умов можуть стати причиною виникнення небезпечних ситуацій. Однією з основних проблем є можливість короткого замикання, що може призвести до перегріву та загоряння. Це особливо небезпечно в умовах щільного встановлення батарей, де доступ до охолодження обмежений.

Перевантаження і неправильне заряджання також становлять серйозну загрозу. Перезарядка викликає нагрів і може призвести до руйнування батареї або її вибуху. Неякісне зарядне обладнання або неправильні налаштування зарядного пристрою часто стають причиною подібних проблем, тому важливо використовувати тільки рекомендовані виробником пристрої [5].

Важливим аспектом є регулярне технічне обслуговування. Це включає в себе огляд на наявність корозії, перевірку напруги і густини електроліту, а також оцінку загального стану батареї. Регулярне обслуговування дає змогу виявити потенційні проблеми на ранній стадії та запобігти їхньому розвитку. Робота з акумуляторами вимагає наявності відповідних засобів захисту. Оператори повинні використовувати засоби індивідуального захисту, такі як гумові рукавички, окуляри та спеціальні фартухи під час обслуговування батарей. У разі витoku електроліту необхідно мати під рукою нейтралізуючі речовини, такі як сода або вапно, для швидкої локалізації та усунення наслідків аварії.

Не менш важливо забезпечити правильну організацію робочого простору. Місце, де виконуються роботи з пристроями, має бути добре вентильованим і оснащеним системами пожежогасіння. Слід уникати наявності іскроутворюючого обладнання поблизу, а також суворо дотримуватися правил поведінки з електричними інструментами. Вкрай важливо мати чітко позначені зони для зберігання батарей і зарядних пристроїв, щоб мінімізувати ризик змішування різних типів акумуляторів, що може призвести до аварії.

ВИСНОВКИ

1. Проведено огляд сучасних стратегій в електромобілебудуванні. Розглянуто топології однієї з основних частин силової установки електромобіля, а саме інвертора, проаналізовано основні підходи до побудови систем керування, визначено їх переваги, недоліки та перспективи розвитку в електротранспорті.

2. Досліджено електричні процеси в тягових інверторах. Встановлено закономірності формування вихідної регульованої напруги та частоти, особливості роботи силових ключів, а також вплив способів широтно-імпульсної модуляції на ефективність функціонування системи.

3. Виконано опис структурної, функціональної та принципової електричних схем системи керування тяговим інвертором. Розглянуто взаємодію основних елементів системи, зокрема тягової акумуляторної батареї, DC-DC перетворювача, підвищуючого конвертера, тягового інвертора та синхронного двигуна з постійними магнітами.

4. Запропоновано алгоритми керування електронними ключами інвертора, які забезпечують стабільну роботу системи, ефективне регулювання швидкості та моменту електродвигуна, а також зниження втрат енергії. Проведено розрахунок параметрів елементної бази системи «ТАБ – DC-DC – підвищуючий конвертер – тяговий інвертор – синхронний двигун з постійними магнітами». Визначено основні електричні параметри компонентів, що забезпечують надійну та ефективну роботу системи в заданих режимах.

5. Отримані результати підтверджують можливість побудови ефективної системи керування силовим інвертором для електромобіля, що забезпечує високі енергетичні показники, надійність та точність керування тяговим електродвигуном. Запропоновані рішення можуть бути використані в сучасних електроприводах електромобілів та вдосконаленні існуючих систем керування.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Alagarasan Dhivya, Shivakumar Rangasamy, Sakthivel Ponnuvel. Isolated bidirectional DC-DC converters used in electrical vehicles: A review. In AIP Conference Proceedings. Vol. 3279, no. 1. AIP Publishing LLC. 2025, pp. 564-580.
2. Chenyu Peng. Analysis Of Development of Traction Inverters and Control Strategies and Optimization of PWM And SVPWM. Highlights in Science, Engineering and Technology. PSETTE 2024. Vol. 112. 2024, pp. 371-378.
3. Ghani Pooya, Hamidreza Hafezi. New control method for isolated bi-directional DC/DC converter with BESS and EV applications. 16-th Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference. 2025, pp. 11-25.
4. Ekici Elanur, Tahsin Koroglu, Özgür Çelik. Design and analysis of two-stage bidirectional power converter for vehicle-to-grid technology with fuel cell-battery electric vehicle. Journal of Energy Storage. Vol. 106. 2024, pp. 75-92.
5. Ghazanfari A., Perreault C. The Path to a Vehicle-to-Grid Future: Powering Electric Mobility Forward,” IEEE Industrial Electronics Magazine. Vol. 16, no. 3, 2022. pp. 4-13.
6. Chen, L., Li, J. Control Systems for Electric Vehicles: A Review IEEE Transactions on Industrial Electronics. T. 68. №4. 2021, p. 3456-3468.
7. Gillespie Thomas. Fundamentals of Vehicle Dynamics. SAE International, 2021. 480 p.
8. Jeyaraj A., K. Saji. Enhanced quadratic DC-DC boost converter with integrated power factor enhancement: advancing high-voltage gain and power quality in electric vehicle charging, Electrical Engineering. 2025, pp. 1-23.
9. Joseph Beretta. Automotive Electricity. Electric Drives. John Wiley & Sons, Inc. 111 River Street Hoboken, NJ 07030. 2025, 324 p.
10. Kanimozhi, G., P. Mirasree. Novel Bidirectional Converter Topology for Electric Vehicle Onboard Battery Charger. Resilient Community Microgrids. 2025, pp. 553-568.

11. Kumar R. Singh, P. Comparative Analysis of Electric Motor Types for Automotive Applications. *Energy Reports*. T. 9, № 2. 2023, p. 123-135.
12. Mammeri El Nouha, Oswaldo Lopez-Santos, Abdelali El Aroudi, Jure Domajnko, Natasa Prosen, Luis Martinez-Salamero. Modeling and Control of a Three-Phase Interleaved Buck Converter as a Battery Charger. *IEEE Access*. 2025, pp. 654-672.
13. Mookkan Jayamurugan, Saravanan Kaliyaperumal, Hossam Kotb, R. Narayanamoorthi. Novel Modular Buck-Boost based Multiport Bidirectional DC-DC Converter (MPBC) for Hybrid Electric Vehicle Application. *IEEE Access*. 2025, pp. 89-112.
14. Poorfakhraei A., Narimani M., Emadi A. A review of multilevel inverter topologies in electric vehicles: Current status and future trends. *IEEE Open Journal of Power Electronics*, Issue 2. 2021, pp. 155-170.
15. Sambhavi Y., Ramachandran V. A technical review of modern traction inverter systems used in electric vehicle application. *Energy Reports*, Issue 10. 2023, pp. 3882-3907.
16. Smith T., Johnson D. Market Overview of Electric Drive Manufacturers. *Automotive Technology Review*. T. 12, № 1. 2022, p. 78-89.
17. Tong Y., Issam S., Qin W., Gang L., Shengyu W.. Bidirectional DC-DC Converter Topologies for Hybrid Energy Storage Systems in Electric Vehicles: A Comprehensive Review. *Energies* 18, no. 9. 2025, pp. 456-475.
18. Wang, Y., Zhang, X. Current Trends in Electric Vehicle Development. *Journal of Electric Vehicles*. T. 15, № 3. 2022, p. 45-60.
19. Wei Liu. Introduction to hybrid vehicle system modeling and control. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey. 2023, 429 p.