

ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»
Факультет комп'ютерно- інтегрованих технологій, автоматизації, електроінженерії
та радіоелектроніки
(повне найменування інституту, назва факультету)

Автоматика та телекомунікації
(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

(підпис) (ініціали, прізвище)

“ ” _____ 20_ р.

Випускна кваліфікаційна робота

магістра
(освітньо-кваліфікаційний рівень)

на тему «Дослідження та модернізація системи автоматичного управління
електроприводом електромобіля»

Виконав : студент 2 курсу, групи СУАм-19
(шифр групи)

спеціальності

151 Автоматизація та комп'ютерно-
інтегровані технології
(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Крохмаль І С

(прізвище та ініціали)

(підпис)

Керівник к.т.н., доц. каф. АТ Воропаєва В.Я.
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Рецензент _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Рецензент _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

*Засвідчую, що у цій дипломній роботі немає
запозичень з праць інших авторів без відповідних
посилань.*

Студент _____
(підпис)

Покровськ – 2020 р.

ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»
Факультет комп'ютерно- інтегрованих технологій, автоматизації, електроінженерії
та радіоелектроніки
(повне найменування інституту, назва факультету)

Автоматика та телекомунікації
(повна назва кафедри)

Захист відбувся _____
(дата)

з оцінкою _____
секретар ДЕК _____
(підпис)

Випускна кваліфікаційна робота

магістра

(освітньо-кваліфікаційний рівень)

на тему «Дослідження та модернізація системи автоматичного управління електроприводом електромобіля»

Виконав студент групи СУАм-19 _____ Крохмаль І.С.
(підпис, дата) (ініціали, прізвище)

Керівник _____ к.т.н., доц. каф. АТ Воропаєва В.Я.
(підпис, дата) (ініціали, прізвище)

Зав.каф. автоматики та телекомунікацій _____
(підпис, дата) (ініціали, прізвище)

Консультанти _____
(підпис, дата) (ініціали, прізвище)

(підпис, дата) (ініціали, прізвище)

(підпис, дата) (ініціали, прізвище)

Нормоконтролер _____ ас. Д.О.Жуковська
(підпис, дата) (ініціали, прізвище)

Покровськ - 2020 р.

ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»

Факультет комп'ютерно- інтегрованих технологій, автоматизації електроінженерії та радіоелектроніки

Кафедра автоматика та телекомунікації

Освітній ступінь магістр

Спеціальність 151 «Автоматизація та комп'ютерно - інтегровані технології»

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри

_____/_____
“ ____ ” _____ 20__ року

З А В Д А Н Н Я НА ВИПУСКНУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Крохмаль І.С.

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Дослідження та модернізація системи автоматичного управління електроприводом електромобіля»

керівник роботи: к.т.н., доц. каф. АТ Воропаєва В.Я.

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

затверджені наказом від 23.09.2020 року № 693

2. Строк подання студентом роботи _____

3. Вихідні дані до роботи: результати науково-дослідної роботи, преддипломної практики

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

- 1) Огляд та розвиток електропривода транспортних засобів
- 2) Огляд принципів керування синхронним двигуном з постійними магнітами
- 3) Розробка моделі Simulink
- 4) Реалізація мікропроцесорної системи управління

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

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз розвитку електропривода	14.09.2020	
2	Аналіз джерел живлення та типів двигунів	20.09.2020	
3	Аналіз принципів керування приводом	25.09.2020	
4	Розробка моделі у Simulink	30.09.2020	
5	Вибір електронних компонентів	01.10.2020	
6	Розробка принципової схеми системи	25.10.2020	
7	Оформлення	30.11.2020	
8			
9			

Студент

_____ (підпис)

_____ (прізвище та ініціали)

Воропаєва В.Я.

Керівник проекту (роботи)

_____ (підпис)

_____ (прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Крохмаль І.С. Дослідження та модернізація системи автоматичного управління електроприводом електромобіля / Випускна кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня «магістр» за спеціальністю 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології (спеціалізація «Комп'ютеризовані системи управління та автоматика»). – ДВНЗ ДонНТУ, Покровськ, 2020.

Актуальність теми. Такі важливі характеристики електромобілів як надійність, енергоефективність, запас ходу, тощо значною мірою залежать від властивостей системи керування тяговим електроприводом. На сьогодні ефективним способом поліпшення характеристик привода являється його побудова на базі вентильного електродвигуна з постійними магнітами та використанням якості силиви ключів карбід-кремнієвих польових транзисторів. Тому важливою та актуальною є тематика побудови систем керування тяговим електроприводом, характеристики яких задовольнятимуть технологічні вимоги до тягового приводу електромобілів.

Об'єктом роботи є: тяговий електропривод транспортного засобу.

Предметом є: система керування електроприводом електромобіля.

Мета роботи: Дослідити та розробити систему керування тяговим електроприводом електромобіля.

Методи: Теоретичні.

Ключові слова: ТЯГОВИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД, СИСТЕМА КЕРУВАННЯ, СИНХРОННИЙ ДВИГУН З ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ, ІМІТАЦІЙНА МОДЕЛЬ, ТЯГОВИЙ ІНВЕРТОР, МІКРОПРОЦЕСОРНА СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ.

Список публікацій здобувача: Результати були представлені на VI всеукраїнському науково-практичному форумі ТАК-2020, м. Покровськ.

ABSTRACT

Krokhmal Ivan. Research and modernization of the automatic control system of the electric drive of the electric car / Final qualification work for the degree of "master" in the specialty 151 Automation and computer-integrated technologies (specialization "Computerized control systems and automation"). - DonNTU, Pokrovsk, 2020.

Actuality of theme. Such important characteristics of electric vehicles as reliability, energy efficiency, power reserve, etc. largely depend on the properties of the traction control system of the electric drive. Today, an effective way to improve the characteristics of the drive is to build it on the basis of a valve motor with permanent magnets and using the quality of the power switches carbide silicon field-effect transistors. Therefore, the topic of building control systems for traction electric drive is important and relevant, the characteristics of which will meet the technological requirements for traction drive of electric vehicles.

The object of work is: traction electric drive of the vehicle.

The subject is: the control system of the electric drive of the electric car.

Purpose: To investigate and develop a control system for traction electric drive of an electric car.

Methods: Theoretical.

Keywords: TRACTION ELECTRIC DRIVE, CONTROL SYSTEM, SYNCHRONOUS MOTOR WITH PERMANENT MAGNETS, SIMULATION MODEL, TRACTION INVERTER, MICROPROCESSOR CONTROL SYSTEM.

List of applicant's publications:

The results were presented at the VI All-Ukrainian Scientific and Practical Forum TAK-2020, Pokrovsk.

Зміст

ВСТУП.....	8
1 ОГЛЯД ТА РОЗВИТОК ЕЛЕКТРОПРИВОДА ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ	10
1.1 Джерела живлення на борту транспортних засобів	11
1.2 Типи тягових електродвигунів	16
Висновки до розділу 1	24
2 ПРИНЦИПИ КЕРУВАННЯ СИНХРОННИМ ДВИГУНОМ З ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ	25
2.1 Векторне керування синхронним двигуном з постійними магнітами	25
2.2 ШІМ-модуляція і трифазний ШІМ-інвертор.....	34
2.2.1 Векторна ШІМ.....	36
Висновки до розділу 2	38
3 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ	39
2.2 Блок регулятора швидкості (Speed Controller)	43
3.2 Блок векторного управління (vector controller).	46
3.3 Блоки трифазного інвертора напруги та двигуна.	52
Висновки до розділу 3	56
4 РЕАЛІЗАЦІЯ МІКРОПРОЦЕСОРНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ.....	57
4.1 Вибір мікроконтролера.....	57
4.2 Вибір транзисторів тягового інвертора.....	60
4.3 Вибір драйверу силового транзистора	64
4.4 Аналіз датчиків струму.....	66
4.5 Розробка принципової схеми системи управління електроприводом електромобіля	69
ВИСНОВКИ.....	78
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	79
ДОДАТОК А.....	81

Програмний код скрипту розрахунків коефіцієнтів	81
ДОДАТОК Б.....	82
Охорона праці при роботі з електрообладнанням	82

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АД Асинхронний електродвигун

ВЕД Вентильний електродвигун

ДВЗ – Двигун внутрішнього згорання

МРС – Магніторушійна сила

ТЕП Тяговий електропривод

ТЗ – Транспортний засіб

MOSFET (metal–oxide–semiconductor field-effect transistor) Транзистор метал-діелектрик-напівпровідник

SIC Карбід кремнію

ВСТУП

Питання економії палива транспортними засобами і поліпшення екологічного стану навколишнього середовища стають все більш актуальними, що в свою чергу сприяє появі нових видів альтернативних джерел палива. Одним із способів вирішення зазначених проблем є застосування перспективних видів транспортних засобів, в тому числі електромобілів. Електромобілі мають великі переваги в порівнянні з автомобілями на основі ДВС з точки зору безшумності і екології. В останні роки розвиток автотранспортної галузі відрізняється стрімкістю, і за умови подальшої розробки і поліпшення технічних характеристик електромобілі і можуть стати альтернативою автомобілям з двигунами внутрішнього згорання (ДВЗ). У зв'язку з цим провідні автовиробники інвестують в розвиток і вдосконалення технічних характеристик електромобілів.

Результатом зусиль автовиробників можна вважати зниження цін на літій-іонні акумуляторні батареї (АБ), що є одним із складних і дорогих компонентів електричних транспортних засобів. За статистичними підрахунками з 2007 по 2014 рр. ціни на дані типи АБ знизилися з 1000 доларів США до 410 доларів США за кВт*год, а для таких виробників як, Nissan і Tesla Motors, ще нижче - до 300 доларів США за кВт*год, і ця тенденція до зниження зберігається до сьогоднішнього дня. За прогнозами до 2020 року ціна таких типів АБ складе близько 200 доларів США за кВт*год.

Згідно з прогнозами Bloomberg New Energy Finance (BNEF), до 2040 року ринок електромобілів у всьому світі складе 35% від загального парку нових автомобілів. Однак при масовому виробництві автомобілів на електричній тязі виникає проблема створення інфраструктури зарядних станцій і генерації електроенергії для забезпечення живлення електромобілів. На сьогоднішній день питання інфраструктури станцій швидкої зарядки в таких промислово розвинених країнах, як США, Японія, Китай і низці європейських країн успішно

вирішується, і проблем із забезпечення електроенергією зарядних станцій не виникає через незначне споживання в порівнянні із загальною генерованою електроенергією в усьому світі. Як приклад можна привести величезну мережу швидкої зарядки TESLA Supercharger, для зарядки електромобілів Tesla. Потужність кожної з цих станцій становить 120 кВт, і вона може за 20 хвилин зарядити до 50% загальної ємності АБ, а для повного заряду потрібно півтори години. Основна проблема забезпечення електроенергією може виникнути, коли частка електромобілів в автомобільному парку стане суттєвою. Згідно з прогнозами BNEF, до 2040 року електромобілі будуть споживати 1900 ТВт*год електроенергії, що становить близько 7,5% від загального обсягу світового виробництва електроенергії в 2015 р. Інша проблема полягає в тому, що в багатьох розвинених країнах, які не мають доступ до великих обсягів поновлюваних джерел енергії, велика частина електроенергії виробляється на теплових електростанціях. Цей факт знижує привабливість електромобілів з точки зору екологічності. Однак, незважаючи на всі існуючі проблеми, автомобілі на електричній тязі розвиваються і удосконалюються.

Незважаючи на великі досягнення в області виробництва електромобілів, на шляху масового виробництва електротранспорту стоять серйозні технічні та економічні перешкоди. Одна з основних проблем - велика вага і незадовільні габаритні розміри акумуляторних батарей, тривалий час заряду і низький ресурс цих накопичувачів енергії.

Об'єктом роботи є: тяговий електропривод транспортного засобу

Предметом є: система керування електроприводом електромобіля

Мета роботи: Розробити систему керування електродвигуна електромобіля.

Методи: Теоретичні

Магістерська робота: 93 с., 56 рис., 6 форм., 7 табл., 14 джерел.

1 ОГЛЯД ТА РОЗВИТОК ЕЛЕКТРОПРИВОДА ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

Енергосилова установка більшості сучасних автомобілів побудована на базі теплового двигуна внутрішнього згорання. За прогнозами кількість транспортних засобів (ТЗ) збільшується значно інтенсивніше, ніж відбувається приріст населення: за наступні 50 років очікується збільшення населення світу від існуючого на сьогодні числа 7 млрд. людина до приблизно 10 млрд., а кількість ТЗ, що знаходяться в експлуатації, має збільшитися від 700 млн. до 2,5 млрд. одиниць. Збільшення числа ТЗ, що використовують ДВЗ, викликає побоювання, що протягом найближчих 50-ти років будуть вичерпані запаси органічного палива. Загальний обсяг викидів парникових газів з енергетичних установок, в тому числі на транспорті, є причиною глобального потепління. Лише за результатами досліджень, що проводяться щорічно і публікуються Міжнародною фінансовою корпорацією Світового банку (МФК СБ) вдалося встановити, що в поточному році на світову транспортну систему доводиться не більше 35% кінцевого споживання енергоресурсів. Причому, всередині транспортного сектора, що включає всі види транспорту, автомобільний транспорт споживає не більше 50% енергоресурсів. Тобто ТЗ споживають не більше 20% від загального кінцевого споживання органічного палива, і не тільки з ними пов'язані проблеми глобального потепління і вичерпання палива. Немає сумнівів, що екологічні проблеми з ростом числа ТЗ все більше загострюються. Автомобіль став неодмінним атрибутом сучасної цивілізації. ТЗ завжди потрібно мати поруч. Тому вони зосереджені в зоні проживання населення. Вихлопні гази не стільки отруюють атмосферу планети, скільки сильно погіршують екологічну ситуацію в зоні масового проживання людей і тварин.

Для зниження шкідливого впливу вихлопів ДВЗ ТЗ приймають різні можливі заходи: знижують токсичність самого органічного палива, застосовують фільтри і каталізatori в глушниках, підвищують економічність

двигунів внутрішнього згорання. Але всі ці заходи вже практично вичерпані. Залишається або зменшувати час роботи теплового двигуна в циклі функціонування транспортного засобу, або взагалі відмовитися від використання на ТЗ двигуна внутрішнього згорання. У першому випадку завдання вирішується за рахунок використання гібридних енергосилових установок. Другий випадок означає перехід від автомобілів до електромобілів.

1.1 Джерела живлення на борту транспортних засобів

Гібридна енергосилова установка містить двигун внутрішнього згорання, який безпосередньо обертає колеса ТЗ, або обертає електрогенератор що забезпечує живлення тягового електродвигуна, і тяговий електропривод (ТЕП), який або працює спільно з ДВЗ, або самостійно. При використанні гібридної енергосилової установки електроенергія виробляється на борту ТЗ за допомогою електрогенератора, що приводиться в обертання двигуном внутрішнього згорання. Додатково можуть бути встановлені накопичувачі, тобто акумулятори. Накопичувачі можна заряджати від генератора, при рекуперативному гальмуванні тяговим електродвигуном, а також на зарядних станціях. Гідність використання гібридних установок полягає в тому, що частина шляху транспортний засіб може проходити на електричній тязі, іншу частину шляху - при працюючому двигуні внутрішнього згорання. В результаті обсяг органічного палива, що спалюється і шкідливих викидів при тому ж пройденому шляху знижується. Відомі спроби використовувати інші способи отримання електроенергії на борту ТЗ. Наприклад, використовувати сонячні батареї або паливні елементи. В даний час ці способи є недостатньо ефективними і поки широко не використовуються. Найбільші надії на шляху широкого застосування електромобілів покладають на нові типи акумуляторів. Спроби використання на електромобілі свинцево-кислотних батарей в якості тягових безперспективні через низьку питомої енергоємності та великої маси цих батарей. Отримує

поширення використання літій-іонних батарей, завдяки чому кількість випущених електромобілів в останні роки збільшилася.

Перші роботи над літійовими акумуляторами були розпочаті ще в 1912 році Г.М. Льюїсом. Однак, реально літійові батареї з'явилися в продажу лише на початку 70-х, але їх не можливо було заряджати. У 80х роках були продовжені роботи по створенню саме акумуляторів, однак, без успіхів, тому що металевий літій, який використовувався в якості анода, був нестабільний.

Літій має перевагу тому що має великий електрохімічний потенціал, і найбільше відношення потенційної енергії до власної ваги в порівнянні з іншими металами. Однак, при циклічних зарядах-розрядах акумуляторі йдуть небажані процеси на аноді. Зокрема, метал проростає через сепаратор у вигляді кристалів і викликає внутрішнє коротке замикання. При цьому температура акумулятора швидко наростала, сягала температури плавлення літію, що викликало викид літію, який спалахував при контакті з повітрям. Нестабільність металевих літію, особливо під час заряду, змусила шукати неметалеві матеріали в яких би замість металевих літію працювали б його іони. Незважаючи на те, що Li-Ion технологія програє по місткості літій-металевої, вона щодо більш безпечна.

У 1991 р компанія Sony випустила на ринок першу комерційну Li-ion батарею. І з тих пір в акумуляторах використовуються саме іони літію, а не чистий метал.

Питома енергія Li-Ion батарей в два рази вище, ніж у NiCd батарей. А робоча напруга становить 3.6 В, замість 1.2а у акумуляторів на основі Ni. Подальше вдосконалення матеріалу електрода в майбутньому може істотно збільшити енергетичну ємність Li акумуляторів. Діапазон робочих напруг у

Li-Ion акумуляторів лежить в межах 2.8 - 4.2В. Навантажувальні характеристики і крива розряду Li-ion батарей дають можливість ефективно використовувати накопичену енергію в бажаному спектрі напруги: від 3,7 до 2,8 вольт на осередок. Крива розряду батарей на основі NiCd технології знаходиться в діапазоні від 1,25 до 1,0 вольт на комірку.

1994 року вартість виробництва Li-ion батарей типорозміру 18650 з ємністю 1100 мА*год. становила понад 10 доларів США. Але вже в 2001 р вартість виробництва знизилася до 2 доларів США, а ємність зросла до 1900 мА*год. Сьогодні високоемні елементи 18650 мають ємність більш 3000 мА*год., а їх ціна постійно знижується. Зниження витрат, збільшення питомої ємності і відсутність токсичних матеріалів при виробництві послужили приводом зробити Li-ion батареї загальноприйнятими джерелами енергії, спочатку в легкій промисловості, а тепер все частіше і у важкій промисловості, в тому числі для виробництва електричних силових агрегатів автомобілів. У 2009 р приблизно 38% продажів доводилося на Li-ion батареї. Батареї, вироблені по Li-ion технології, вимагають набагато меншої уваги при експлуатації, ніж батареї вироблені за іншими технологіями. У Li-ion батарей немає ефекту пам'яті і вони не потребують повної розрядки для збереження своїх властивостей. Саморозряд у цих батарей в 2 рази нижче, ніж у батарей на основі нікелю. Ці властивості відкривають великі можливості у використанні Li-ion батарей. Напруга в 3,6 вольт на одну клітинку може безпосередньо жити мобільні телефони і цифрові камери, сприяючи зниженню вартості пристроїв в порівнянні з конструкціями на декількох осередках. Недоліком Li-ion батарей є необхідність захисту схем для запобігання відмов і відносно висока ціна.

Як і будь-який акумулятор, Li-Ion батарея складається з двох електродів - катода і анода, сепаратора їх розділяє і електроліту в якості провідника. Катод являє собою оксид металу (Li), а анод складається з пористого вуглецю. Під час розряду, потік іонів йде від анода до катода через електроліт і сепаратор. При зарядці рух змінюється на протилежний. При заряді і розряді комірки, іони циркулюють між катодом (позитивним електродом) і анодом (негативним електродом). При розряді анод окислюється і втрачає електрони, а катод в цей момент притягує електроди. При заряді йде зворотний рух.

Найбільш поширені такі матеріали при виготовленні катода: Літій Оксид кобальту (або Літій Кобальт), Літій Оксид Марганця (відомий як шпінель або Літій Марганець), Літій Фосфат Заліза, а також Літій Нікель Марганець Кобальт

(або НКМ) і Літій Нікель Кобальт Оксид Алюмінію (або НКА). Всі ці матеріали мають теоретично однакові властивості в заданих межах. (Межа теоретичної ємності Li-ion технології дорівнює приблизно 2000 кВтг, що більш ніж в 10 разів перевершує ємність реально існуючих Li-ion батарей.

Li-ion батареї, вперше випущені компанією Sony, в якості анода використовували кокс. З 1997 року більшість виробників Li-ion батарей, включаючи Sony, перейшли на графіт, що допомогло зробити криву розряду більш плоскою. Графіт це одна з форм вуглецю. Графіт прекрасно працює в Li-Ion акумуляторах. Серед вуглецевих матеріалів, графіт є найбільш часто використовуваним, після твердих і м'яких вуглеців. Інші вуглецеві матеріали, такі як, наприклад, вуглецеві трубки, ще не знайшли широкого комерційного застосування. На рисунку 1.1 показані криві напруги при розряді сучасних Li-ion батарей з графітом в якості анода і більш ранніх версій з коксом.

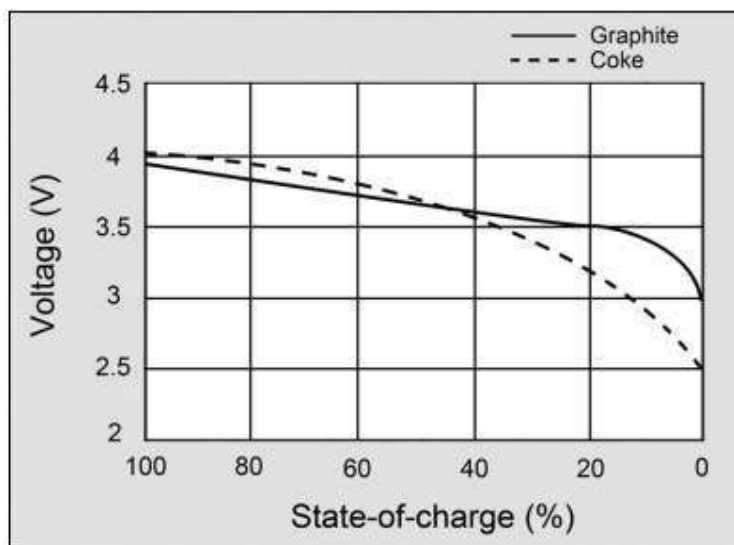


Рисунок 1.1 – Криві напруги розряду Li-ion батареї

У таблиці 1.1 наведено характеристики найбільш поширених типів Li-ion батарей з різними матеріалами в якості катода.

Таблиця 1.1 – Характеристики Li-ion батарей

Характеристики	Літій-кобальт (LCO)	Літій-марганець (LMO)	Літій-залізо-фосфатний (LFP)	Літій-марганець-кобальт (НМК)
Напруга, Вольт	3,6	3,8	3,3	3,7
Гранична напруга зарядки, Вольт	4,2	4,2	3,6	4,2
Кількість циклів заряд/розряд	500-1000	500-1000	1000-2000	1000-2000
Питома ємність, Ватт*год/кг	150-190	100-135	90-120	140-180
Початок використання	1994	1996	1999	2003
Примітки	Висока питома енергія	Висока питома енергія, використання у транспорті	Підвищений саморозряд, середня питома енергія	Висока питома енергія, використання у транспорті

Також на даний час проводяться дослідження та розробки і з використанням різних матеріалів в якості анода. В розробках по збільшенню ємності батареї було запропоновано використовувати кремнієві сплави. Цим розробники домоглися збільшити питому енергію літійового елемента на 20-30 %. Але у батарей з кремнієвими анодами було виявлено такий недолік як скорочення циклів заряду-розряду. Для збільшення життєвого циклу батареї в якості аноду використовують титанат літію, такі елементи показують хороші характеристики при роботі в низьких температурах і при високих навантаженнях. Недоліком використання титанату літію є зниження ємності елемента.

Також для зниження вартості та досягнення більшої питомої енергії, виробники використовують нікель замість кобальту, але це призводить до такого побічного ефекту як нестабільність елемента батареї.

Проаналізувавши роботи по покращенню літійових батарей ми бачимо що використання різних матеріалів в якості анода та катода покращують їх характеристики, проте покращення одного параметру як правило призводить до погіршення іншого.

Нові компанії виробники батарей зараз зосереджуються на збільшенні питомої ємності для швидкого просування на ринку батарей, але така тенденція призводить до зниження безпеки і довговічності використання. На відміну від новачків відомі компанії-виробники приділяють увагу в першу чергу безпеці і довговічності своїх батарей

Виробники акумуляторів, зараз працюють над оптимізацією технології що збільшить питому енергію (ємність) що збільшить часу використання, також для поліпшення навантажувальних характеристик працюють над збільшенням питомої потужності, підвищенням довговічності та терміну служби і, можуть зробити батареї більш безпечними для зниження негативного впливу на навколишнє середовище.

Але неможливо покращувати певні характеристики не погіршивши інші. Так було помічено що підвищення ємності зменшує струм навантаження, а оптимізація поточного навантаження знижує питому енергію. Для покращення безпеки та збільшення терміну служби, зміцнення комірки призводить до збільшення розміру батареї і її вартості за рахунок більш широкого шару сепаратора, адже сепаратор це найдорожча частина Li-ion акумулятора.

1.2 Типи тягових електродвигунів

Кожен раз, коли починають нову розробку тягового електроприводу ТЕП і коли з'являються нові люди, причетні до цієї розробки і мають свій рівень знань і розуміння завдання, знову піднімається питання про те, на базі якого з типів

електродвигунів будувати ТЕП. Однозначно ясно тільки одне: електродвигун не повинен мати ковзаючих контактів

Цій вимозі відповідають такі типи електродвигунів:

Вентильний реактивний електродвигун (РД);

Індукторний електродвигун (ІЕД);

Вентильний електродвигун (ВЕД) постійного струму з збудженням від постійних магнітів (ПМ), тобто з магнітоелектричним збудженням (на відміну від електромагнітного збудження, коли використовується обмотка).

Асинхронний двигун (АД).

Всі ці типи електродвигунів мають однаковий якір, розташований на статорі, що дозволяє підключати його обмотку до керованого силового електронного перетворювача, який здійснює комутацію обмотки і зміну значень напруги та частоти. Ротор у кожного типу електродвигуна має свою специфіку і визначає принцип дії даного типу двигуна. Спільним є те, що електроенергія до ротора не підводиться через ковзаючі контакти.

Відповідь на питання, який же з цих типів електродвигунів доцільно використовувати в ТЕП електромобіля, слід сформулювати наступним чином: в сучасних умовах, при наявності керованого електронного перетворювача і цифрових засобів управління ним, з точки зору ефективності електромеханічного перетворення енергії, абсолютно не важливо, якого типу електричну машину взяти за основу. Будь-яка з них при відповідному законі управління перетворенням енергії забезпечить однакову якість перетворення. Тому при виборі типу електродвигуна потрібно враховувати додаткові вимоги і обмеження. Найбільш значущими з них є маса, габарити і вартість. Якщо зазначені три показники не мають вирішального значення для ТЕП, то його можна будувати на базі будь-якого з перерахованих електродвигунів. Тут краще орієнтуватися на можливості і підготовленість їх виробництва.

Однак все ж не слід забувати, що при всіх інших однакових показниках різні типи електродвигунів мають різні масу, габарити і вартість, які визначаються принципом дії, особливостями конструкції і особливостями

технологічного процесу виготовлення. Тому має сенс порівняти двигуни за цими показниками. Важливими є й інші міркування. Зменшення об'єму і маси елементів ТЕП забезпечують наступні можливості:

При тій же масі перевезеного корисного вантажу і при тому ж запасі електроенергії на борту ТЗ збільшується його пробіг;

При тому ж пробігу і тому ж запасі електроенергії можна збільшити масу корисного вантажу, що перевозиться.

Причому, виграш складається з зниження маси самих елементів ТЕП і зниження маси і об'єму накопичувачів електроенергії, так як для перевезення більш громіздкого ТЕП потрібно затратити більше електроенергії. Аналогічно для літальних апаратів використовують поняття польотної маси. Під нею розуміють не тільки масу обладнання, а й масу палива на борту, що витрачається на перевезення цього устаткування.

Непридатне, якщо ТЕП для ТЗ виявиться здатним перевозити тільки себе, не залишаючи місця для корисного вантажу (пасажирів). Таким чином, вимога забезпечення найменшої маси і об'єму елементів ТЕП є зовсім не зайвим і має істотне значення.

Габарити і маса силових електронних блоків ТЕП визначаються встановленою потужністю. Якщо вона задана, то фактично задані маса і об'єм цих блоків. Розглядати цифрові блоки управління ТЕП не має сенсу, так як вони мають незрівнянно менші об'єм і масу, ніж у силових електронних блоків. Отже, основним елементом, що дозволяє знизити габарити і масу ТЕП, є тяговий електродвигун (ТЕД) а також електронний силовий перетворювач .

Для зниження маси і об'єму ТЕД гранично збільшують електромагнітні навантаження (на активні матеріали) щільність струму в обмотках і щільність потоку (індукцію) в магнітопроводі. Гранично допустима щільність струму визначається способом охолодження, класом використовуваної ізоляції по нагрівостійкості, тривалістю режиму роботи електродвигуна. Основний ефект дає спосіб охолодження. Так при рідинному охолодженні допустима щільність струму приблизно вдвічі вище, ніж при повітряному охолодженні. Саме тому для

охолодження ТЕД застосовують рідинне охолодження. Аналогічно і для охолодження силових електронних блоків і їх елементів використовують рідинне охолодження. Це дозволяє в тому ж обсязі пропустити більший струм, тобто збільшити електричне навантаження на силові елементи.

Система рідинного охолодження вимагає, звичайно, додаткового обсягу для розміщення і збільшує масу. Але загальна маса і об'єм ТЕД з системою охолодження виходять менше, ніж при повітряному охолодженні. Природно, з тією ж метою зменшення маси і об'єму в ТЕД застосовують ізоляцію з підвищеною нагрівостійкістю, а також електротехнічну сталь для магнітопроводу з високою індукцією насичення і малими питомими втратами на гістерезис і вихрові струми

З тією ж метою ТЕД виконують з підвищеною частотою обертання. Чим вище частота, тим при тій же потужності від електродвигуна потрібно менший крутний момент. Тим менший потрібен об'єм для розміщення електродвигуна, так як він пропорційний моменту, а не потужності. Для узгодження же частоти обертання валу електродвигуна і частоти обертання ведучого колеса використовують редуктор. Використання безредукторного ТЕД не може бути раціональним ні з яких міркувань. Сумарна маса і об'єм двигуна з редуктором завжди менше, ніж у низькочастотного двигуна без редуктора.

Маса і обсяг самого електродвигуна залежать від його принципу дії і конструктивних особливостей. Порівняємо перераховані типи двигунів, придатних для використання.

Ротор РД є пасивним, не створює потік збудження. Він просто модулює потік, створений якорем. Для цього він виконаний у вигляді зубчастого циліндричного тіла. Магнітна провідність під зубцем ротора багато більше, ніж під пазом. При включеній обмотці якоря вісь високої провідності прагне повернутися до збігу з віссю потоку якоря за рахунок реактивного крутного моменту. Комутовуючи обмотку якоря, переміщують вісь потоку, за якої і слід ротор. РД споживає з мережі живлення обмотки якоря велику реактивну складову струму, яка створює намагнічувальну магніторушійну силу (МРС),

затрачену на проведення потоку по всій магнітного ланцюга: по сталі якоря, по робочому зазору, по сталі ротора.

Корисна потужність електродвигуна пропорційна добутку ЕРС обертання обмотки якоря і активної складової струму якоря. Втрати ж в міді пропорційні квадрату повного струму. Через те, що реактивна складова струму якоря РД у багато разів перевищує активну складову, ККД цього типу двигуна (за принципом дії) завідомо малий. Природно, ККД можна підвищити, але за рахунок збільшення обсягу активних матеріалів (міді обмотки і стали магнітопроводу). При модуляції магнітного потоку в робочому зазорі РД він змінюється від мінімального значення (коли проходить через паз з низькою провідністю), до максимального значення (коли проходить через зубець). Змінна складова потоку наводить ЕРС в обмотці якоря. А неминуче присутня постійна складова лише завантажує магнітопровода і змушує збільшити його переріз. В результаті обсяг і маса РД збільшуються і з цієї причини.

Отже, недоліки РД складаються не тільки в тому, що він споживає з мережі енергію на збудження, а й в наявності постійної складової потоку. Для компенсації доводиться збільшити габарити і масу РД.

Ротор ІЕД влаштований так само, як і ротор РД. Він так само модулює потік в робочому зазорі, і в потоці теж є постійна складова. Але його якір не споживає енергію на створення потоку збудження. Для цього служить обмотка збудження. Тільки вона встановлена не на роторі, а на статорі. Наявність джерела потоку збудження дозволяє регулювати його окремо від струму якоря, а крім того, дозволяє позбутися від намагнічувальної складової струму якоря. В цьому має перевагу ІЕД. Є й недоліки. Для обмотки збудження на статорі потрібно додаткове місце. Вона збільшує загальну масу двигуна. Потік збудження проходить по додатковим (паразитним) зазорам, перш, ніж потрапити в робочий зазор. Тому обмотки збудження доводиться збільшити, а це знову призводить до зростання габаритів і маси двигуна. В результаті ІЕД програє по масі і об'єму РД приблизно 10 - 15%. Але зате є можливість регулювати потік збудження.

На роторі ВЕД встановлюють постійні магніти, тобто ВЕД, як і ІЕД, має джерело потоку збудження. Причому, енергія збудження взагалі не споживається ззовні. Це відразу забезпечує ВЕД вигоду за масою і габаритами перед РД і ІЕД. Шляхом регулювання в будь-якому режимі роботи ВЕД можна зробити так, що він буде споживати тільки активний струм. При цьому досягається високий ККД. Практика показує, що за інших рівних умов (крутний момент, ККД, тепловий режим) габарити і маса ВЕД приблизно на (15 - 20)% менше, ніж у РД і на (20 - 25)% менше, ніж у ІЕД. Наявність постійних магнітів в ВЕД створює істотні труднощі, які часто відносять до недоліків. Магніти в процесі роботи ВЕД не можна розмагнітити і намагнітити і за рахунок цього змінити потік збудження. Але це не недолік, а складність яку можна вирішити. У ТЕП є необхідність, як прийнято говорити, ослаблення поля. На високих частотах обертання ЕРС досягає рівня наявного в розпорядженні напруги, струм зменшується і ротор не може розганятися далі. Тоді в інших типах двигуна зменшують потік збудження. При цьому при незмінному числі витків в обмотці якоря на тій же частоті обертання в ній наводиться менша ЕРС. При тій самій напрузі зростає струм і момент, ротор продовжує розганятися. Він би розганявся далі і при колишньому потоці, якби була можливість підвищити напругу.

Але такої можливості немає. Як уже сказано, в ВЕД можна знизити потік за рахунок магнітного стану магніту. Але є можливість зменшити число витків в обмотці, наприклад, при досягненні половинній від номінальної частоти обертання. Це робиться шляхом перемикання обмотки в момент відсутності в ній струму при роботі інвертора. Ефект виходить той же, що при зниженні потоку: ЕРС зменшується, при тій же напрузі струм зростає, і ротор продовжує розганятися до тих пір, поки ЕРС не зрівняли з напругою. Таким чином, в процесі розгону ротора напруга збільшують до максимального наявного значення, потім перемикають обмотку, знижують до відповідного рівня напруги і знову збільшують в процесі розгону. Практика показала, що достатньо одноразового перемикання обмотки. (В двигунах, де є можливість знижувати потік збудження, наприклад, в ІЕД, це роблять плавно).

У ВЕД є, і інша можливість зменшити ЕРС обмотки якоря - за рахунок регулювання співвідношення активної і намагнічувальної складових потоку магніту шляхом векторного управління, або просторово-векторної модуляції. При реалізації цього способу важливо виключити можливість аварійної ситуації, коли порушується фазовий стан векторів і різко зростає ЕРС, що призводить до виходу з ладу силових ключів інвертора і обмотки якоря. Необхідний контроль дозволяє здійснити швидкодіючий цифровий контролер.

Іноді ВЕД приписують ще один недолік, пов'язаний з наявністю магнітів. При обертанні ротора ВЕД в обмотці якоря наводиться ЕРС. Вона буде наводитися і при буксируванні ТС. Але нічого страшного при справній обмотці якоря в цьому немає. Напруга на її виводах є, а струм відсутній, так як електричний ланцюг розімкнути. Скептики тут же наводять новий аргумент: а якщо є коротке замикання обмотки, наприклад, виткове. Адже тоді буде струм і гальмівний момент, що перешкоджає буксирування. Це говорить про нерозуміння фізики процесів: якщо обмотка несправна, то в місцях замикання вона просто перегорить і не буде струму і гальмівного моменту. Якщо ж замикання сталося поблизу від виводів обмотки, то дійсно виникне режим динамічного гальмування. У таких випадках слід просто використовувати евакуатор. Адже не буксирують ж автомобілі з несправною автоматичною коробкою передач. Але не так просто переконати скептиків. Вони призводять черговий аргумент: нехай немає втрат в якорі і гальмівного моменту від струму в ньому; але ж є втрати в сталі, адже магніт їх створює. Відповідь проста: втрати в сталі на холостому ході ВЕД становлять не більше 3% від номінальної потужності. Чи варто про них говорити, якщо механічне тертя в підшипниках колесі приблизно такого ж рівня.

Таким чином, за габаритними показниками ВЕД переважає інші перераховані типи електродвигунів. Але більш істотно те, що він програє за вартістю як через дорогі магніти, так і з-за складної технології виготовлення. Саме тому, якщо для даного ТЕП маса і габарити не мають першорядного значення, краще відмовитися від використання ВЕД заради зниження вартості.

В асинхронному двигуні на роторі встановлена короткозамкнута обмотка. За принципом дії в АД сполучені трансформатор і електрична машина. При живленні обмотки якоря (первинної обмотки) змінною напругою вона створює обертове електромагнітне поле, яке наводить ЕРС в обмотці ротора (вторинної), якщо ця обмотка не обертається синхронно з полем. Під дією цієї ЕРС в короткозамкненою обмотці ротора протікає струм, взаємодія якого з полем якоря дає крутний момент. Через індукування ЕРС в обмотці ротора двигун називають індукційним. А через те, що ЕРС наводиться тільки при відсутності синхронізму ротора з обертовим полем якоря, двигун називаю асинхронним. Вплив на струм в обмотці ротора можливо тільки по ланцюгу якоря.

Зазвичай для опису процесів в АД використовують електричну схему заміщення. Вона містить 3 контури: первинний контур, наведений до первинного контуру, вторинний контур і контур що намагнічує. Повний струм фази обмотки якоря містить дві складові: ток вторинного контуру і струм що намагнічує.

Втрати потужності в активному опорі обмотки якоря є втратами в міді. Втрати потужності в активному опорі намагнічує контуру є втратами в сталі А потужність, що виділяється в наведеному опорі вторинного контуру, пропорційна створюваному крутним моментом

Неодмінна наявність намагнічувальної складової струму асинхронного двигуна зумовлює знижений в порівнянні з ВЕД ККД. Для її зниження збільшують переріз стали, а отже, габарити і масу АД. За інших рівних умов за габаритами і масі АД поступається тільки ВЕД, але виграє у РД і тим більше у ІЕД.

Особливий інтерес до асинхронного двигуна викликаний наступними причинами:

АД масово випускається майже ціле століття, завдяки чому має низьку ціну.

АД конструктивно простий, і технологія його виготовлення добре освоєна.

За останні 30 років налагоджено масовий випуск перетворювачів частоти (ПЧ), що дозволяють реалізувати будь-які закони частотно-струмового та

векторного керування. Повсюдно використовують високочастотний асинхронний привід і все рідше АТ підключають в промислову мережу з частотою 50 Гц.

АД легко переводиться в режими гальмування противовключенням і рекуперації.

Все це сприяло широкому використанню АД в ТЕП.

Висновки до розділу 1

При виборі, який тип електродвигунів доцільно використовувати в ТЕП електромобіля, треба розуміти що в сучасних умовах, при наявності керованого електронного перетворювача і цифрових засобів управління ним, з точки зору ефективності електромеханічного перетворення енергії, абсолютно не важливо, якого типу електродвигун взяти за основу. Будь-який з них при відповідному законі управління перетворенням енергії забезпечить однакову якість перетворення. Тому при виборі типу електродвигуна потрібно враховувати додаткові вимоги і обмеження.

Зменшення об'єму і маси елементів ТЕП забезпечують наступні можливості:

При тій же масі перевезеного корисного вантажу і при тому ж запасі електроенергії на борту ТЗ збільшується його пробіг;

При тому ж пробігу і тому ж запасі електроенергії можна збільшити масу корисного вантажу, що перевозиться.

За габаритними показниками ВЕД переважає інші типи електродвигунів. Але він програє за вартістю як через дорогі магніти, так і з-за складної технології виготовлення. Якщо для даного ТЕП маса і габарити мають першорядне значення, то використання ВЕД буде найкращим вибором.

2 ПРИНЦИПИ КЕРУВАННЯ СИНХРОННИМ ДВИГУНОМ З ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ

2.1 Векторне керування синхронним двигуном з постійними магнітами

Найбільш поширений клас векторно-керованих електроприводів - це приводи, що мають в своєму складі синхронний двигун з постійними магнітами (СДПМ) на роторі. У порівнянні з асинхронними двигунами, такі двигуни дорожче, але зате мають менші габарити, більший ККД і легше керуються.

Ротор такого двигуна являє собою постійний магніт. Струм обмотки статора створює обертове магнітне поле статора ($\vec{\psi}_s$), магнітні полюси якого притягають протилежні магнітні полюси ротора. Внаслідок цього виникає момент, що обертає ротор слідом за полем статора (рисунок 2.1)

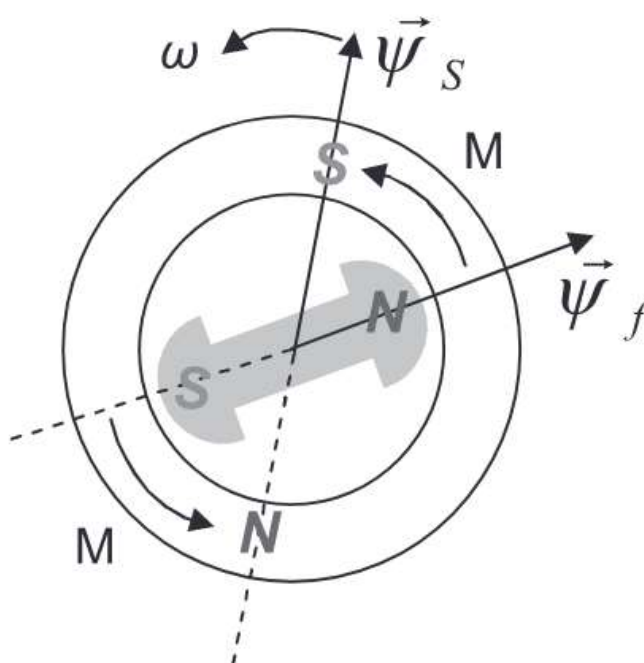


Рисунок 2.1 Модель СДПМ

На рис. 2.2 зображена векторна діаграма, яка пояснює процеси, що відбуваються в двигуні. Будемо розглядати їх в системі dq, вісь d якої орієнтована по осі ротора

Ротор двигуна, який є постійним магнітом, створює потокозчеплення (Ψ_f), що дорівнює добутку потоку ротора на число витків обмотки статора. Направлений вектор цього потокозчеплення по осі ротора (d) від позитивного полюса до негативного.

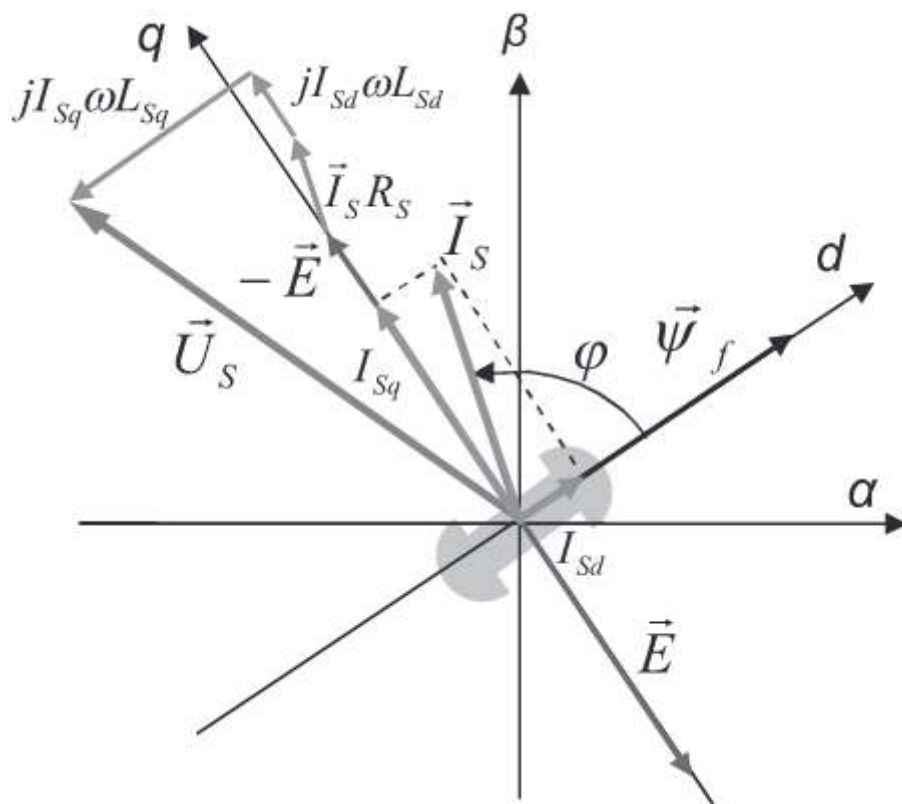


Рисунок 2.2 Векторна діаграма СДПМ

Ψ_f відстає від вектора струму на кут скручування (ϕ). Постійний потік ротора створює в обмотках статора вектор ЕРС (E), спрямований під прямим кутом до потоку і відстає від нього на 90 градусів.

Амплітуда вектора ЕРС визначається виразом:

$$E = \Psi_f \omega$$

Зауважимо, що ω - електрична швидкість обертання, що визначається за формулою:

$$\omega = Z_p \omega_R$$

де: ω_R – швидкість обертання ротора

Z_p – число пар полюсів двигуна

Проаналізувавши рис 2.2 можна записати наступне вираження:

$$\vec{U}_S = -\vec{E} + \vec{I}_S R_s + j\omega(\vec{I}_{sd} L_{sd} + \vec{I}_{sq} L_{sq})$$

де:

$\vec{U}_S$ – вектор напруги статора

R_s – активний опір статора

$\vec{I}_S$ – вектор струму статора, а $\vec{I}_{sd}$ та $\vec{I}_{sq}$ його осьові складові

L_{sd} та L_{sq} індуктивність статора по осям d та q

Вектор статорної напруги врівноважується вектором ЕРС і падінням напруги на активному (R_s) і реактивному (L_{sq} , L_{sd}) опорі-тивлення обмотки статора (рис. 2.2).

Момент двигуна створюється внаслідок взаємодії струму і потокозчеплення статора. З урахуванням фазності і числа пар полюсів двигуна (Z_p) він дорівнює добутку цих векторів.

Для трифазного двигуна можна записати наступний вираз:

$$\vec{M} = \frac{3}{2} Z_p \vec{I}_S \vec{\Psi}_S$$

Отже, для модуля моменту можна записати

$$M = \frac{3}{2} Z_p |\vec{I}_S| |\vec{\Psi}_S| \sin \varepsilon$$

де: ε - кут між векторами.

Або, переходячи до осей dq:

$$M = \frac{3Z_p}{2} (\vec{I}_{sq} \vec{\Psi}_d - \vec{I}_{sd} \vec{\Psi}_q)$$

де: Ψ_q і Ψ_d - потокозчеплення статора по відповідним осях.

У свою чергу, запишемо вираження для цих потокозчеплення:

$$\Psi_d = L_{sd} I_{sd} + \Psi_f$$

$$\Psi_q = L_{sq} I_{sq}$$

З урахуванням цих виразів перепишемо рівняння для моменту в наступному вигляді:

$$M = \frac{3Z_p}{2} (I_{sq} \Psi_f + I_{sd} I_{sq} (L_{sd} L_{sq}))$$

Ротор синхронного двигуна з неявнополюсним ротором влаштований так, що індуктивності статора по осях d і q у нього однакові. Управління саме таким двигуном є типовою, найбільш часто зустрічається завданням. Його векторна діаграма представлена на рис. 2.3.

Так як $L_{sd} = L_{sq}$, вираз для моменту двигуна спрощено і запишеться в наступному вигляді:

$$M = \frac{3Z_p}{2} I_{sq} \Psi_f \quad (2.1)$$

Дивлячись на вираз (2.1), можна констатувати, що при фіксованому потоці магніту-ротора момент залежить тільки від q-складової статорного струму. Тобто d-складова струму являє-ся паразитного, що не створює момент, і викликає тільки додаткові втрати в двигуні. Отже, при регулюванні моменту вектор статорної струму оптимально орієнтувати по осі q. Зазвичай так і роблять.

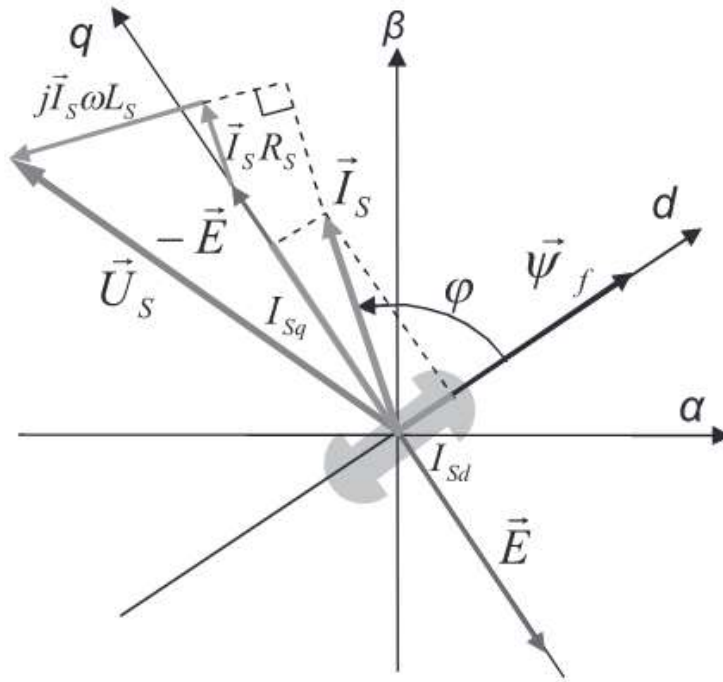


Рисунок 2.3 Векторна діаграма СДПМ з неявнополюсним ротором

Статор синхронного двигуна влаштований так само, як і статор асинхронного двигуна. Якщо знехтувати магнітними втратами, то в нерухомій системі координат рівняння рівноваги статора синхронного двигуна виглядають наступним чином:

$$\begin{cases} U_{s\alpha} = \frac{d\Psi_{s\alpha}}{dt} + I_{s\alpha}R_s \\ U_{s\beta} = \frac{d\Psi_{s\beta}}{dt} + I_{s\beta}R_s \end{cases}$$

Перепишемо ці рівняння в обертовій системі координат dq:

$$\begin{cases} U_{sd} = \frac{d\Psi_{sd}}{dt} + I_{sd}R_s - \omega\Psi_{sq} \\ U_{sq} = \frac{d\Psi_{sq}}{dt} + I_{sq}R_s + \omega\Psi_{sd} \end{cases} \quad (2.2)$$

Природно, при цьому в рівняннях з'являються некомпенсовані складові, пов'язані зі швидкістю обертання системи координат (ω)

Як вже було сказано вище, для управління моментом по мінімуму статорної струму струм статора необхідно направляти по осі q . Тобто кут між ротором і вектором статорної струму треба підтримувати рівним 90 градусів.

Система регулювання будується в координатах dq . Регулювання швидкості здійснюється за допомогою управління моментом двигуна. Якщо струм статора орієнтований по осі q , то він виражається через момент за допомогою співвідношення (2.3), що впливає зі співвідношення (2.1):

$$|\vec{I}_s| = I_{sq} = \frac{2M}{3Z_p\Psi_f} \quad (2.3)$$

Векторний регулятор струму будується під обертається системі координат dq і складається з регуляторів d і q проекцій. За допомогою q -складової струму забезпечується, відповідно до формули (2.3), необхідний момент, а d -складова підтримується рівною нулю, що забезпечує потрібну орієнтацію вектора струму. В якості зворотнього зв'язку регулятор використовує виміряний і перетворений в систему dq реальний вектор статорного струму.

Векторний регулятор струму формує в системі dq вектор на-напруги статора, покликаний забезпечити збіг заданого і реального векторів струму статора. Потім за допомогою координатних перетворень вектор напруги статора перекладається в нерухому систему координат, пов'язану зі статором, де він і реалізується за допомогою ШІМ.

Векторна діаграма двигуна при такому регулюванні наведена на рисунку 1.4

Оскільки:

$$\Psi_{sq} = L_{sq} I_{sq} ; \Psi_{sd} = L_{sd} I_{sd} + \Psi_f$$

рівняння рівноваги статора (2.2) в системі dq можна переписати в наступному вигляді:

$$\begin{cases} U_{sd} = L_{sd} \frac{dI_{sd}}{dt} + I_{sd}R_s - \omega L_{sq}I_{sq} \\ U_{sq} = L_{sq} \frac{dI_{sq}}{dt} + I_{sq}R_s + \omega L_{sd}I_{sd} + \omega\Psi_f \end{cases} \quad (2.4)$$

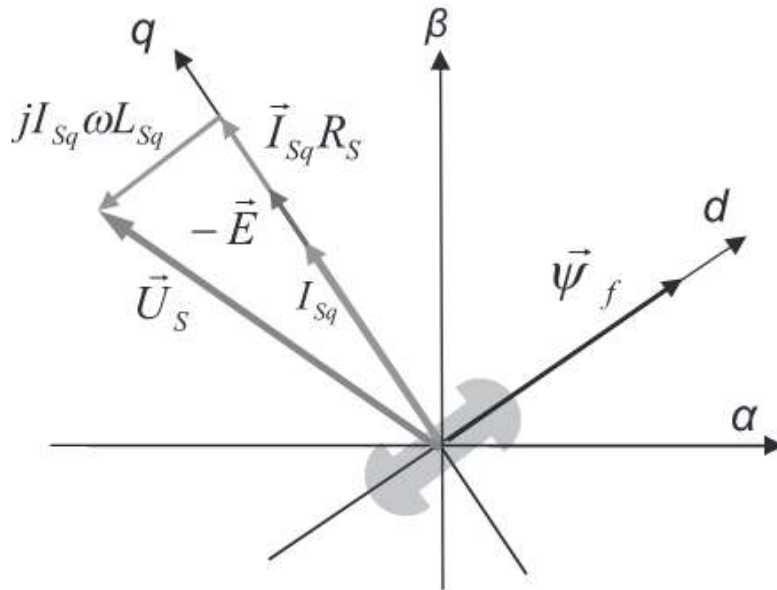


Рисунок 2.4 Векторна діаграма при векторному регулюванні струму

В описаній вище системі регулювання за допомогою U_{sd} регулюється складова I_{sd} , а за допомогою U_{sq} – складова I_{sq} . З рівнянь (2.4) видно, що між каналами регулювання складових статорного струму, так само як і в асинхронному двигуні, існує взаємовплив (перехресні зв'язки). Для виключення взаємовпливу каналів перехресні зв'язки треба компенсувати.

Компенсаційна складова каналу управління I_{sd} :

$$U_{kd} = -\omega L_{sq} I_{sq}$$

Компенсаційна складова каналу управління I_{sq} .

У каналі управління складової I_{sq} , крім складової, яка залежить від I_{sd} , ще присутня складова:

$$\omega \Psi_f = E$$

Її також можна компенсувати. Компенсаційна складова каналу управління складової I_{sq} визначається наступним виразом:

$$U_{kq} = \omega(\Psi_f + L_{sd} I_{sd})$$

В якості струмів для обчислення компенсаційних складових беруться виміряні і перетворені в систему dq сигнали з датчиків струмів фаз. Для виключення (компенсації) перехресних зв'язків компенсаційні складові треба

підсумовувати з одержуваними на виході регуляторів струму складовими векторів статорної напруги.

Очевидно, що з підвищенням частоти амплітуда струму статора обмежується зростанням генерованої ротором ЕРС. Отже, зі зростанням частоти обмежується і гранично досяжний двигуном момент.

Максимально можлива амплітуда вектора статорної напруги завжди обмежена можливостями силового перетворювача. Позначимо її U_{SMAX} .

Спробуємо тепер знайти значення гранично можливого моменту в залежності від частоти. Дивлячись на векторну діаграму на рис. 2.4, для максимальної амплітуди статорної напруги можна записати:

$$U_{SMAX}^2 = I_{Sq}^2 \omega^2 L_{Sq}^2 + (E + I_{Sq} R_S)^2$$

Перетворимо цю запис і одержимо квадратне рівняння щодо струму статора:

$$(\omega^2 L_{Sq}^2 + R_S^2) I_{Sq}^2 + 2ER_S I_{Sq} + E^2 - U_{SMAX}^2 = 0$$

Його коефіцієнти:

$$a = \omega^2 L_{Sq}^2 + R_S^2$$

$$b = 2ER_S$$

$$c = E^2 - U_{SMAX}^2$$

Дискримінант цього рівняння:

$$D = b^2 - 4ac = 4E^2 R_S^2 - 4(\omega^2 L_{Sq}^2 + R_S^2)(E^2 - U_{SMAX}^2)$$

Оскільки з двох можливих рішень нам треба вибрати покладательное, запишемо:

$$I_{Sq} = \frac{-b + \sqrt{D}}{2a} = \frac{-ER_S + \sqrt{E^2 R_S^2 - (\omega^2 L_{Sq}^2 + R_S^2)(E^2 - U_{SMAX}^2)}}{\omega^2 L_{Sq}^2 + R_S^2}$$

Враховуючи що

$$E = \Psi_f \omega ; I_{Sq} = \frac{2M}{3Z_p \Psi_f}$$

перепишемо отримане вираз в наступному вигляді:

$$M_{max} = \frac{3Z_p \Psi_f (-\Psi_f \omega R_S + \sqrt{-\omega^4 L_{Sq}^2 \Psi_f^2 + U_{SMAX}^2 (\omega^2 L_{Sq}^2 + R_S^2)}}{2(\omega^2 L_{Sq}^2 + R_S^2)} \quad (2.5)$$

Це співвідношення дозволяє оцінити рівень обмеження моменту в залежності від частоти обертання ротора при відомих параметрах двигуна і максимальної амплітуди вектора статорної напруги.

Для забезпечення динаміки роботи приводу бажано мати деякий запас по напрузі. Тому рівень обмеження моменту треба робити трохи меншим, порівняно з його значенням, порахованим по співвідношенню 2.5.

Як вже говорилося, для формування вектора статорної напруги зазвичай використовують силові перетворювачі з широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ). Структура і алгоритм роботи ШІМ-перетворювача будуть розглянуті далі. Забігаючи трохи наперед, запишемо формулу для максимальної амплітуди вектора статорної напруги при включенні обмоток двигуна в зірку, в залежності від значення напруги в ланці постійного струму (U_d) силового ШІМ-перетворювача:

$$|\overrightarrow{U_{SMAX}}| = \frac{U_d}{\sqrt{3}}$$

Для ШІМ-перетворювача цю формулу можна використовувати спільно з формулою 2.5

Крім того, момент обмежують на рівні деякого перевантажувального моменту ($M_{ПЕР}$), який вибирається виходячи з необхідної динаміки приводу і допустимого струму (I_{SLIM}) силового перетворювача і двигуна:

$$M_{ПЕР} = \frac{3Z_p}{2} I_{SLIM} \Psi_f \quad (2.6)$$

Якщо порахувати за формулами 2.5 і 2.6 максимальний момент в залежності від частоти, то вийде картинка, зображена на рис. 2.5.

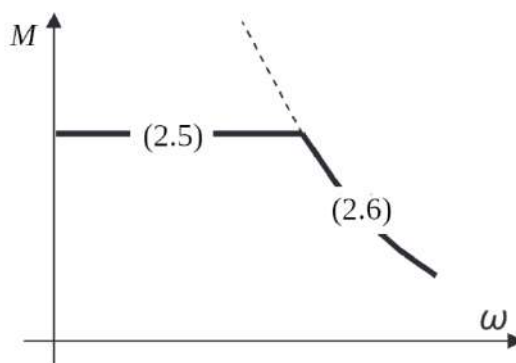


Рисунок 2.5 Залежність моменту від частоти

Реалізація моментообмеження в програмі управління за наведеними вище формулами пов'язана з досить складними обчисленнями. В силу цього дану характеристику легше заздалегідь порахувати і апроксимувати, наприклад, кусочно-лінійно і вже в цьому виді використовувати в програмі управління.

2.2 ШІМ-модуляція і трифазний ШІМ-інвертор

Широтно-імпульсна модуляція (ШІМ) - це спосіб реалізації вектора напруги статора, застосовуваний в переважній більшості систем векторного регулювання.

Апаратно ШІМ реалізується за допомогою трифазного мостового інвертора, схема якого наведена на рисунку 2.6

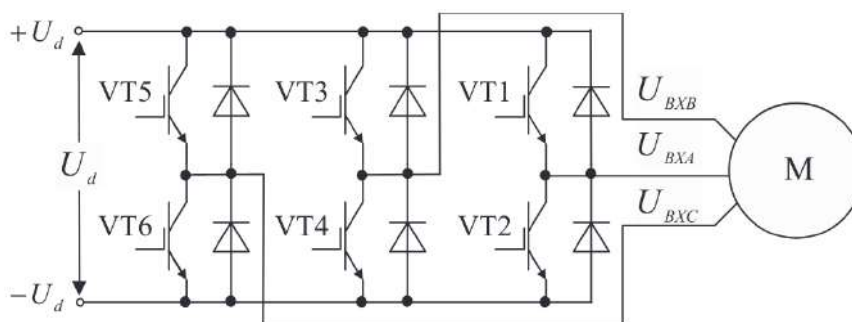


Рисунок 2.6 Трифазний мостовий інвертор

За допомогою цієї схеми вхід будь-який з статорних обмоток двигуна (М) може бути підключений до негативного або позитивного полюса ланки постійного струму (U_d).

Нехай $T_{\text{ШИМ}}$ - період модуляції, тривалість якого набагато менше L / R постійної часу обмотки статора двигуна. Всередині періоду ШІМ формуються дві тривалості:

t_+ - час підключення фазної обмотки статора до $+U_d$;

t_- - час підключення фазної обмотки статора до $-U_d$

Змінюючи співвідношення тривалостей підключення всередині періоду ШІМ, можна змінювати середню напругу, що прикладається до обмотки. Статорні обмотки мають активно-індуктивний характер опору і є фільтрами, що згладжують струм. Середнє значення струму буде залежати від середнього значення прикладеної напруги, тобто від співвідношення тривалостей всередині періоду ШІМ.

Змінюючи t_+ і t_- кожній фазі, можна змінювати середня напруга, що прикладається до обмоток, зокрема, і за синусоїдальним законом, з урахуванням фазових зрушень. Тобто за допомогою ШІМ можливе формування трифазної системи статорних струмів і середніх напруг різної частоти і амплітуди.

Якщо формувати лінійні напруги трифазної системи з напруги ланки постійного струму за допомогою ШІМ за синусоїдальним законом, то їх максимальна амплітуда виходить менше значення напруги в ланці постійного струму. Тобто при перетворенні відбувається недовикористання напруги ланки постійного струму. Це шкідливе явище призводить до втрати моменту двигуна, зазвичай розрахованого на повне напруга в колі, і неоптимальному використанню високовольтних елементів силової схеми. Фахівцям відомі різні прийоми, що дозволяють повністю використовувати напругу ланки постійного струму і уникнути втрати амплітуди при ШІМ-перетворенні. Наприклад, спосіб передмодуляції третьої гармонікою, або векторна ШІМ. Суть всіх способів - додавання до вхідних напруг якогось сигналу з періодом третьої гармоніки формованих лінійних (фазних) напруг.

При цьому лінійні напруги:

збільшують свою амплітуду до 1;

залишаються синусоїдальними і зсунутими на 120 градусів.

Останнім часом найбільш широко використовується векторна ШІМ. Це пов'язано з хорошим опрацюванням алгоритмів її цифрової реалізації.

2.2.1 Векторна ШІМ

При векторній ШІМ реалізація вектора напруги здійснюється за допомогою базових векторів в трифазній системі координат. Кожен базовий вектор характеризується певним станом ключів інвертора, зображеного на рисунку 2.7.

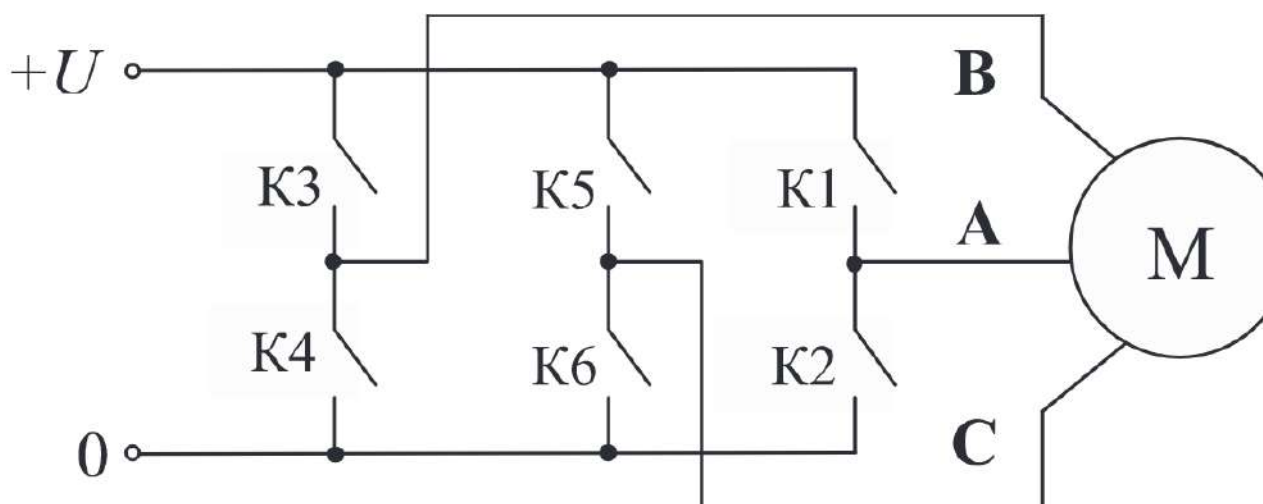


Рисунок 2.7 Стан ключів інвертора

У таблиці 2.1 пояснюється відповідність базових векторів і стану ключів K1-K6.

Для трифазного симетричного системи, якій можна вважати двигун, фазні навантаження рівні, отже, амплітуда всіх ненульових базових векторів становить $2U_d/3$

Обидва нульових вектора V7 (0 +) і V8 (0-), незважаючи на різний стан ключів, забезпечують одночасне прикладення нульових напруг до обмоток статора. Ненульові базові вектори в нерухомій системі координат зображені на рисунку 2.8.

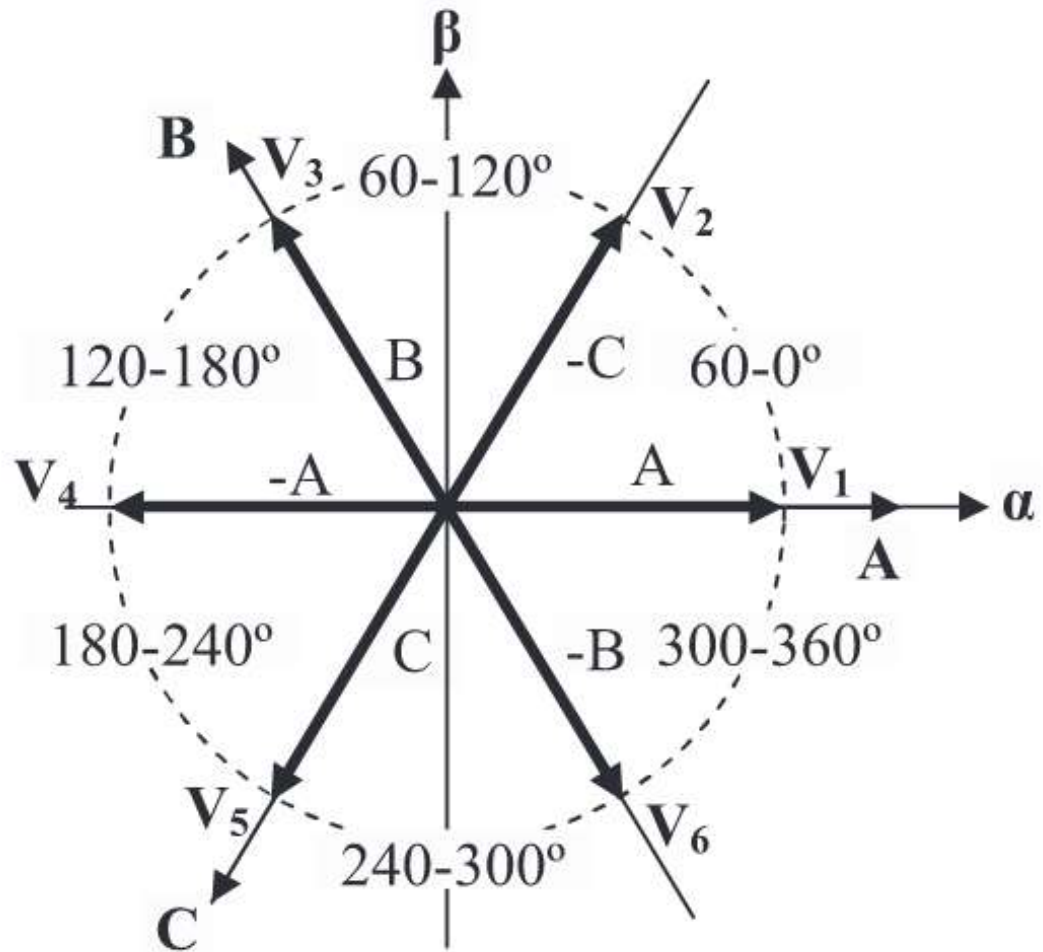


Рисунок 2.8 Ненульові базові вектори

Таблиця 2.1 Відповідність базових векторів і стану ключів

Значення вектору	Стан ключів					
	Фаза А		Фаза В		Фаза С	
	K1	K2	K3	K4	K5	K6
V ₁ (A)	1	0	0	1	0	1
V ₂ (-C)	1	0	1	0	0	1
V ₃ (B)	0	1	1	0	0	1
V ₄ (-A)	0	1	1	0	1	0
V ₅ (C)	0	1	0	1	1	0
V ₆ (-B)	1	0	0	1	1	0
V ₇ (0+)	1	0	1	0	1	0
V ₇ (0-)	0	1	0	1	0	1

Вектор напруги статора можна реалізувати за допомогою формування розрахункових тривалостей базових векторів всередині періоду ШІМ. Набір

використовуваних базових векторів залежить від сектора кута, в якому лежить реалізований вектор (табл. 2.2).

Таблиця 2.2 Відповідність вектора кутовому сектору

Сектор , градуси	Використовувані вектори
0...60	V_1, V_2, V_7, V_8
60...120	V_2, V_3, V_7, V_8
120...180	V_3, V_4, V_7, V_8
180...240	V_4, V_5, V_7, V_8
240...300	V_5, V_6, V_7, V_8
300...360	V_6, V_1, V_7, V_8

Висновки до розділу 2

В данному розділі були розглянуті основні принципи керування вентильним двигуном, а саме синхронним двигуном з постійними магнітами. А саме розглянуто принцип векторного керування ВЕД. Векторне управління є методом управління двигунами, що формує гармонійні струми фаз (як при скалярному управлінні), і забезпечує управлінням магнітним потоком ротора, або, іншими словами, положенням вектора магнітного потоку в просторі. Векторне управління трифазним двигуном дозволяє керувати ним аналогічно управлінню двигуном постійного струму.

В даному розділі розглянуто основні моменти про систему координат використовуваних при векторному керуванні

3 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ

У цьому розділі показані шляхи пошуку необхідних елементів схеми електроприводу, що дозволяє без великих втрат часу отримати необхідні характеристики. Загальна схема моделі приведена на рис. 3.1.

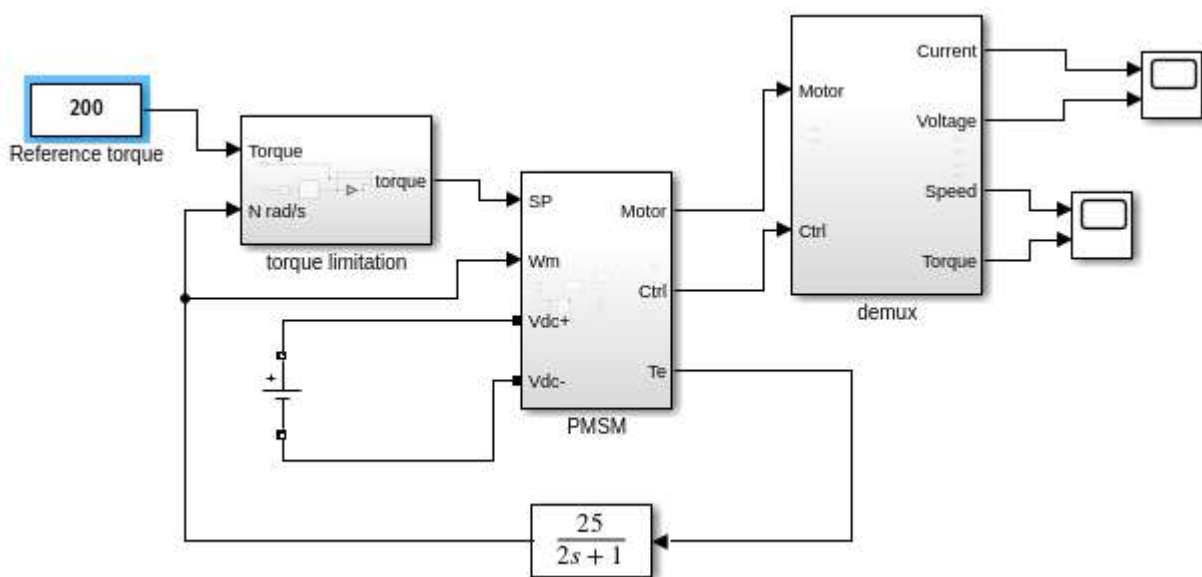


Рисунок 3.1 Загальний вид моделі

Початковий крутний момент двигуна (Reference Torque) задається блоком Constant з розділу Sources бібліотеки Simulink. Для обмеження моменту в блоці Torque limitation (блок Subsystem з розділу Simulink / Ports & Subsystems) зібрана схема, що наведена на рисунку 3.2.

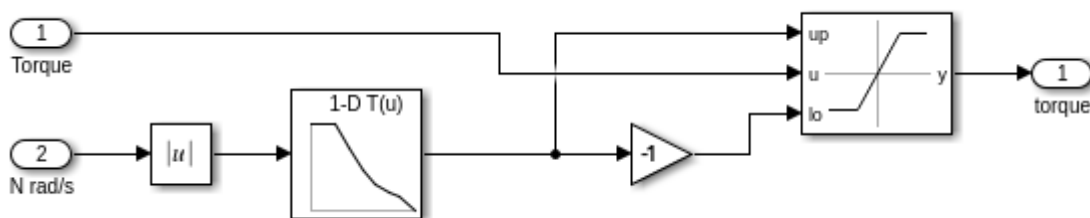


Рисунок 3.2 Блок Torque limitation

Блок Abs знаходиться в розділі Simulink / Math Operations, блок Saturation Dynamic - в розділі Simulink / Discontinuities. Параметри блоку 1-D Lookup Table (Simulink / Lookup Tables) дані на рис. 3.3.

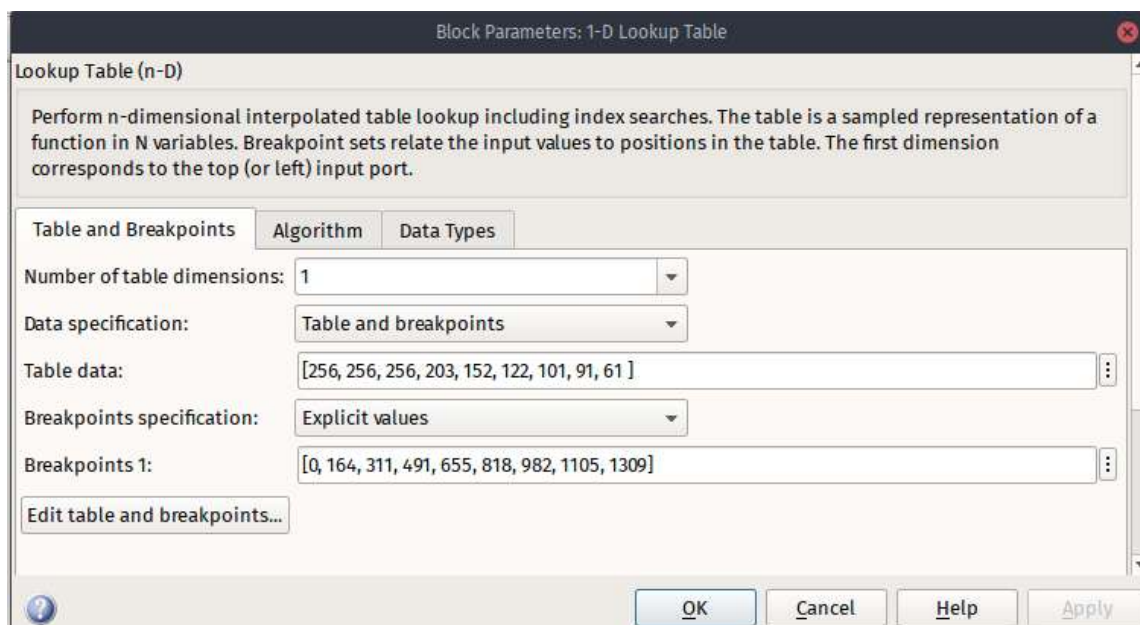


Рисунок 3.3 Параметри блоку 1-D Lookup

Джерело постійної напруги (DC Voltage Source) знаходиться в розділі Electrical Sources бібліотеки SimPowerSystems (Simscape), як показано на рис. 3.4. У цьому блоці слід задати напругу 288 В.

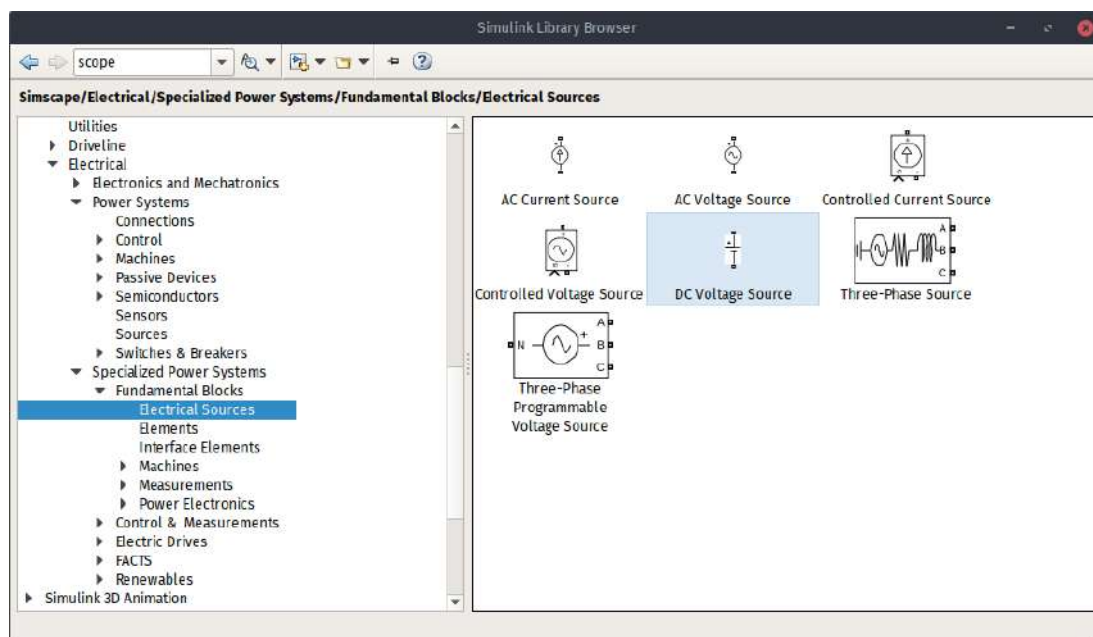


Рисунок 3.4 Місцезнаходження елемента джерела постійної напруги

Параметри блоку Transfer Fcn з розділу Simulink / Continuous показані на рис. 3.5. Для того щоб отримати в знаменнику вираз виду $2s + 1$, необхідно в поле Denominator coefficients в квадратних дужках записати числа 2 і 1 через пробіл .

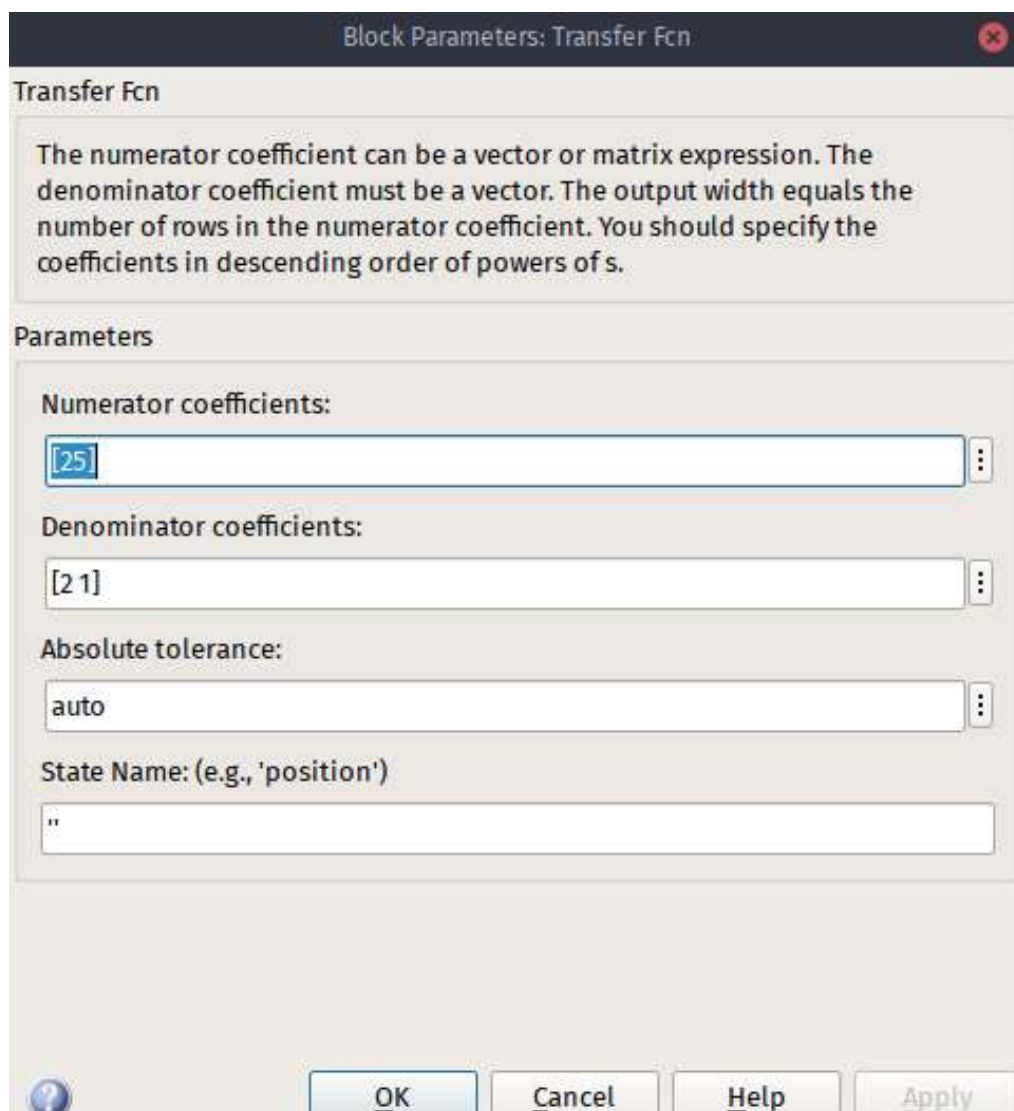


Рисунок 3.5 Параметри блоку Transfer Fcn

Детально розглянемо блок електроприводу PMSM, структура якого наведена на рис. 3.6. Він включає в себе регулятор швидкості (Speed Controller), блок векторного управління (VECT controller), трифазний інвертор напруги (Three-phase Inverter) і синхронний двигун з постійними магнітами (Permanent Magnet Synchronous Machine).

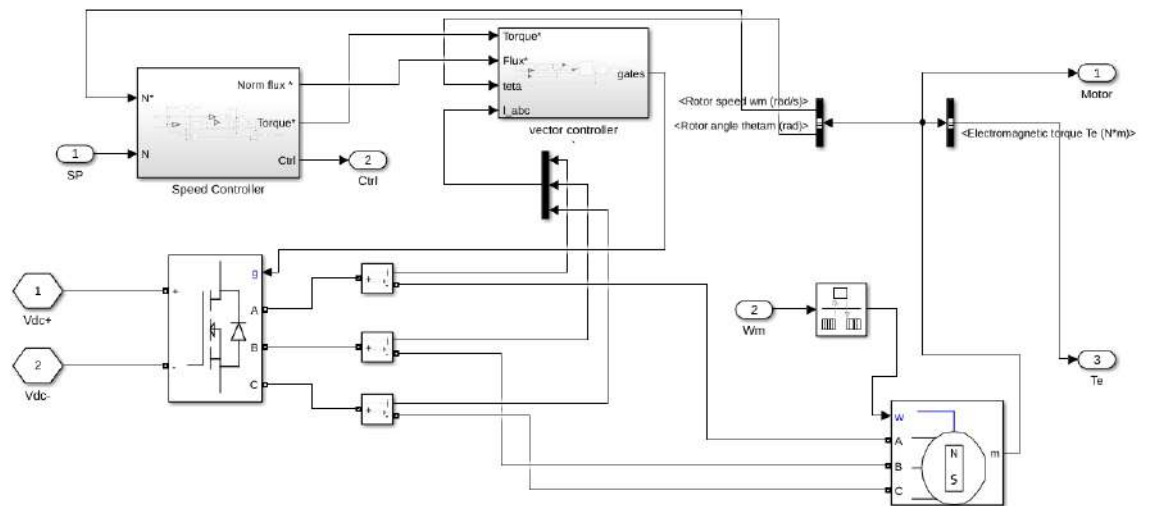


Рисунок 3.6 Загальний вид блоку PMSM

Блоки Current Measurement знаходяться в розділі Measurements бібліотеки SimPowerSystems, порти підключення Vdc + і Vdc - (блоки Connection Port) - в розділі Elements. Блоки Mux і Bus Selector - в розділі Simulink / Signal Routing, блок Rate Transition - в Simulink / Signal Attributes.

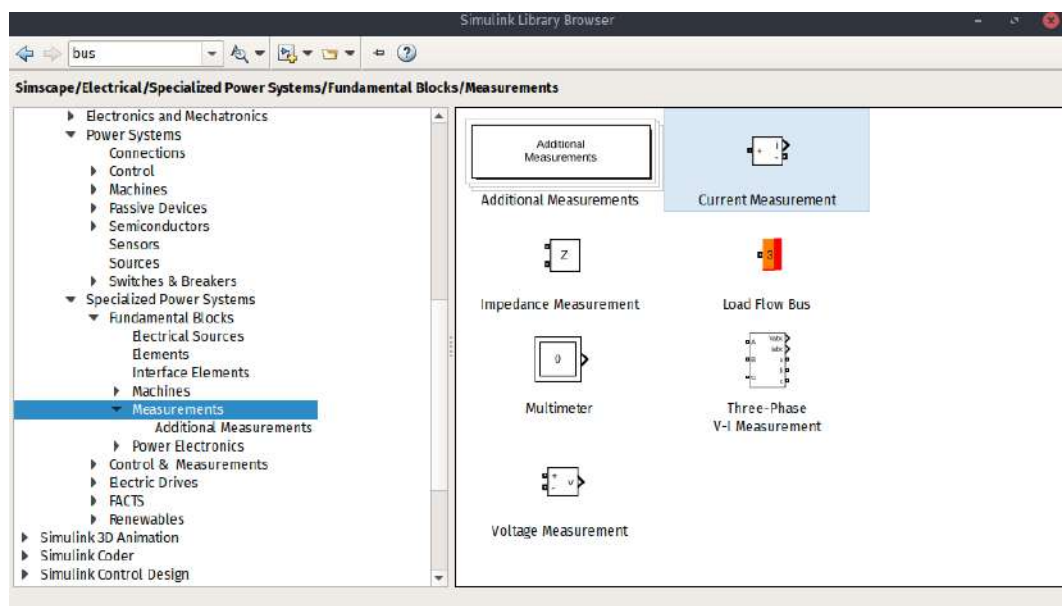


Рисунок 3.7 Місцезнаходження елемента Current Measurement

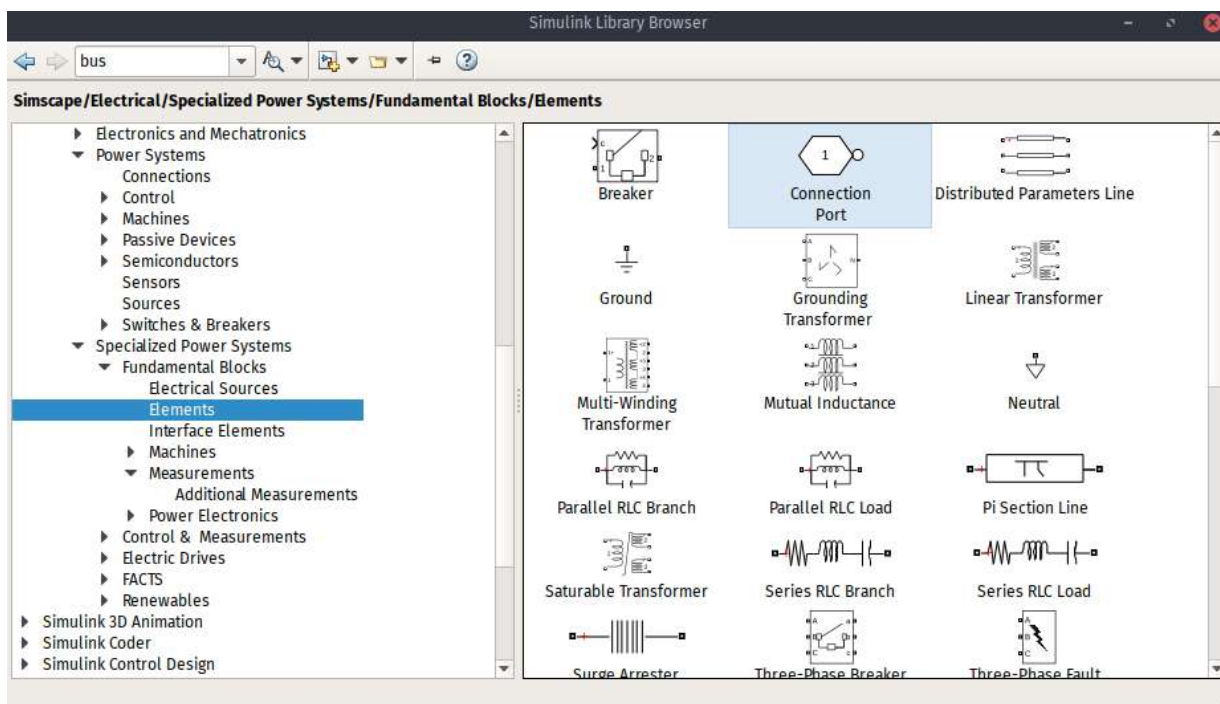


Рисунок 3.8 Місцезнаходження елемента Connection Port

У блоці Rate Transition в параметрі Output port sample time записати значення Ts.

2.2 Блок регулятора швидкості (Speed Controller)

Модель регулятора швидкості наведена на рис. 3.9. Всі елементи на рис. 3.9 знаходяться в наступних розділах бібліотеки Simulink:

Discontinuities: блоки Rate Limiter;

Discrete: блоки Zero-Order Hold, Discrete-Time Integrator, елемент Low pass filter (блок Discrete TransferFcn);

Lookup Tables: блок 1-D Lookup Table;

Math Operations:

блок Gain (блоки зі значеннями $30 / p_i$, k_i і k_p);

Signal Attributes: блоки IC і Rate Transition;

Signal Routing: блоки Multipoint Switch і Bus creator;

Sources: блок Constant (блоки зі значеннями SwK і 0).

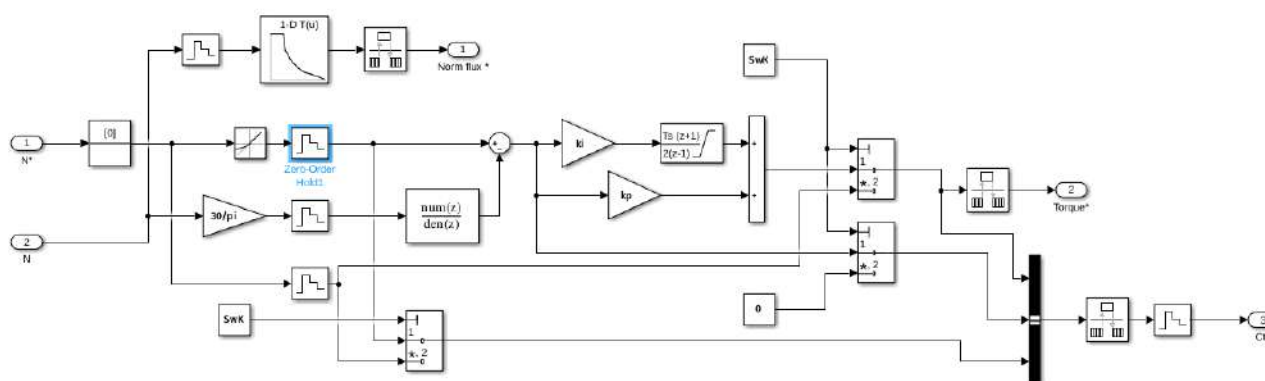


Рисунок 3.9 Загальний вид блоку Speed Controller

Параметри елементів регулятора швидкості наведені в табл. 3.1 і на рис. 3.10, 3.11, 3.12.

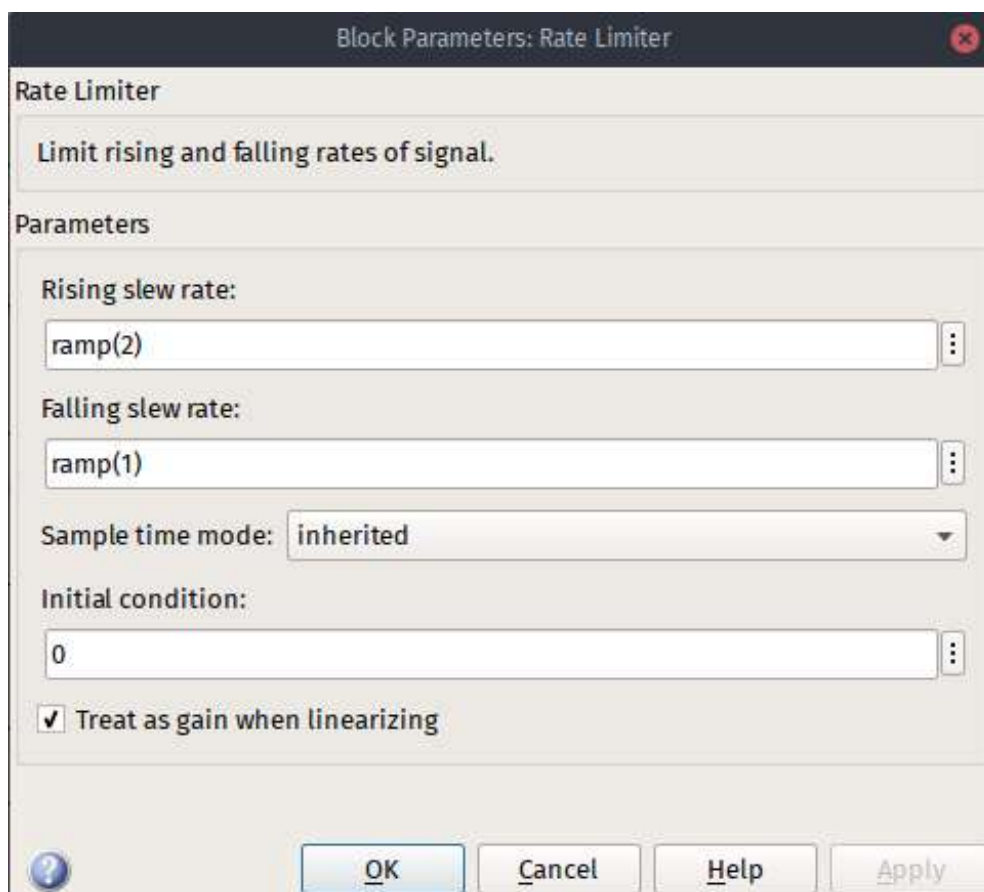


Рисунок 3.10 Параметри елемента 1-D Lookup Table

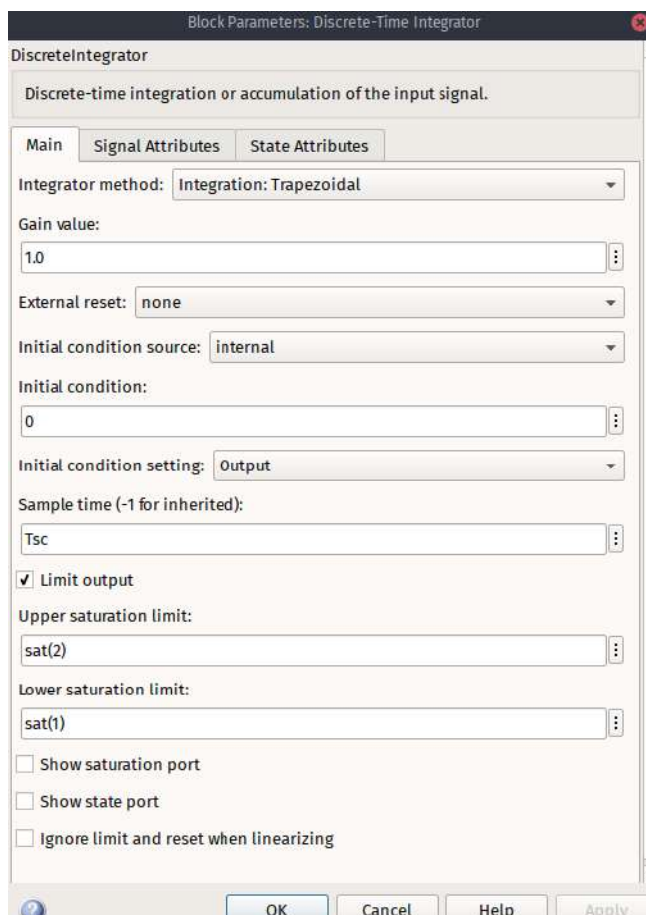


Рисунок 3.11 Параметры элемента Discrete-Time Integrator

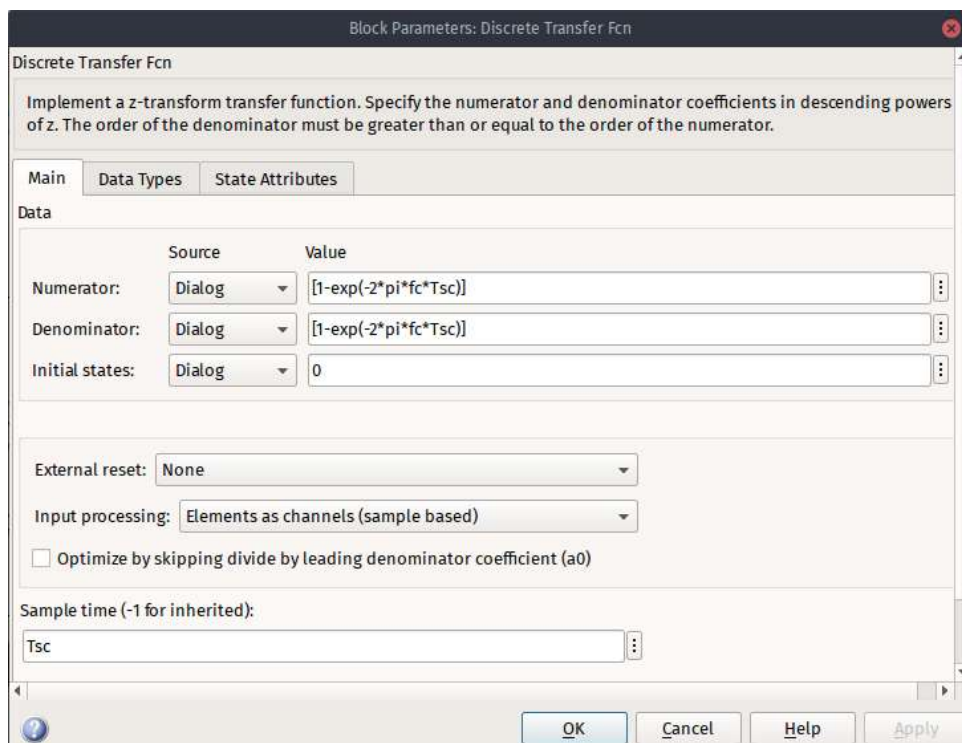


Рисунок 3.12 Параметры элемента Discrete Transfer Fcn

Таблиця 3.1 Параметри елементів блоку

Елемент	Параметр	Значення
IC	Initial value	0
Rad2rpm	Gain	30/pi
Zero-Order Hold 1, 2, 3, 4	Sample time	Tsc
Zero-Order Hold 5	Sample time	Ts
Integral gain	Gain	Ki
Proportional gain	Gain	Kp

3.2 Блок векторного управління (vector controller).

Структура моделі векторного управління представлена на рис. 3.13.

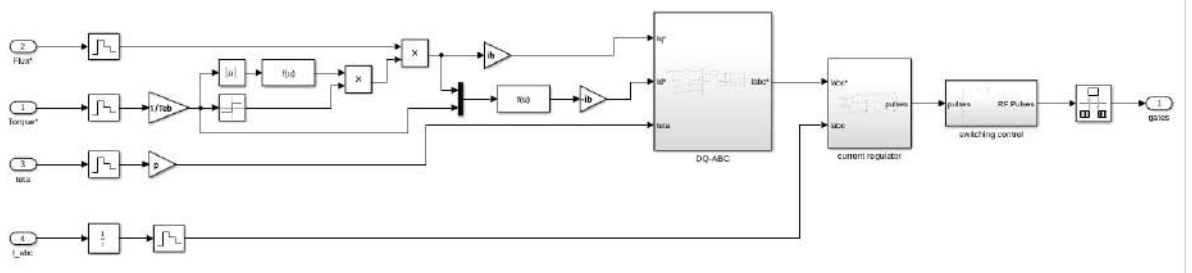


Рисунок 3.13 Загальна структура блоку vector controller

У блоках Zero-Order Hold необхідно задати значення параметра Sample time: Ts_vect. У блоці Unit Delay (розділ Simulink / Discrete) встановити такі параметри:

Initial condition: 0;

Input processing: Inherited;

Sample time: -1.

Блок Sign знаходиться в розділі Math Operations бібліотеки Simulink. У блоках Fcn 1 і 2 (розділ Simulink / User-Defined Functions) потрібно записати вирази:

блок Fcn 1: $(\sqrt{4 * 0.5 * u(1) + 1} - 1) / (2 * 0.5);$

блок Fcn 2: $(1 - u(2)) / (u(1) + 1e-6).$

Параметри блоку Rate Transition зображені на рис. 3.14.

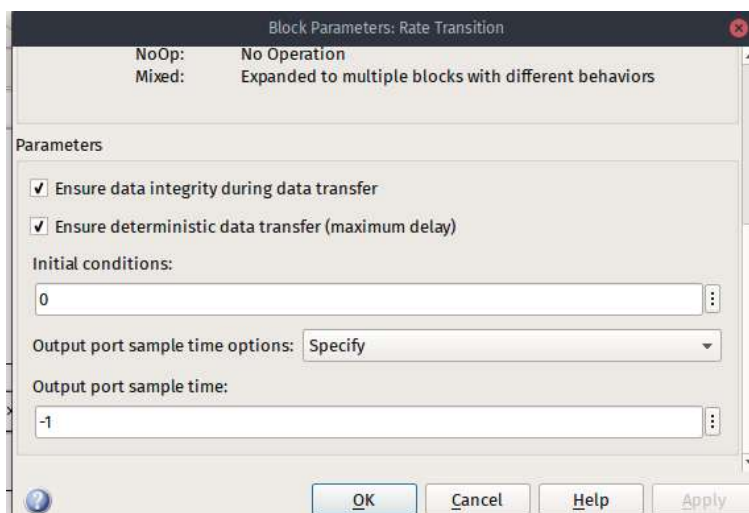


Рисунок 3.14 Параметри елемента Rate Transition

Схема перетворювача координат показана на рис. 3.15. Регулятор струму (current regulator) представлений на рис. 3.16.

У блокахFcn 3, 4, 5 і 6 записати вирази:

блок Fcn 3: $\cos(u)$;

блок Fcn 4: $\sin(u)$;

блок Fcn 5: $-u[3] * u[2] + u[4] * u[1]$;

блок Fcn 6: $(-u[1] + 1.7320508 * u[2]) * u[4] * 0.5 + (u[2] + 1.7320508 * u[1]) * u[3] * 0.5$.

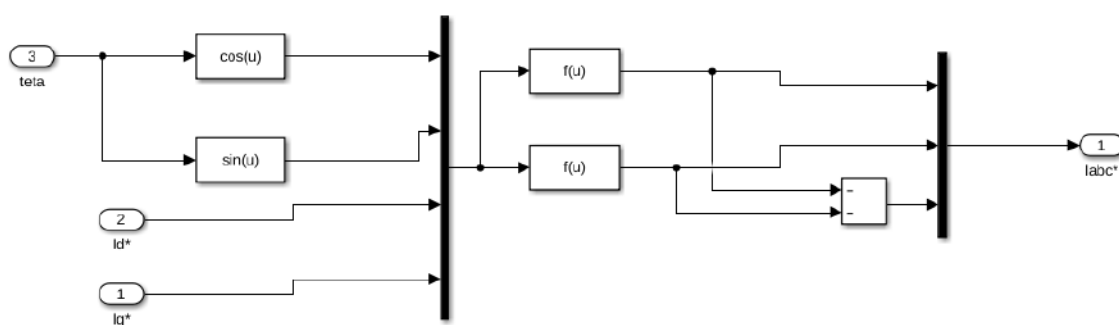


Рисунок 3.15 Загальна схема блоку DQ-ABC

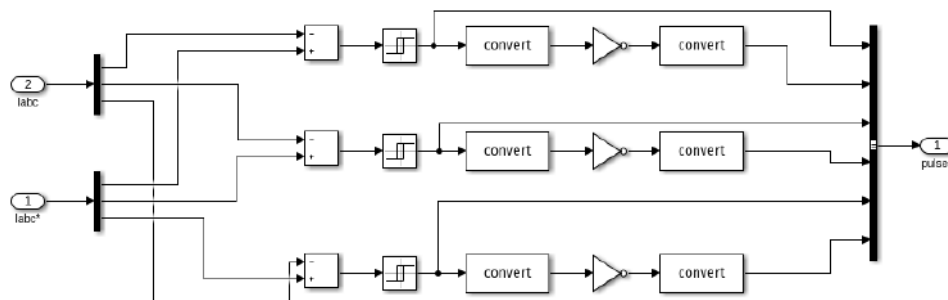


Рисунок 3.16 Загальний вид блоку current regulator

Параметри елементів Relay (розділ Simulink / Discontinuities) і Data Type Conversion (Simulink / Signal Attributes) дані на рис. 3.17 та 3.18.

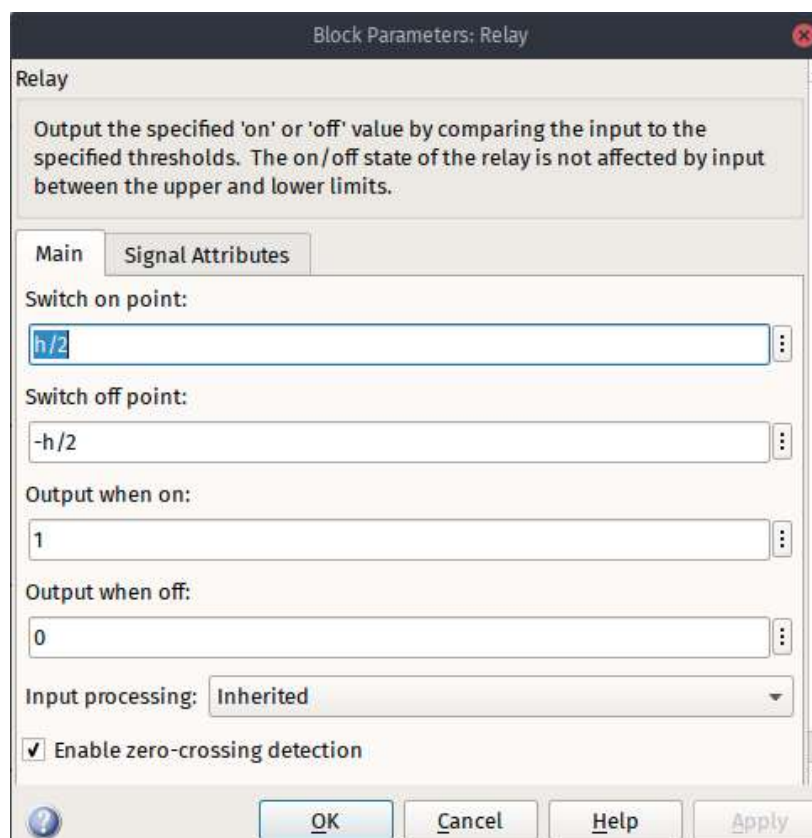


Рисунок 3.17 Параметри елемента Relay

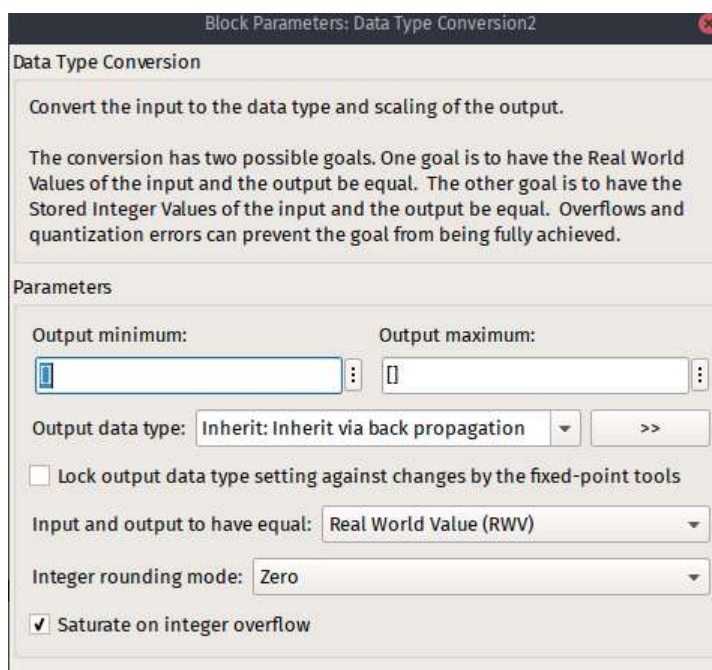


Рисунок 3.18 Параметри елементу Data Type Conversion

Логічним операторам NOT (Simulink / Logic and Bit Operations) в рядку Output data type слід встановити параметр Inherit: Logical.

Блок switching control представлений на рис. 3.19.

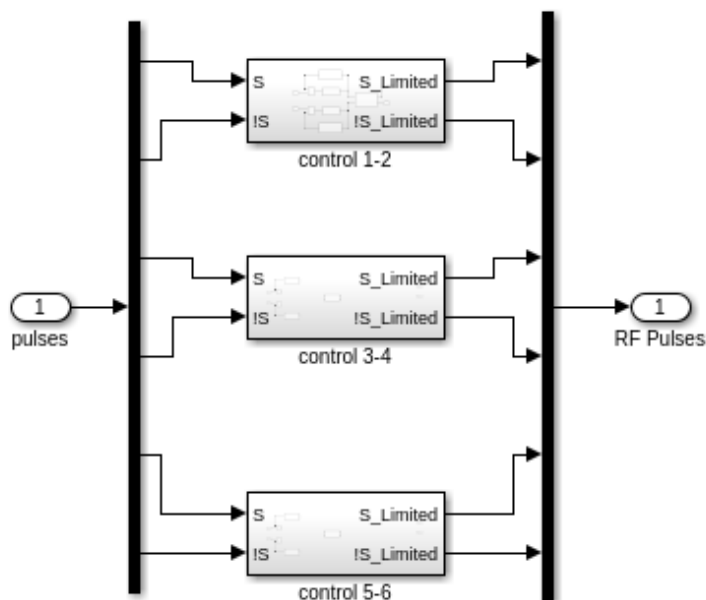


Рисунок 3.19 Загальний вид блоку switching control

Блоки control 1-2, 3-4 і 5-6 мають однакову структуру, наведену на рис. 3.20

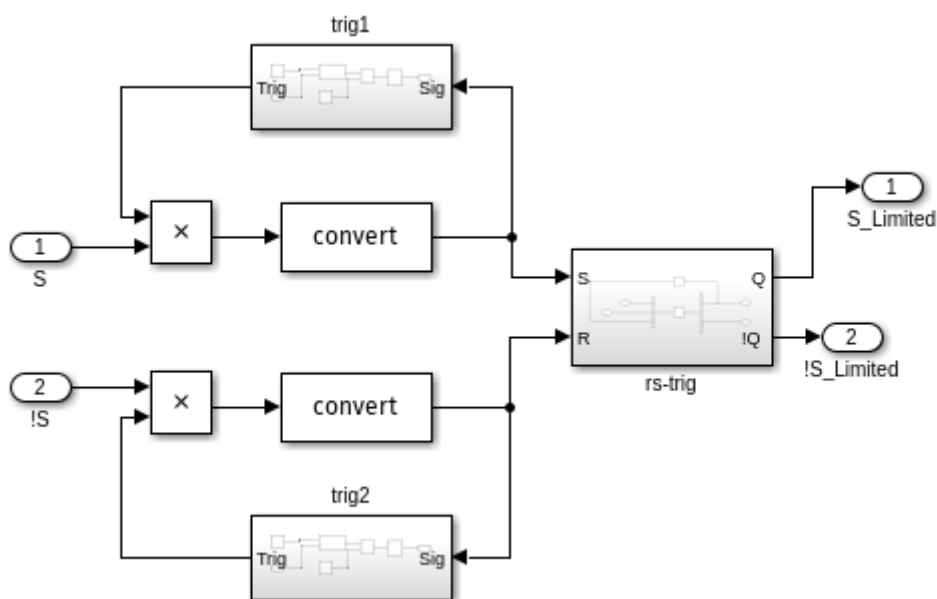


Рисунок 3.20 Структура блоку control

. Модель RS-тригера (rs-trig) представлена на рис. 3.21. Структура блоків trig 1 і 2 показана на рис. 3.22.

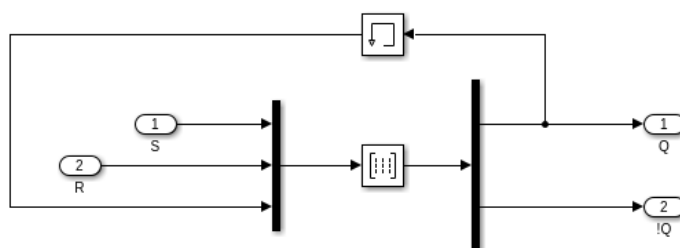


Рисунок 3.21 Структура блоку rs-trig

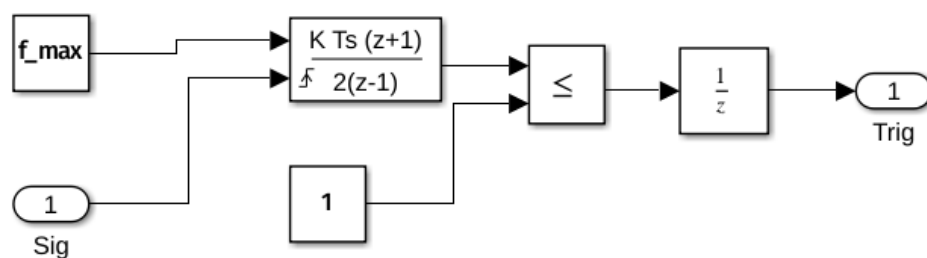


Рисунок 3.22 Структура блоку trig

У блоці Memory (розділ Simulink / Discrete) задати параметр Initial condition: Q і відзначити галочкою пункт Inherit sample time. У блоці

Combinatorial Logic (Simulink / Logic and Bit Operations) задати параметр Truth table: [0 1; 1 0; 0 1; 0 1; 1 0; 1 0; 0 0; 0 0].

Параметри блоків Discrete-Time Integrator і Unit Delay дані на рис. 3.23 та 3.24.

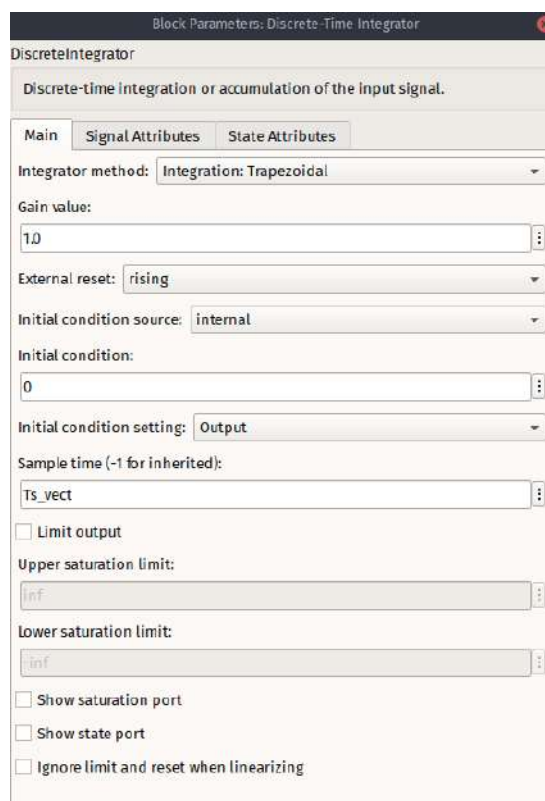


Рисунок 3.23 Параметри блока Discrete-Time Integrator

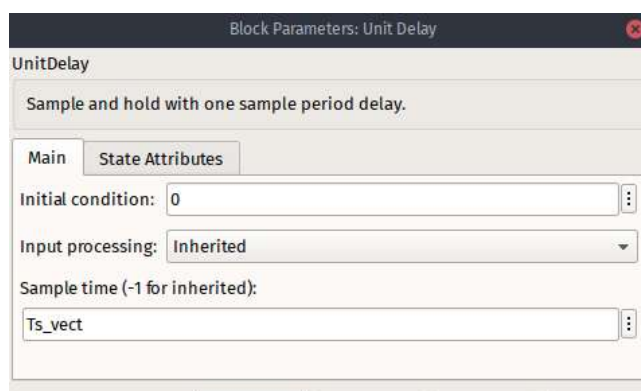


Рисунок 3.24 Параметри блока Unit Delay

3.3 Блоки трифазного інвертора напруги та двигуна.

Трифазний інвертор напруги (Three-phase Inverter) представлений блоком Universal Bridge з розділу Power Electronics бібліотеки SimPowerSystems. Параметри інвертора дані на рис. 3.25.

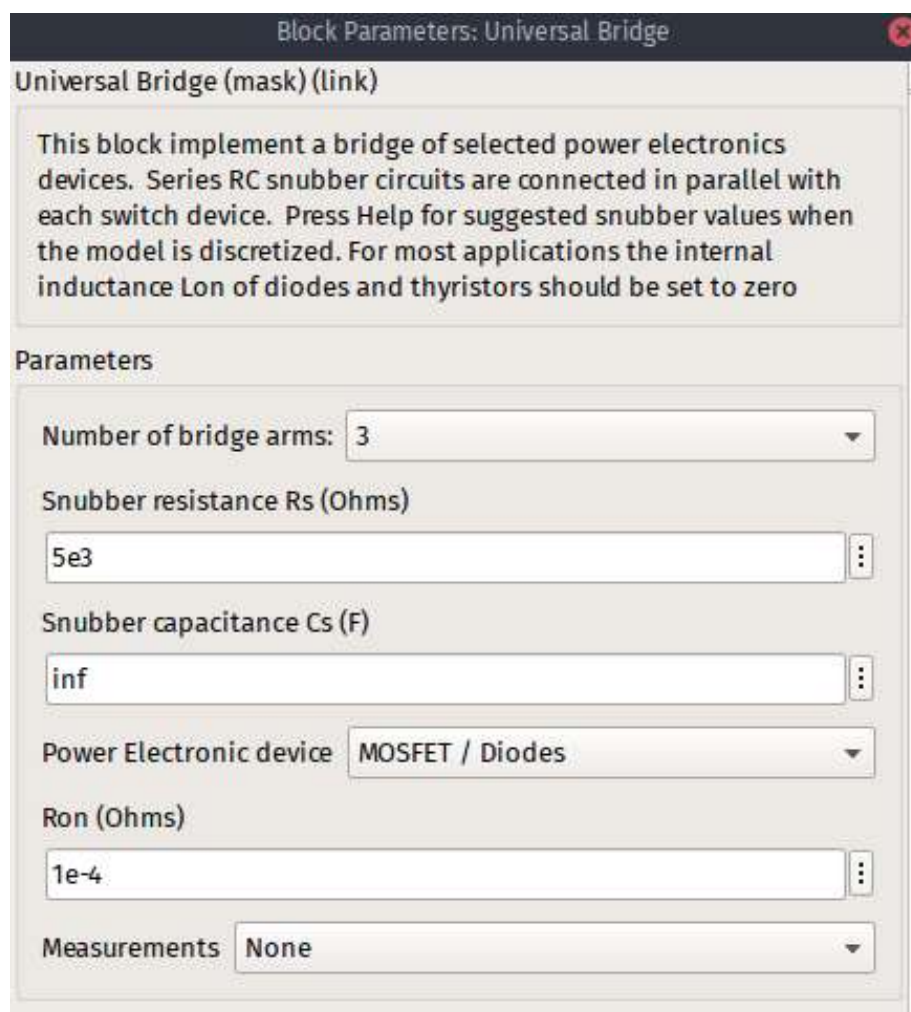


Рисунок 3.25 Параметри інвертора

Синхронний двигун із постійними магнітами представлений блоком Permanent Magnet Synchronous Machine з розділу Machines бібліотеки SimPowerSystems. Параметри двигуна дані на рис. 3.26 та 3.27.

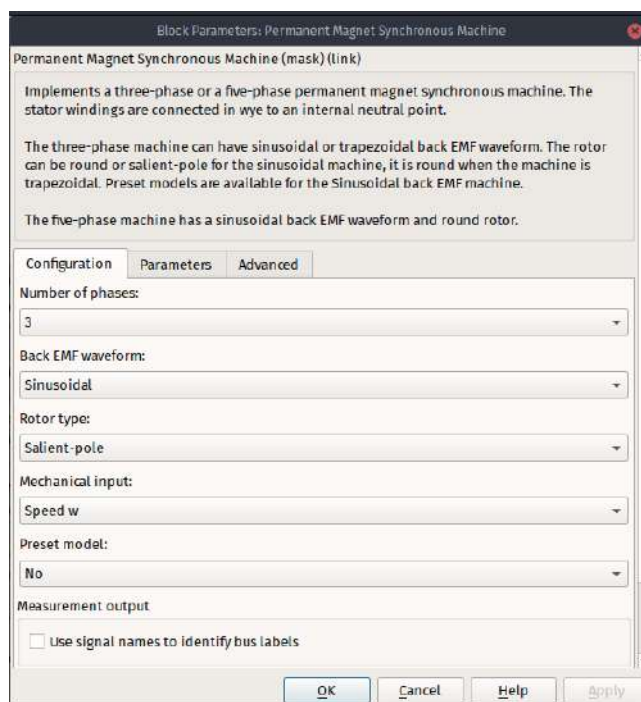


Рисунок 3.26 Основні параметри синхронного двигуна,

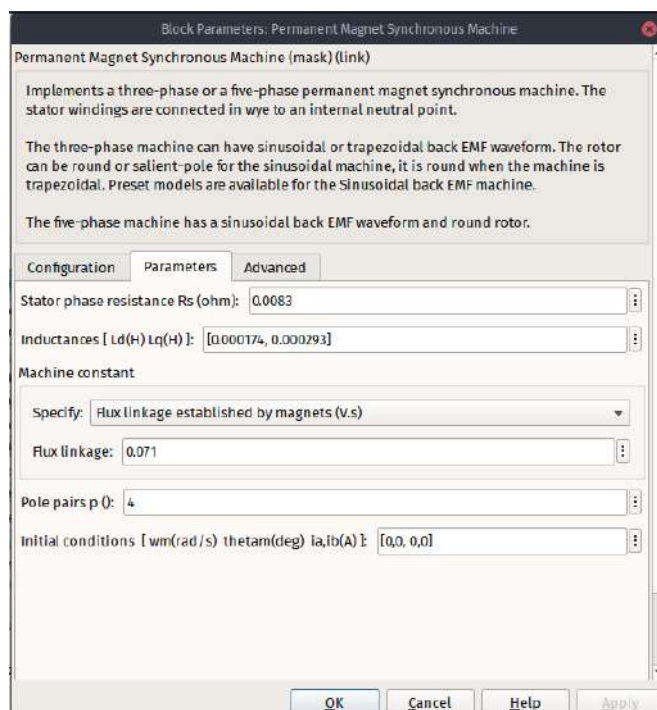


Рисунок 3.27 Параметри синхронного двигуна

Сигнали з блоку PM Synchronous Motor Drive надходять в блок demux, який представлений на рис. 3.28.

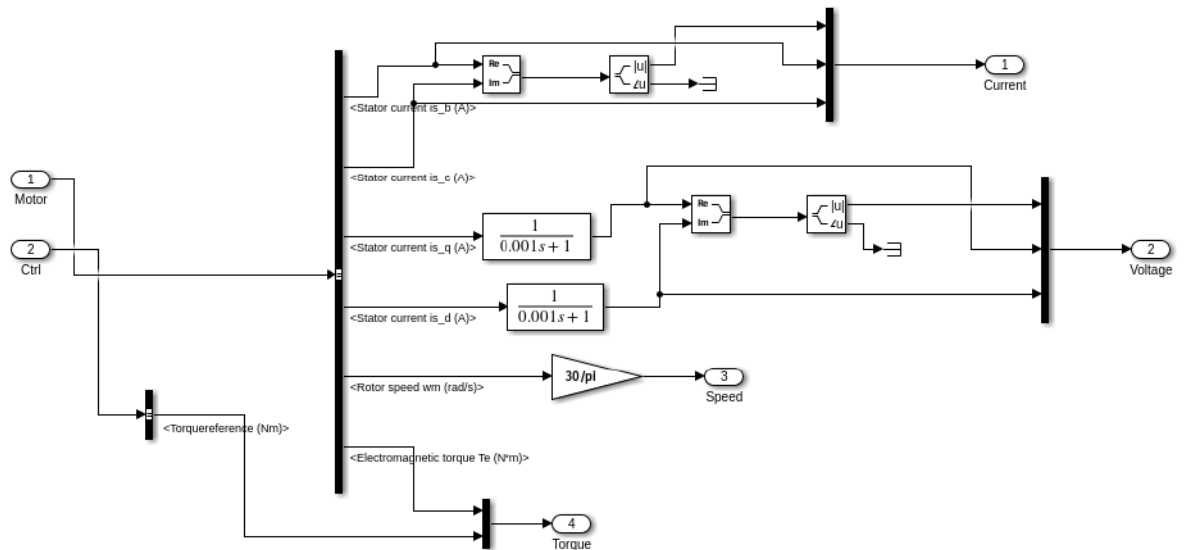


Рисунок 3.28 Загальна схема блоку demux

Шинні селектори (Bus Selector) дозволяють вивести характеристики синхронного двигуна на осцилографи Scope. Для цього в блоці Bus Selector необхідно зі списку сигналів (Signals in the bus) вибрати статорні струми (Stator current is_q і is_d), напруги статорних обмоток (Stator voltage Vs_q і Vs_d), швидкість обертання ротора (Rotor speed wm) і електромагнітний момент (Electromagnetic torque Te), після чого додати їх до списку обраного (Selected signals) кнопкою Select (рис. 3.29).

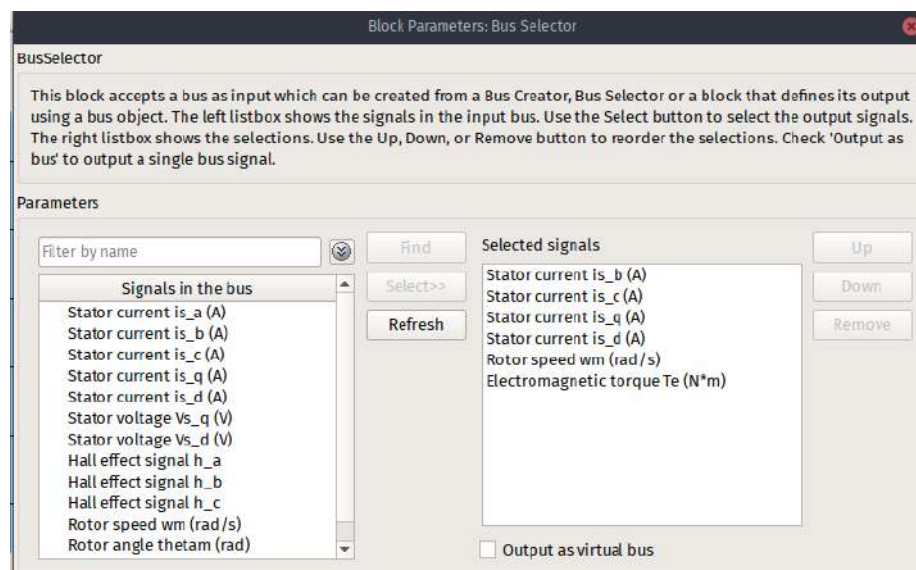


Рисунок 3.29 Параметри елемента Bus Selector

Аналогічно в Bus Selector 2 вибрати Torque reference. Блоки Real-Imag to Complex і Complex to Magnitude-Angle розташовані в розділі Math Operations бібліотеки Simulink, блок Terminator - в розділі Sinks.

Для роботи моделі потрібно додати блок Powergui (розділ Fundamental Blocks бібліотеки SimPowerSystems), параметри якого наведені на рис. 3.30.

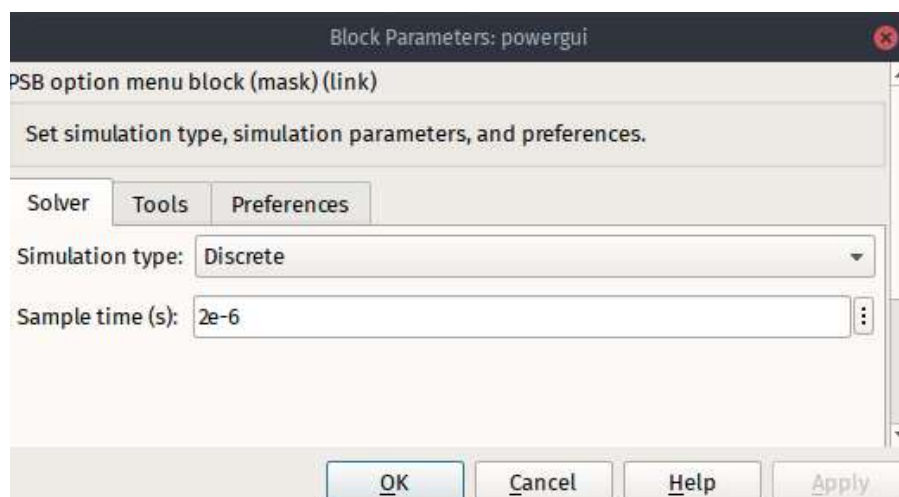


Рисунок 3.30 Параметри powergui

Розрахунок коефіцієнтів виконуємо в matlab script що наведений у Додатку А

Результати моделювання електропривода на базі синхронного двигуна з постійними магнітами приведені на рис. 3.31.

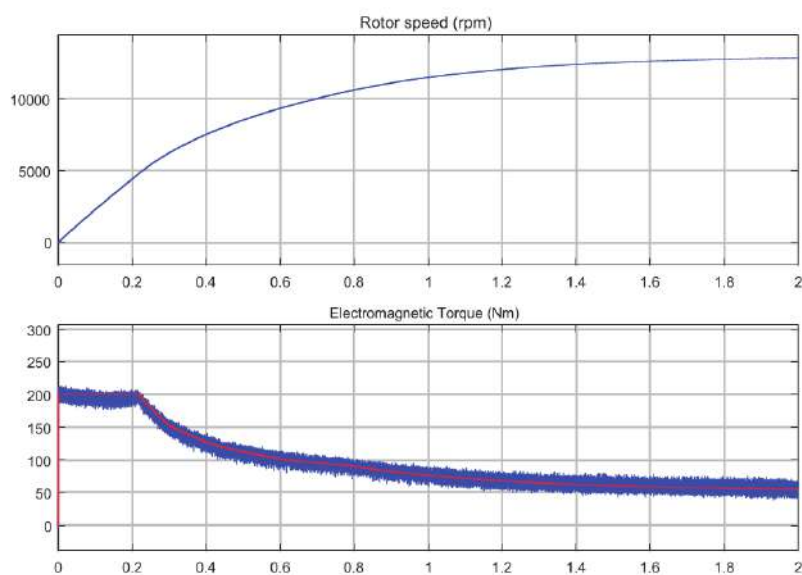


Рисунок 3.31 Результати моделювання електроприводу

Висновки до розділу 3

В цьому розділі була проведена робота по створенню імітаційної моделі системи управління електроприводу електромобіля з використання синхронного двигуна з постійними магнітами. Моделювання виконувалось в програмі Matlab з використанням пакету Simulink та набору бібліотек SimPowerSystems.

В результаті роботи була створена модель системи керування електроприводом та були отримані результати роботи системи у вигляді графіків .

4 РЕАЛІЗАЦІЯ МІКРОПРОЦЕСОРНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ

4.1 Вибір мікроконтролера

З моменту появи першого мікропроцесора в 1971р. бурхливо розвивається область цифрової керуючої електроніки, що відноситься до вбудованих мікропроцесорних систем управління реального часу. За останні двадцять років відбулися якісні зміни в структурі електроприводу, пов'язані в першу чергу з переходом на нову елементарну базу побудови силового каналу (IGBT-транзистори, інтелектуальні силові модулі IPM) і нову елементну базу каналу управління - високопродуктивні мікроконтролерні системи прямого цифрового управління обладнанням. Мова йде не тільки про пряме управління ключами силових перетворювачів, а й про пряме сполучення з широкою номенклатурою датчиків зворотних зв'язків (положення, швидкості, прискорення), а також з елементами дискретної автоматики (релейно-контакторною апаратурою, дискретними датчиками і дискретними виконавчими пристроями). Область управління двигунами і силовими перетворювачами стала яскравим прикладом швидкої адаптації процесорної техніки до завдань предметної області.

Функції прямого цифрового управління в сучасних приводах реалізуються за рахунок використання спеціалізованих периферійних пристроїв, інтегрованих безпосередньо на кристал мікроконтролера (МК) і не потребують додаткових засобів сполучення, а також за рахунок високопродуктивної архітектури та системи команд центрального процесора, що дозволяє вирішувати більшість типових завдань управління двигунами програмним способом.

Перехід до цифрових систем управління приводами на базі спеціалізованих мікроконтролерів (МК) дозволив забезпечити новий, недосяжний в аналогових системах, рівень показників якості:

на порядок менші габарити і вага керуючої електроніки
 різке підвищення надійності і терміну служби приводу
 швидку і якісну інтеграцію приводу за допомогою уніфікованих
 інтерфейсів (RS-232, RS-485, CAN)
 місцеве і дистанційне керування
 уніфікацію вбудованих засобів управління приводами незалежно від типу
 двигуна, структури силового каналу, типів використовуваних датчиків зворотніх
 зв'язків;

Дослідивши ринок мікроконтролерів був зроблений вибір на користь
 продукції європейської компанії STMicroelectronics, а саме МК сімейства stm32.
 Причин такого вибору є декілька:

реалізація ядра на базі архітектур arm
 дуже висока популярність в Україні та світі
 висока доступність на ринку
 невисока ціна на пристрої налагодження
 великий обсяг документації та навчальних матеріалів як від виробника так
 і користувачів.

В своїх матеріалах STMicroelectronics рекомендує для систем керування
 електроприводом використовувати мікроконтролери що позиціонуються як
 motor controller. Сімейство stm32 включає в себе велику кількість (таблиця 4.1)
 серій, що мають різний набір периферійних пристроїв, що відповідають різним
 вимогам алгоритмів керування двигуном.

Серед запропонованих варіантів виберемо МК С. Мікроконтролер включає
 в себе 32-бітне ядро RISC ARM Cortex-M4, що працює на частоті до 72 МГц та
 має вбудований математичний співпроцесор, високошвидкісну флеш-пам'ять
 об'ємом до 64 КБайт, та ОЗУ до 12 Кбайт.

МК STM32F334R8T6 має в своєму складі багату периферію (рис. 4.1), а
 саме: два швидких 12-бітних аналого-цифрових перетворювачів(АЦП),
 годинних реального часу, три надшвидких компараторів, операційний
 підсилювач, один high-res, 32-бітний таймер загального призначення, чотири 16-

бітних таймерів загального призначення, один motor control таймер. Набір інтерфейсів зв'язу стандартний для МК такого класу: 1х(I2C),1х(SPI), до трьох USART та один CAN

Таблиця 4.1 – Перелік серій та основні характеристики МК сімейства STM32

Серія STM32	Ядро ARM	Тактова частота	Об'єм ПЗУ
STM32G0xx	Cortex-M0+	64МГц	16КБ-512КБ
STM32F334	Cortex-M4 (FPU)	72МГц	16КБ-64КБ
STM32F302	Cortex-M4 (DSP/FPU)	72МГц	32КБ-512КБ
STM32F301	Cortex-M4 (DSP/FPU)	72МГц	16КБ-64КБ
STM32G431	Cortex-M4 (DSP/FPU)	170МГц	32КБ-128КБ
STM32G473	Cortex-M4 (DSP/FPU)	170МГц	32КБ-128КБ
STM32F4xx	Cortex-M4 (DSP/FPU)	180МГц	256КБ-512КБ
STM32F7xx	Cortex-M7	216МГц	64КБ-2048КБ

STM32F334R8T6 працює в температурному діапазоні від -40 до +85 градусів Цельсій, напруга живлення знаходиться в діапазоні від 2,0 до 3,6 вольт.

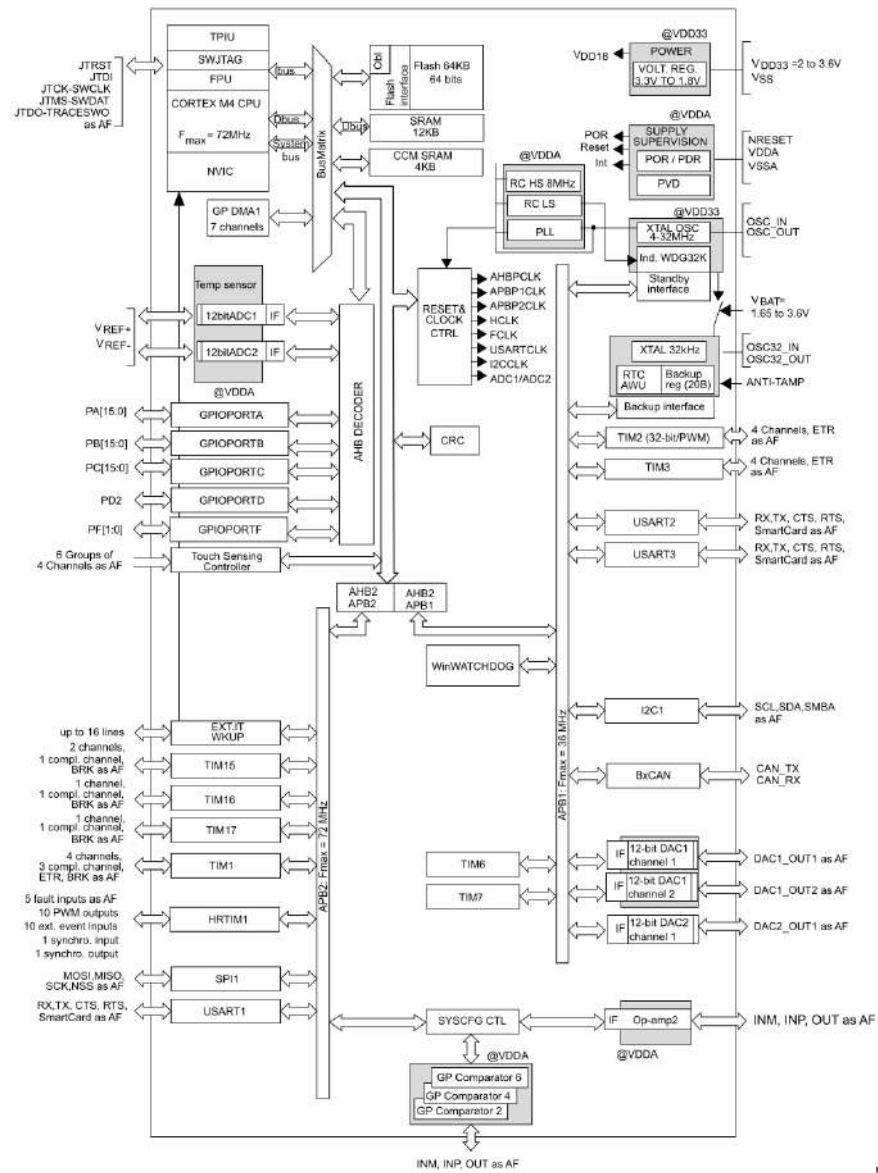


Рисунок 4.1 Структурна схема МК STM32F334R8T6

4.2 Вибір транзисторів тягового інвертора

Для електромобілів питання енергоефективності стоїть досить гостро. Для того, щоб успішно конкурувати з автомобілями, які використовують двигуни внутрішнього згоряння, виробникам необхідно розширити асортимент продукції і знизити витрати на матеріали. Найбільш критичним параметром для користувачів є запас ходу.

Збільшення запасу ходу електромобілів можна забезпечити встановивши акумулятор більшої ємності або підвищенням ефективності використання запасеної енергії. У першому випадку підвищення ємності акумулятора призведе до збільшення його розмірів і вартості, більш тривалої зарядці, збільшення ваги автомобіля і, як наслідок, більшої витрати енергії. У світлі цього збільшення енергоефективності систем живлення електромобілів бачиться найкращим виходом.

Перехід на SiC MOSFET дозволяє розробникам систем живлення домогтися відповідності найсуворішим вимогам до енергоефективності без додаткових витрат.

Прогрес в області напівпровідникових матеріалів дозволив створити карбід-кремнієві польові транзистори (SiC MOSFET) з підвищеною робочою частотою, що забезпечують менші втрати на перемикання.

Вдосконалені корпуси з малої паразитною індуктивністю, в яких випускаються такі транзистори, дозволяють розробникам в повній мірі використовувати можливості цих компонентів для збільшення ККД силових перетворювачів і, як наслідок, для зменшення витрати електроенергії кінцевим споживачем.

Застосування SiC MOSFET з низьким опором у відкритому стані веде до зниження втрат провідності. Крім цього, фізичні властивості карбіду кремнію дозволяють мінімізувати вплив температури на параметри транзистора і зберегти високу ефективність при повному навантаженні і перевантаженнях.

Тягові інвертори, розроблені із застосуванням SiC-приладів, відрізняються більшою щільністю потужності завдяки більш високому блокуючій напрузі, низькому опору у відкритому стані і кращу теплопровідність в порівнянні з кремнієвими (Si) аналогами. З доступних SiC-пристроїв, з урахуванням порівняння SiC JFET і SiC, N-канальні SiC MOSFET мають найкращі параметри сумісності для заміни звичайних кремнієвих MOSFET або IGBT завдяки простій структурі, стандартної конструкції і низьким втратами на управління.

Завдяки зниженню потужності втрат транзисторів знижується складність, розміри, вага і вартість системи охолодження у виробі.

Щоб реалізувати переваги SiC транзисторів, при розробці тягового інвертора потрібно враховувати певні чинники. Знижена величина ємностей і збільшена швидкість перемикання повинні бути враховані в процесі проектування пристрою управління, оскільки це може вплинути на рівень електромагнітних завад. Підвищена швидкість комутації вимагає особливої уваги при розведенні друкованої плати драйвера і виборі компонентів. Зовнішні опори затвора можуть бути використані для придушення дзвону в ланцюзі управління і зниження рівня електромагнітних завад.

Проаналізувавши ринок високопотужних транзисторів вибір був зроблений на продукції компанії Cree Power, яка випускає силові модулі під брендом Wolfspeed.

Одним з факторів що посприяв вибору продукції цієї компанії є те що вона піонер в області карбід-кремнієвих (SiC) силових компонентів, компанія Cree Power випустила перший комерційно успішний SiC MOSFET в 2011 році. І до цього дня компанія залишається лідером в цій області, постійно поповнюючи портфоліо новими приладами.

Вивчивши лінійку силових модулів компанії, було вибрано силовий модуль SAB450M12XM3, який складається з двох карбід-кремнієвих польових транзисторів з'єднаних по півмостовій топології (рис 4.2).

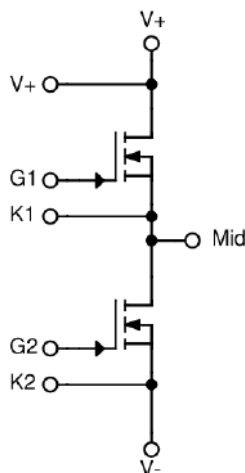


Рисунок 4.2 Топологія з’єднання транзисторів у модулі САВ450М12ХМЗ

Також модуль має вбудований термістор, за допомогою якого можна слідкувати за температурою. Зовнішній вигляд модулю зображено на рисунку 4.3. Основні технічні характеристики САВ450М12ХМЗ наведені в таблиці 4.2



Рисунок 4.3 Зовнішній вигляд модулю САВ450М12ХМЗ

Таблиця 4.2 Основні технічні характеристики САВ450М12ХМЗ

Параметри	Значення
Напруга сток-витік максимальна	1200 В
Схема модуля	напівмост
Максимальний робочий струм при 25 ° С	450 А
Робочий діапазон напруг затвора	-4...15 В
Опір відкритого каналу при макс. U затвора	2.6 мОм
Робоча температура	-40 ...125 °С

4.3 Вибір драйверу силового транзистора

Від надійної роботи вихідних каскадів силових транзисторів залежить, в кінцевому підсумку, робота системи управління приводом. Для надійного і якісного перемикання керуючих силових ключів – високовольтних SiC MOSFET необхідно забезпечити виконання ряду умов:

напруга на затворі повинно бути вище напруги витоку транзистора на 5 ... 15 В. Завдання ускладнюється тим, що в високовольтній системі напруга витоку (тобто в основній шини пристрої) може досягати декількох сотень або тисяч вольт;

транзистор в складі системи повинен мати можливість прямого управління від логічної низьковольтної частини системи, зазвичай вимірюється щодо загальної шини. Таким чином, напруга низьковольтної частини повинна мати зміщення щодо джерела живлення високовольтної частини системи;

потужність, споживана схемою управління затвором, не повинна істотно впливати на загальну продуктивність системи комутації.

Основним завданням драйвера для забезпечення зазначених вище вимог є перетворення рівнів напруги і узгодження низьковольтної частини системи управління, що має, як правило, однополярне живлення, і високовольтної частини, до якої часто докладена напруга з високим потенціалом.

Другим завданням, розв'язуваної за допомогою спеціалізованих драйверів, є забезпечення високих значень струмів затвора, що перемикають силові транзистори. Справа в тому, що високовольтні силові ключі, як правило, мають значні паразитні ємності, здатні накопичувати великі заряди в області затвора. Для повноцінного перемикання таких транзисторів цей заряд необхідно розсмоктати або накачати, що і забезпечується за допомогою великих вихідних струмів драйвера.

Крім того, драйвери силових ключів, на відміну від простих перетворювачів рівня, забезпечені численними механізмами захисту як самого драйвера, так і керованих ключів, що дозволяє виконувати формування вихідних

керуючих сигналів згідно певними алгоритмами, щоб запобігти виходу системи з ладу в аварійній ситуації.

Проаналізувавши ринок високовольтних драйверів для силових ключів було вирішено обрати драйвер німецької компанії Infineon Technologies - 1ED3122MU12HXUMA1.

Мікросхема 1ED3122MU12HXUMA1 – це гальванічно ізольований одноканальний драйвер затвору для IGBT, MOSFET, SiC MOSFET. Він забезпечує вихідний струм до 14 А. Логічні входи працюють у широкому діапазоні напруги від 3 до 15 вольт

На рисунку 4.4 зображено структурну схему драйвера, в таблиці 4.3 наведено основні характеристики.

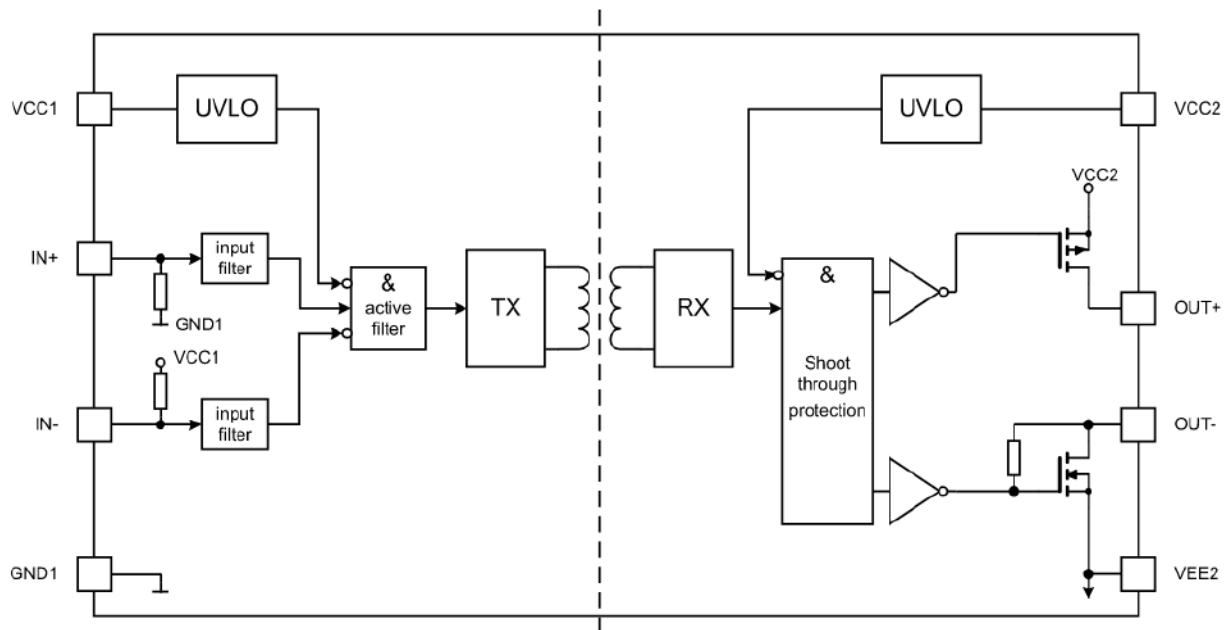


Рисунок 4.4 Структурна схема драйвера 1ED3122MU12HXUMA1

Таблиця 4.3 Основні характеристики 1ED3122MU12HXUMA1

Параметри	Значення
Кількість каналів	1
Максимальна напруга зміщення	1200 В
Максимальний вихідний струм наростання	10 А
Максимальний вихідний струм спаду	3 А
Напруга пробною ізоляції	5700 В
Робоча температура	-40...150 °C

4.4 Аналіз датчиків струму

Використання струмового шунту це найпростіший і найбільш точний спосіб вимірювання струму. Як відомо, при протіканні струму через активний опір, на ньому відбувається падіння напруги, пропорційне вимірюваному струму. Така схема вимірювання наведена на рисунку 4.5

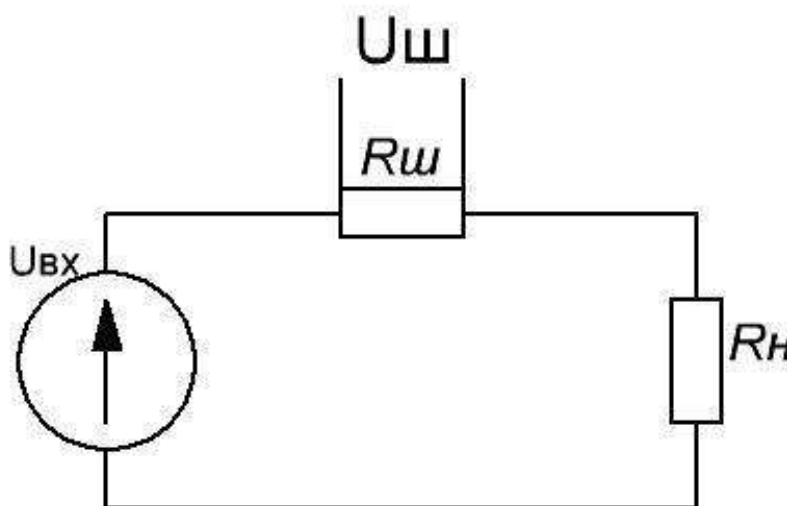


Рисунок 4.5 Датчик струму – струмовий шунт

Падіння напруги на шунті пропорційно пропускаємому струму:

$$U_{ш} = I_n R_{ш}$$

Відповідно в залежності від необхідної напруги на виході датчика підбираємо потрібний опір шунта. Але, падіння напруги на шунті призведе до втрат потужності, які виділяються в тепло, відповідно при великих струмах ми змушені мати малі значення напруги з датчика, щоб обмежити втрати.

Пропоновані промисловістю шунти типу ШСМ (рис 4.6) забезпечують стандартну вихідну напругу в 75мВ при номінальному струмі.



Рисунок 4.6 Струмівий шунт типу ШСМ

На напругу в 75мВ відкалібровано більшість вимірювальних головок для шунтів. Зверніть увагу на другу пару гвинтів - вони призначені спеціально для підключення до вимірювального приладу для підвищення точності вимірювань за рахунок поділу струмів силового і вимірювального ланцюга.

Для вимірювання струму за допомогою таких шунтів потрібно використовувати операційні підсилювачі. При цьому, середній коефіцієнт посилення становить 20-40, що під силу широко поширеним операційним підсилювачів. На рисунку 4.7 наведено схему вимірювання.

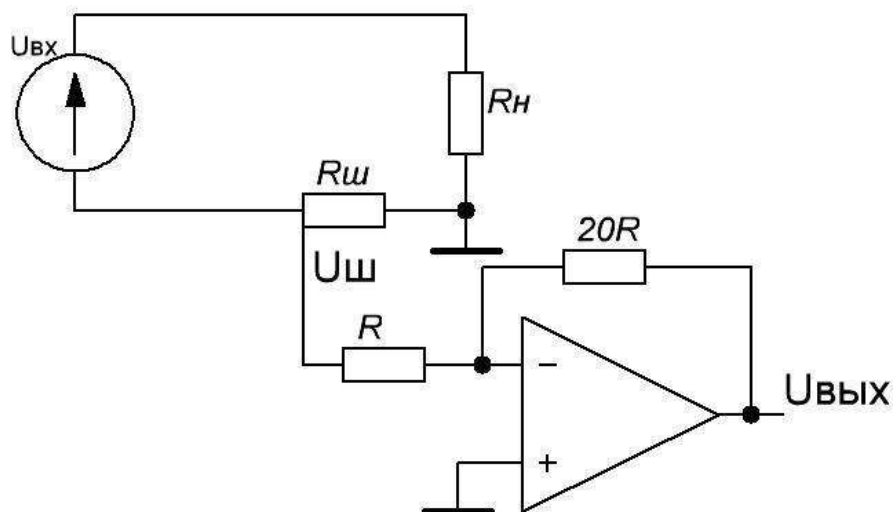


Рисунок 4.7 Схема підсилення сигналу струмового шунта операційним підсилювачем

Слід враховувати, що при вимірюванні змінного струму, вихідний сигнал буде біполярний і операційний підсилювач потрібно живити від двополярного джерела живлення.

Вимірювальний трансформатор струму являє собою трансформатор, первинна обмотка якого підключається до джерела струму, а вторинна замикається на вимірювальні прилади.

Трансформатори струму використовуються для вимірювання струмів в потужнострумових ланцюгах, часто з високим потенціалом. Наприклад, в нашому випадку необхідно вимірювати струм в ланцюгах до 500 В, а пристрій повинен бути відносно дешевим і мати гальванічну розв'язку.

Основна особливість трансформаторів струму полягає в тому, що вони вміють вимірювати тільки змінну напругу.

Трансформатор струму завжди навантажується. Якщо вторинна обмотка трансформатора струму виявиться розімкнутою, то на ній виникне потенціал в пару тисяч кіловольт, який виведе з ладу прилад, пробивши його ізоляцію.

Трансформатори бувають з вбудованою первинною обмоткою або мають подобу первинної обмотки у вигляді шини, або зовсім вікно для пропускання через нього дроту.

Основний недолік трансформатора струму - це робота тільки на певній частоті через металевий сердечник. Зрозуміло що трансформатор струму здатний передати сигнал і більшої частоти, проте з набагато меншою точністю. При цьому, слід звернути увагу на товщину листа використовуваного сердечника - чим тонше залізо в трансформаторі струму, тим вище гранично допустима робоча частота. Також існують трансформатори струму сердечник якого виконано з фериту, які використовуються для вимірювання систем з частотою 50-60 і більше кГц.

Датчики струму на ефекті Холла використовують ефект виникнення різниці потенціалів при приміщенні провідника зі струмом в магнітне поле.

При створенні датчика береться магнітопровід через який пропускається провідник вимірюваного ланцюга і в розріз магнітопровода розміщується датчик Холла, таким чином отримуючи датчик струму відкритого типу. Перевагою такого датчика є простота. Недоліком - наявність підмагнічування сердечника, отже, підвищення нелінійності показань.

Як і трансформатори, бувають різновиди датчиків, що дозволяють пропустити через себе силовий провідник

4.5 Розробка принципової схеми системи управління електроприводом електромобіля

Розробку принципової схеми почнемо з мікроконтролера. Дослідивши документацію надану компанією-виробником було вирішено використовувати 3 канали на які будуть виведені комплементарні пари. Комплементарна пара буде керувати кожним плечем полу моста PWM high resolt (ШІМ з широким діапазоном).

PWM High Resolution, або HRPWM - це ШІМ модуль, який має розширену здатність установки коефіцієнта заповнення і зазвичай володіє більш гнучкими налаштуваннями. Серед таких налаштувань можна навести можливість прив'язати генерацію ШІМ до початку і кінця періоду, є ще 4 події що налаштовуються, які дозволяють перевести ШІМ в 0 або 1 в будь-який момент періоду відмінний від початку або кінця періоду.

Чотири каналів АЦП будуть задіяні для зворотнього зв'язку по струму та напрузі та для контролю температури силових модулів та двигуна.

МК – це синхронний автомат який працює від єдиного джерела імпульсів. В якості такого джерела обраний нами мікроконтролер може використовувати внутрішній RC осцилятор або зовнішній кварцовий резонатор. В випадку використання внутрішнього джерела тактування не подрібно підключати зовнішні елементи, але в такому випадку тактування буде виконуватись на певних діапазонах частот. Також цей спосіб не підходить якщо потрібні точні інтервали часу, справа в тому що частота RC осцилятора може змінюватись через температурний вплив. В нашому випадку неточні інтервали відкриття та закриття затворів силових транзисторів вплине на якість вихідного сигналу, ККД перетворювача або навіть до виходу з ладу силових модулів. Тому тактування будемо реалізовувати за допомогою зовнішнього кварцового резонатора.

На виводи PC14 та PC15 (рис. 4.8) підключимо кварцовий резонатор частотою 32.768КГц, та зашунтуємо на землю через конденсатори ємністю 22пФ.

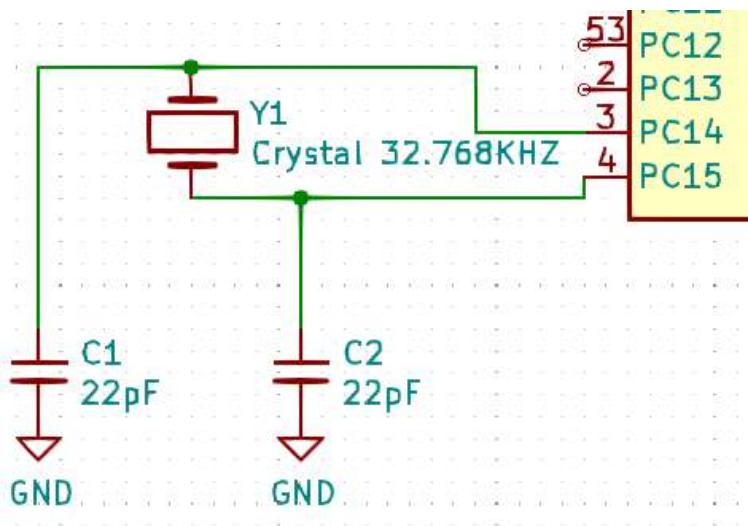


Рисунок 4.8 Схема підключення кварцового резонатора

Для того щоб мати можливість перезавантажувати МК треба на виводи мікромікача підключити вивід NRST та землю, що зображено на рисунку 4.9.

Режим завантаження мікроконтролера задається притягуванням піну BOOT0 (рис 4.9) до потенціалу землі або живлення.

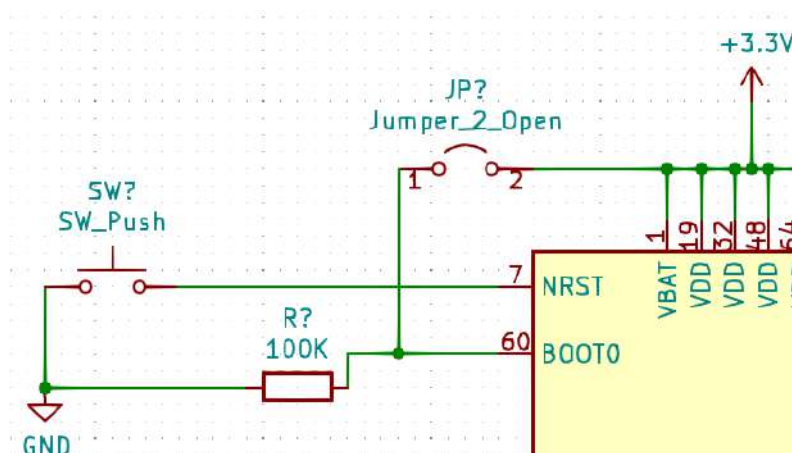


Рисунок 4.9 Підключення пінів BOOT0 та NRST

Мікроконтролер обов'язково повинен отримувати живлення від стабілізованого джерела струму. МК STM32F334R8T6 згідно з документації діапазон напруги живлення знаходиться в діапазоні від 2.0 до 3.6 вольт. Для отримання стабілізованої напруги 3.3-3.6 вольт було вирішино використовувати dc/dc перетворювач TMR2-4810WI (рис. 4.10), компанії виробника Traco Power. Його принцип роботи такий: на піни +VIN та -VIN подається напруга від низьковольтної мережі живлення електромобілю, а з вихідних виводів +VOUT та -VOUT отримуємо стабілізовану напругу 3.3 вольт, яка підводиться до МК на піни VDD, VBAT, VSS (рис. 4.11). На виводи живлення АЦП ставимо фільтруючий дросель на 120 мГ, для запобігання електромагнітних завад, що можуть негативно впливати на точність роботи АЦП.

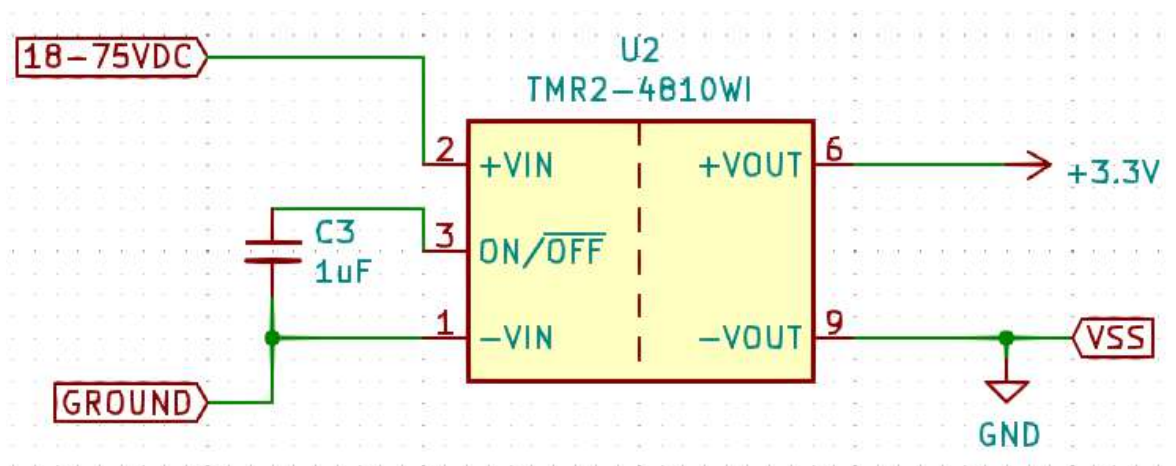


Рисунок 4.10 Підключення стабілізатора TMR2-4810WI

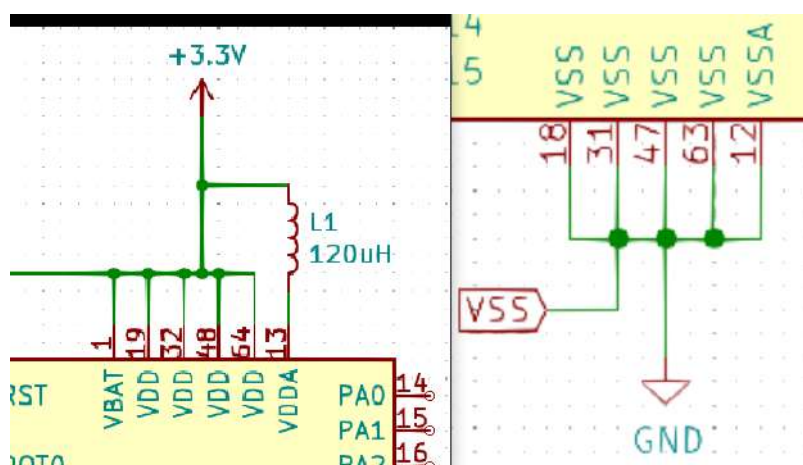


Рисунок 4.11 Підключення живлення до МК

Наступним етапом розробки схеми є силова частина системи керування-інвертор. Інвертор пристрій який перетворює постійну напругу, в нашому випадку з тягових батарей, в змінну напругу

В процесі роботи інвертора напруги, джерело постійної напруги періодично підключається до кола навантаження з чергуванням полярності, при цьому частота підключень і їх тривалість формується керуючим сигналом, який надходить від мікроконтролера.

Контролер в інверторі зазвичай виконує кілька функцій: регулювання вихідної напруги, синхронізація роботи напівпровідникових ключів, захист схеми від перевантаження.

Підключення затвору транзистора виконується через узгоджувальний пристрій, в нашому випадку це драйвер 1ED3122MU12HXUMA1. Так як драйвер одноканальний, виходить що на кожне плече потрібно два пристрої.

На виводи VDD подається стабілізована напруга живлення 3.3 вольт, на виводи VH напруга для відпирання затвору від стабілізованого джерела 15 вольт (рис. 4.12.).

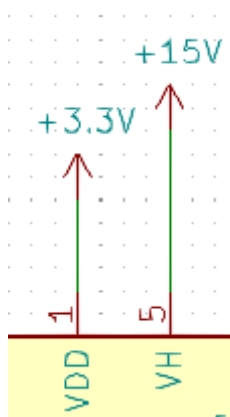


Рисунок 4.12 Схема живлення драйвера

Керуючі сигнали від МК надходять на виводи IN+ для кожного драйверу ключа. Вивід IN- підключається на землю(рис 4.13.).

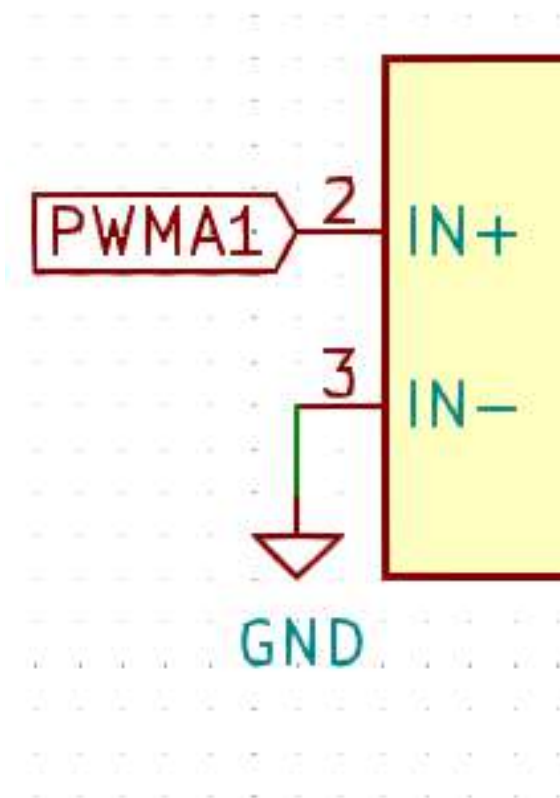


Рисунок 4.13 Підключення ШІМ виводів МК до драйверу

Верхній ключ керується сигналами що йдуть з виводів CLAMP GOUT(через резистор 10 Ом) драйвера на затвор(рис. 4.14), вивід GNDISO йде на витік транзистору через послідовно підключений транзистор на 10КОм.

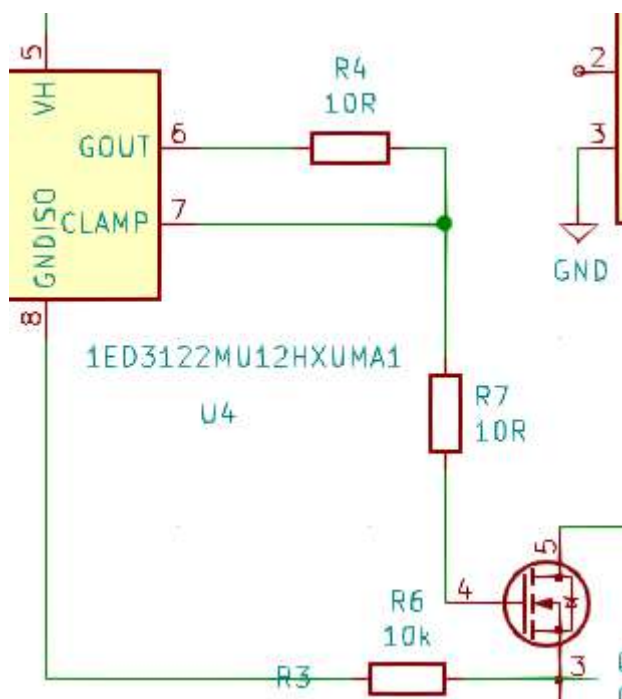


Рисунок 4.14 Підключення виходів драйвера до транзистора

Аналогічне підключення виконується і для нижнього транзистора у плечі.

Підключення джерела постійної напруги, або в нашому випадку тягової батареї виконується підключенням на сток верхніх транзисторів позитивної клеми акумулятора (VBAT+), до витоку нижніх ключів – негативної (VBAT-) клеми (рис .4.15).

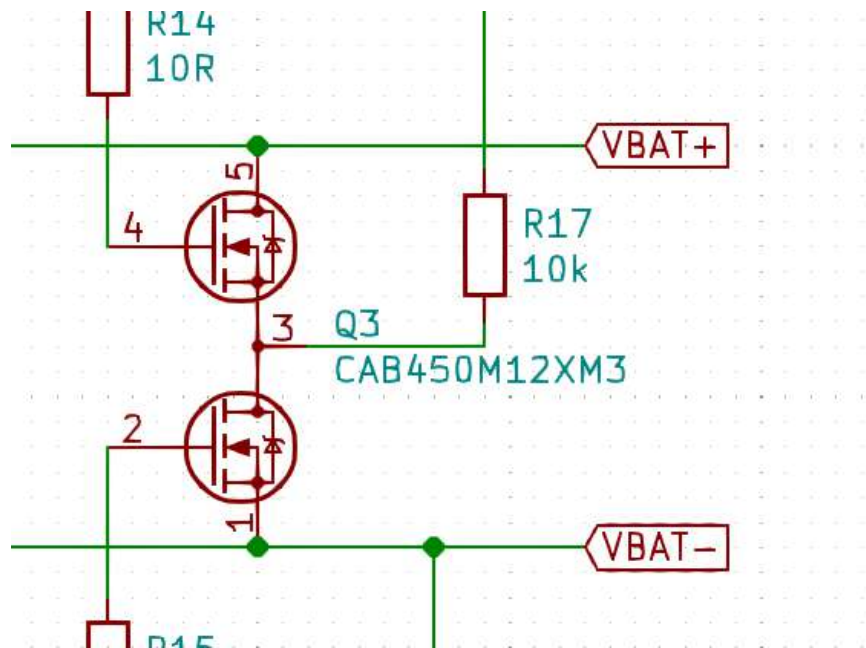


Рисунок 4.15 Підключення постійного джерела живлення

У місці з'єднання витоку верхнього ключа та стоку нижнього формується змінний струм який через фільтр нижніх частот подається на тяговий двигун. На рисунку 4.16 виводи А,В,С, є виходами інвертору.

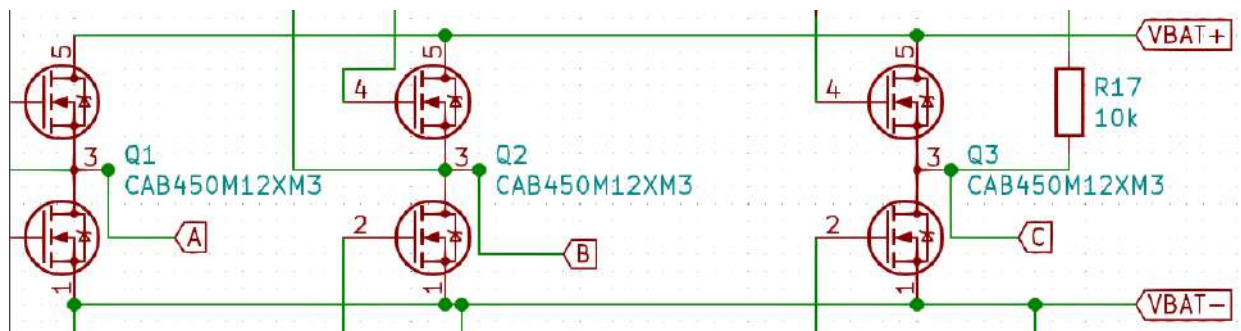


Рисунок 4.16 Вихідні виводи інвертору

В ході роботи були вибрані основні компоненти для реалізації системи керування, для виконання алгоритмів керування вибрано мікроконтролер STM32F334R8T6. Були розглянуті типи силових ключів для розробки тягового інвертору. Завдяки значному зниженню втрат при перемиканні у пристроїв на SiC очікується, що MOSFET на його основі зможуть замінити кремнієві біполярні транзистори з ізольованим затвором з набагато більшим струмом.

В даному розділі було розроблено принципову схему мікропроцесорної системи керування електроприводом автомобіля з використанням синхронного двигуна з постійними магнітами

ВИСНОВКИ

Сталий розвиток електромобіля в значній мірі залежить від ТЕП і його компонентів. Аналіз системи ТЕП показує, що останні досягнення в області вдосконалення її елементів, таких як пристрої акумулювання енергії, силовий електронний перетворювач, власне тяговий електродвигун, цифрові контролери тощо, роблять електромобіль здатним конкурувати з традиційним автомобілем, що використовують ДВС.

Огляд літератури показує, що найбільш широко використовуваним в ТЕП є асинхронний двигун (АД). Все частіше стали застосовувати і вентильний електродвигун (ВЕД), так як привід на його основі має високі удільні характеристики

У даній роботі здійснено моделювання системи управління СДПМ. Як середовище моделювання обрано середовище імітаційного моделювання Simulink математичного пакета MATLAB, яка поєднує в собі зручний графічний інтерфейс і широкі можливості дослідження динамічних процесів. Комбінуючи можливості Simulink і бібліотеки для моделювання електротехнічних пристроїв SimPowerSystem, можна не тільки імітувати роботу пристроїв в тимчасовій області, а й виконувати різні види аналізу таких пристроїв.

В ході роботи було здійснено розробку мікропроцесорної системи керування, в якості контролера був обран МК на базі ядра ARM. В ході аналізу сучасного стану розвитку високопотужних напівпровідників було з'ясовано що перехід від інверторів виконаних на IGBT-транзисторах на SiC MOSFET позитивно впливає на якість формуючого сигналу живлення ТЕП, підвищенню ККД – тобто зростає енергоефективність та збільшується запас ходу.

Тягові інвертори, розроблені із застосуванням SiC MOSFET, відрізняються більшою щільністю потужності завдяки більш високому блокуючій напрузі, низькому опору у відкритому стані і кращою теплопровідністю.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Балковой А. П. Прецизионный электропривод с вентильными двигателями / А. П. Балковой, В. К. Цаценкин. – Москва: Издательский дом МЭИ, 2010. – 328 с.
2. Высоцкий В. Е. Математическое моделирование и оптимальное проектирование вентильных электрических машин / В. Е. Высоцкий, П. В. Тулупов. – Москва: Энергоатомиздат, 2007. – 340 с.
3. Закладний О.М. Вплив способів керування комутатором на гармонічний склад кривих струму і напруги вентильного двигуна / О.М. Закладний, О.О. Закладний. – Інформаційний збірник «Промислова електроенергетика та електротехніка» Промелектро. 2008. №1. С. - 35-40.
4. Закладной А. Н. Энергоэффективный электропривод с вентильными двигателями: Монография / А. Н. Закладной, О. А. Закладной. – Киев: Издательство «Либра», 2012. – 185 с.
5. Теорія та синтез вентильних двигунів постійного струму / [В. І. Ткачук, І. Є. Біляковський, О. В. Макаrchук та ін.]. – Львів: Вид-во Львівської політехніки, 2011. – 284 с.
6. Теорія та синтез вентильних двигунів постійного струму: монографія / В. І. Ткачук, І. Є. Біляковський, О. В. Макаrchук ; М-во освіти і науки, молоді та спорту України, Нац. ун-т "Львів. політехніка". – Л. : Вид-во Львів. політехніки, 2011. – 288 с
7. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника. 12-е изд. Том I: Пер. с нем. – М.: ДМК Пресс, 2008. – 832 с.
8. Черных И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink / И. В. Черных. – Москва: ДМК Пресс, 2008. – 288 с.
9. Макаров А.М. Системы управления автоматизированным электроприводом переменного тока : учеб. пособие / А. М. Макаров, А. С. Сергеев, Е. Г. Крылов, Ю. П. Сердобинцев ; ВолгГТУ. – Волгоград, 2016. – 192с.

10. Cree CAB450M12XM3 SiC Power Module [Электронный ресурс] // Cree, Inc.. – 2019. – Режим доступа до ресурсу: <https://www.wolfspeed.com/media/downloads/1493/CAB450M12XM3.pdf>.
11. DS9994 Arm®Cortex®-M4 32b MCU+FPU, up to 64KB Flash, 16KB SRAM, 2 ADCs, 3 DACs, 3 comp., op-amp, 217ps 10-ch (HRTIM1) [Электронный ресурс] // STMicroelectronics. – 2018. – Режим доступа до ресурсу: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32f334c8.pdf>.
12. EiceDRIVER™ 1ED31xxMU12H Compact Datasheet [Электронный ресурс] // Infineon Technologies AG. – 2020. – Режим доступа до ресурсу: https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-1ED31xxMU12H-DataSheet-v02_00-EN.pdf?fileId=5546d46274cf54d50174d97c37be1f67.
13. Fundamentals of Motor Control [Электронный ресурс] // STMicroelectronics. – 2020. – Режим доступа до ресурсу: Fundamentals of Motor Control.
14. RM0364 STM32F334xx advanced Arm®-based 32-bit MCUs 4.0 [Электронный ресурс] // STMicroelectronics. – 2020. – Режим доступа до ресурсу: https://www.st.com/resource/en/reference_manual/dm00093941-stm32f334xx-advanced-armbased-32bit-mcus-stmicroelectronics.pdf.

ДОДАТОК А

Програмний код скрипту розрахунків коефіцієнтів

```
ramp=[-10000,10000];  
ki=100;  
Ts=2e-6;  
Ld=0.000174;  
f_max=20e3;  
lambda=0.071;  
Lq=0.000293;  
Tsc=7*20e-6;  
kp=5;  
SwK=2;  
Ts_vect=20e-6;  
fc=100;  
sat=[-256,256];  
p=4;  
h=0.1;  
Q=0;  
ib=lambda/(Lq-Ld);  
Teb=3/2*p*lambda*ib;
```

ДОДАТОК Б

Охорона праці при роботі з електрообладнанням

Важливим моментом в комплексі заходів спрямованих на вдосконалення умов праці є заходи з охорони праці. Цьому питанню з кожним роком приділяється все більша увага, тому турбота про здоров'я людини стала не тільки справою державної ваги, але й елементом конкуренції роботодавців у питанні залучення кадрів. Для успішного втілення в життя всіх заходів з охорони праці необхідні знання в галузі фізіології праці, які дозволяють правильно організувати процес трудової діяльності людини.

1 Аналіз шкідливих факторів при експлуатації електрообладнання

При використанні абсолютно будь-якого електроустаткування дуже важливим є дотримання правил техніки безпеки. Не можна нехтувати будь-якими несправностями, виявленими в електрообладнанні, таке недбале ставлення, насамперед до самого себе, призводить до травм різного ступеня тяжкості, а іноді й до смертельного результату. Ураження електричним струмом може відбутися при використанні приладів з порушеною ізоляцією проводів або при експлуатації електричних приладів у вологих приміщеннях. Тому до початку всіх робіт потрібно переконатися у справності розеток, в які буде включатися електроінструмент, перевірити заземлення електрообладнання і, звичайно ж, оглянути інструмент на наявність пошкоджень. Крім цього, необхідно суворо дотримуватися порядку підключення електроустаткування в мережу, спочатку до обладнання підключається шнур, а потім шнур - до мережі. Відключення здійснюється в зворотному порядку. І ні в якому разі не можна включати і торкатися до металевого корпусу несправного електрообладнання, підключеного до електромережі, так як такі нерозумні дії можуть призвести до ураження електричним струмом. Потрібно завжди пам'ятати - електрику треба не тільки економити, але і обережно користуватися нею. Не виконання вимог техніки безпеки може призвести до тяжких небезпечних та шкідливих факторів.

1.1 Небезпечні та шкідливі виробничі фактори, пов'язані з використанням електричної енергії

Факторами небезпечного і шкідливого впливу на людину, пов'язаними з використанням електричної енергії, є:

Протікання електричного струму через організм людини;

Вплив електричної дуги;

Вплив біологічно активного електричного поля;

Вплив біологічно активного магнітного поля;

Вплив електростатичного поля;

Вплив електромагнітного випромінювання (ЕМВ).

Небезпечні та шкідливі наслідки для людини від впливу електричного струму, електричної дуги, електричного і магнітного полів, електростатичного поля і ЕМВ проявляються у вигляді електротравм, механічних пошкоджень та професійних захворювань. Ступінь впливу залежить від експозиції фактора, в тому числі: роду і величини напруги і струму, частоти електричного струму, шляху струму через тіло людини, тривалості впливу електричного струму або електричного і магнітного полів на організм людини, умов зовнішнього середовища.

За ступенем впливу на організм людини розрізняються чотири стадії:

слабкі, судомні скорочення м'язів;

судомні скорочення м'язів, втрата свідомості;

втрата свідомості, порушення серцевої і дихальної діяльності;

клінічна смерть, тобто відсутність дихання і кровообігу.

Механічні пошкодження, що з'явилися внаслідок впливу шкідливих факторів, пов'язаних з використанням електричної енергії (падіння з висоти, удари), також можуть бути віднесені до електротравм. Крім того, електричний струм викликає мимовільне скорочення м'язів (судоми), яке ускладнює звільнення людини від контакту з струмоведучими частинами.

Професійні захворювання проявляються, як правило, в порушеннях функціонального стану нервової та серцево-судинної систем. У людей, що працюють в зоні впливу електричного і магнітного полів, електростатичного поля, електромагнітних полів радіочастот, з'являються дратівливість, головний біль, порушення сну, зниження апетиту, порушення репродуктивної функції та ін. Наслідком дії шкідливих факторів можуть з'явитися хвороби очей або лейкемія.

2 Обов'язки споживача щодо забезпечення електробезпеки

Відповідно до п. 1.2.2 ПТЕЕС споживач зобов'язаний забезпечити:

зміст електроустановок в працездатному стані, їх експлуатацію відповідно до вимог ПТЕЕС, ПОТРМ, ПУЕ та інших нормативно-технічних документів;

своєчасне і якісне проведення технічного обслуговування, планово-попереджувального ремонту, випробувань, модернізації та реконструкції електроустановок та електрообладнання;

підбір електротехнічного та електротехнологічного персоналу (проведення обов'язкових медичних оглядів працівників, проведення інструктажів з безпеки праці, пожежної безпеки);

навчання і перевірку знань електротехнічного персоналу та електротехнологічного персоналу;

надійність роботи і безпеку експлуатації електроустановок;

дотримання вимог охорони праці електротехнічним та електротехнологічним персоналом;

охорону навколишнього середовища при експлуатації електроустановок;

облік, аналіз і розслідування порушень в роботі електроустановок, нещасних випадків, пов'язаних з експлуатацією електроустановок, та вжиття заходів щодо усунення причин їх виникнення;

подання повідомлень до органів Держенергонагляду про аварії, смертельних, важких і групових нещасних випадках, пов'язаних з експлуатацією електроустановок;

розробку посадових і виробничих інструкцій з охорони праці для електротехнічного персоналу;

укомплектування електроустановок захисними засобами, засобами пожежогасіння та інструментом;

облік, раціональне витрачання електричної енергії та проведення заходів з енергозбереження;

проведення необхідних випробувань електрообладнання, експлуатацію пристроїв блискавозахисту, вимірювальних приладів і засобів обліку електричної енергії;

виконання приписів органів державного енергетичного нагляду.

Нові або реконструйовані електроустановки і пускові комплекси повинні бути прийняті в експлуатацію в порядку, викладеному в ПТЕЕС та інших нормативних документах (п. 1.3.1 ПТЕЕС).

Відповідно до п. 1.1.5 ПОТРМ в організаціях повинен здійснюватися контроль за дотриманням вищевказаних Правил та інструкцій з охорони праці, контроль за проведенням інструктажів з електробезпеки. Відповідальність за стан охорони праці несе роботодавець.

3 Пожежна безпека при експлуатації електроустановок

Функціонування будь-якого підприємства неможливе без облаштування його електроустановками. До них належать електричне обладнання, апарати управління, пускорегулювання, контрольно-вимірювальні та освітлювальні прилади, електродвигуни, електропроводи, кабелі тощо. Щоб унеможливити виникнення пожежі, кожна складова систем електроустановок потребує уваги з позиції дотримання правил пожежної безпеки.

Застосування, монтаж, наладка та експлуатація електроустановок повинна відповідати вимогам чинних Правил улаштування електроустановок (ПУЕ), Правил технічної експлуатації електроустановок споживачів (ПТЕ), Правил техніки безпеки під час експлуатації електроустановок споживачів (ПТБ), ДНАОП 0.00-1.32-01 «Правила будови електроустановок. Електрообладнання

спеціальних установок» та інших нормативних документів. Власник підприємства зобов'язаний забезпечити обслуговування та технічну експлуатацію електроустановок. Особа, призначена відповідальною за їхній протипожежний стан (головний енергетик, енергетик, інженерно-технічний працівник відповідної кваліфікації), зобов'язана:

організовувати та проводити профілактичні огляди та планово-попереджувальні ремонти електрообладнання й електромереж, а також своєчасне усунення порушень, які можуть призвести до пожежі;

забезпечувати правильність застосування електрообладнання, кабелів, електропроводок залежно від класу пожежо- та вибухонебезпечності зон і умов навколишнього середовища, а також справний стан апаратів захисту від коротких замикань, перевантажень та інших небезпечних режимів робіт;

організовувати навчання та інструктажі чергового персоналу з питань пожежної безпеки під час експлуатації електроустановок. У разі неможливості технічного обслуговування електроустановок силами персоналу підприємства його власник повинен укласти договір на планове технічне обслуговування зі спеціалізованою організацією.

Електричні мережі та електрообладнання підприємств повинні відповідати протипожежним вимогам діючих нормативних документів.

Пожежна безпека при експлуатації електроустановок на підприємствах повинна забезпечуватися:

Правильним вибором ступеня захисту електрообладнання;

Захистом електричних апаратів і провідників від струмів короткого замикання і перевантажень;

Заземленням електрообладнання;

Відповідною конструкцією електричного освітлення, електроустаткування і установок;

Вибором перерізу провідників по безпечному нагріванню, а також дотриманням протипожежних вимог при каналізації електроенергії;

Надійністю електропостачання протипожежних пристроїв;

Організаційно-технічними заходами (профілактичні ремонти, випробування, обслуговування тощо) при експлуатації електроустановок.

Керівник підприємства, з метою забезпечення пожежної безпеки при експлуатації електроустановок, зобов'язаний встановити порядок введення в експлуатацію електроустановок після монтажу, планово-попереджувальних та інших ремонтів і випробувань, а також призначити особу, відповідальну за забезпечення пожежної безпеки при експлуатації електроустановок, відповідальних у цехах, складах, на ділянках.

Начальники цехів, ділянок, лабораторій, відділів, завідувачі складами та інші особи, які експлуатують (що використовують) електроустановки, зобов'язані не допускати порушень правил експлуатації електрообладнання, а при виявленні несправностей або відхилень у роботі електроустановок вжити заходів з їх відключення, повідомивши про несправність особі, відповідальній за експлуатацію електроустановок.

До монтажу та експлуатації на підприємствах допускається електрообладнання, на яке є технічні умови або інші нормативні документи, затверджені у встановленому порядку.

Електрообладнання повинно монтуватися і експлуатуватися за призначенням та з дотриманням вимог, що встановлюються нормативною документацією на нього.

До монтажу та експлуатації допускається електрообладнання, яке за своїм типом і виконанню відповідає класу пожежонебезпечної, вибухонебезпечної зони, а також характеристиці навколишнього середовища. Забороняється експлуатувати в пожежонебезпечних і вибухонебезпечних зонах електрообладнання, виготовлене неспеціалізованими організаціями, а також не має паспорта або інструкції з експлуатації.

Електроустановки повинні експлуатуватися відповідно до проектною документації. При установці і підключенні в процесі експлуатації додаткового, не передбаченого проектом електрообладнання повинна розроблятися

відповідна документація і визначатися допустимість такого підключення до існуючої електромережі.

Пристрої проходів кабелів або трубопроводів крізь стіни, перекриття та переходи через температурні і усадочні шви в пожежонебезпечних і вибухонебезпечних зонах повинні міститися в справному стані і забезпечувати надійний захист від розповсюдження вогню в суміжні приміщення.

Монтаж, ремонт і заміну електроустановок у вибухозахищеному і закритому виконанні необхідно проводити тільки при знятій напрузі.

Вводи кабелів і проводів під вибухозахищені апарати повинні виконуватися з ущільненнями, передбаченими конструкцією апаратів, і періодично перевірятися на герметичність.

Вибухозахищені електричні апарати повинні бути оглянуті, мати ущільнення кришок, вводу кабелів і проводів, маркування по вибухозахисту, попереджувальний напис "ВІДКРИВАТИ, відключений від мережі", а елементи кріплення електроустановок (болти, гайки, шайби та ін.) повинні бути затягнуті.

У вибухонебезпечних зонах будь-якого класу електроустановки всіх напруг змінного і постійного струму повинні бути заземлені (занулені). При установці електроустаткування на металевих конструкціях заземлені і нульові захисні провідники повинні приєднуватися безпосередньо до корпусів електрообладнання - до заземлювального затискача на корпусі або до заземлювального (нульового) зажиму ввідного пристрою.

Як нульові захисні (заземлюючі) провідники повинні бути використані тільки спеціально призначені для цього провідники. Використання для цих цілей конструкцій будівель, сталевих труб електропроводок, металевих оболонок і броні кабелів і т.п. допускається тільки як додатковий захід. Магістралі заземлення повинні бути приєднані до заземлювачів не менш ніж у двох різних місцях і, по можливості, з протилежних кінців вибухонебезпечної зони.

Всі електроустановки повинні бути забезпечені апаратами захисту від струмів короткого замикання та інших ненормальних режимів роботи.

Характеристики апаратів захисту повинні відповідати режимам експлуатації електрообладнання.

Плавкі вставки запобіжників повинні бути калібровані із зазначенням на клеймі номінального струму уставки. При необхідності вони повинні замінюватися на рівноцінні.

Використовувати саморобні і нестандартні плавкі вставки апаратів захисту не допускається.

З'єднування, обробляння кінців та відгалуження жил проводів і кабелів повинні бути зроблені за допомогою опресування, зварювання, паяння або спеціальних затискачів.

Періодично повинен проводитися замір опору ізоляції проводів та кабелів. Забороняється експлуатувати проводи та кабелі, опір ізоляції яких не відповідає вимогам нормативних документів.

Пристрій і експлуатація електромереж, які установлюються на деякий час не допускається, за винятком випадків, обумовлених у нормативних документах.

Відстань від світильників та інших електричних установок до горючих матеріалів має бути не менше 0.5 м. Електроустановки необхідно періодично очищати від горючого пилу або відкладень, не допускаючи їх накопичення. Періодичність очищення повинна встановлюватися в інструкціях про заходи пожежної безпеки.

Після закінчення роботи всі електроустановки в приміщеннях, за винятком спеціального призначення, необхідно відключати. У складських приміщеннях з пожежонебезпечними зонами забороняється використання електронагрівальних приладів і пристроїв з роз'ємними контактними з'єднаннями.