

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт Энергетический институт
Направление подготовки Электроэнергетика и электротехника
Кафедра Электропривода и электрооборудования

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
Отказоустойчивый вентильный электропривод для гибридного транспортного средства

УДК 621.313.13:629.113

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5Г2А	Больных Екатерина Сергеевна		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Однокопылов Георгий Иванович	Кандидат технических наук		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Трофимова Маргарита Николаевна			

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Дашковский Анатолий Григорьевич	Кандидат технических наук		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Электропривода и электрооборудования	Дементьев Юрий Николаевич	Ph.D, к.т.н., доцент		

Томск – 2016 г.

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Кафедра электропривода и электрооборудования

УТВЕРЖДАЮ:

Зав.кафедрой _____ Ю.Н.Дементьев
« _____ » _____ 2016 г.

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

Студенту гр. 5Г2А Больных Екатерине Сергеевне

1. Тема выпускной квалификационной работы
«Отказоустойчивый вентильный электропривод для гибридного транспортного средства»

утверждена приказом ректора (распоряжением директора ЭНИН)

от _____ № _____

2. Срок сдачи студентом готовой работы _____

3. Исходные данные к работе

Электрические параметры:

Напряжение питающей сети: 3ф/380 В.

Параметры гибридного транспортного средства:

Трение качения по асфальту: 0.1

Максимальная скорость движения: 160 км/ч

Коэффициент обтекаемости: 2

Лобовая площадь кузова: 2 м²

Требования к обеспечению отказоустойчивости электропривода:

- требование к преобразователю частоты: независимое протекание тока в фазах;
- предусмотреть выявление отказа в ячейки преобразователя фазы;
- обеспечить функционирование в аварийном режиме при отказе ячеек преобразователя частоты;
- типы отказов: обрыв обмоток.

4. Содержание текстового документа (перечень подлежащих разработке вопросов)

4.1 Введение

4.2 Анализ технологического развитие гибридного транспортного средства и вентильного электродвигателя

4.3 Выбор аккумуляторной батареи

- 4.4 Выбор электродвигателя.
- 4.5 Построение механических характеристик электропривода.
- 4.6 Рассмотрение отказоустойчивого вентильного электропривода.
- 4.7 Исследование неполнофазных режимов отказоустойчивого вентильного электропривода.
- 4.8 Социальная ответственность
- 4.9 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение
- 4.10 Заключение
- 5. Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей)
 - 5.1 Функциональная схема отказоустойчивого вентильного электропривода
 - 5.2 Зависимости мощностей ВД в аварийном двухфазном режиме
- 6. Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы

Руководитель _____
(подпись, дата)

Задание принял к исполнению

(подпись, дата)

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа содержит 80 страниц, 15 рисунков, 15 таблиц, 26 источников.

Ключевые слова: гибридное транспортное средство, отказоустойчивый вентильный электропривод, математическая модель вентильного двигателя, неполнофазный режим работы, обрыв фазы двигателя, отказ ключа преобразователя частоты.

Был проведён обзор аккумуляторов, обоснован выбор ёмкости аккумуляторной батареи.

Цель работы – разработка отказоустойчивого вентильного электропривода для гибридного транспортного средства, обеспечение алгоритма восстановления работоспособности.

Расчёт и выбор аккумуляторной батареи для гибридного транспортного средства. Выбор транзисторных ключей для управления вентильным электроприводом.

Выбор вентильного двигателя для гибридного транспортного средства. Расчёт механических характеристик вентильного двигателя. Рассмотрение отказоустойчивого режима работы вентильного двигателя при обрыве одной из фаз.

Выпускная квалификационная работа выполнена в текстовом редакторе Microsoft Office Word 2010 с использованием пакетов: Microsoft Visio 2010, Matlab Simulink.

Содержание

Введение.....	6
1. Технологическое развитие гибридного транспортного средства и вентильного двигателя.....	7
1.1. Этапы развития транспортных средств.....	7
1.2. Развитие вентильного электропривода.....	10
2. Техническое решение по обеспечению отказоустойчивого вентильного двигателя для гибридного транспортного средства.....	14
2.1. Устройство гибридного транспортного средства.....	14
2.2. Принцип работы гибридного автомобиля.....	15
2.3. Виды аккумуляторных батарей применяемых в технике.....	17
2.4. Расчёт аккумуляторной батареи для гибридного автомобиля.....	19
2.5. Расчёт и выбор вентильного электродвигателя для гибридного транспортного средства.....	20
2.6. Статические механические характеристики.....	22
2.7. Выбор транзистора для ПЧ.....	26
2.8. Обоснование возможности работы трёхфазного вентильного двигателя в аварийном двухфазном режиме.....	27
Заключение.....	35
Список литературы.....	36

Введение

Бурный рост количества автомобилей в XX веке послужил тому, что автомобиль стал практически основным поводом загрязнения воздуха и выброса в атмосферу углекислого газа. Значительное количество автомобилей сейчас работает на ДВС (двигатель внутреннего сгорания), употребляет бензин, как топливо. Проблема загрязнения и нехватки нефтяных продуктов и подвигла к широкому распространению гибридных и электрических автомобилей. Одной из важных частей гибридного транспортного средства является электропривод.

В настоящее время в электроприводе можно выделить силовую часть, по которой энергия передается от двигателя к исполнительному органу, и систему управления, обеспечивающую требуемое его перемещение по заданным параметрам работы. Из ряда двигателей можно выделить имеющий множество достоинств вентильный электродвигатель (ВД), который имеет лучшие показатели по КПД и минимальные габариты.

Гибридный автомобиль сейчас развивается в направлении энергоэффективности силовой установки, понижение расхода топлива, облегчение массы. Отказоустойчивость электродвигателя, как таковая, в настоящее время не является приоритетным направлением и практически не рассматривается. В дипломе рассматриваем отказоустойчивость, как не обременяющую конструкцию и схему, решение, которое приносит пользу и мало стоит.

1. Технологическое развитие гибридного транспортного средства и вентильного электродвигателя.

1.1. Этапы развития транспортных средств

Пробное создание электроавтомобиля были обозначены в первой половине XIX века. Автомобиль с ДВС появляются примерно лет через 60. В конце XIX и начале XX веков, автомобиль с ДВС перестают занимать свои лидирующие позиции. Больше всего в то время выпускалось автомобилей, которые содержали электрический или паровой двигатель. Примерно тогда и появляются гибридные электромобили [1].

Примерно в одно время гибридные автомобили появились сразу в нескольких странах. И один из первых изобретателей, как считают многие, является Ф. Порше и он же организовал поточное производство таких автомобилей. Порше сконструировал автомобиль, в котором электродвигатель приводил в движение электрический генератор, который в свою очередь преобразовывал механическую энергию, производимую двигателем внутреннего сгорания, в электрическую [1].

Большее развитие гибридные и электрические автомобили приобрели в США. На то момент электрические автомобили больший успех, чем их конкуренты, такие автомобили с паровым двигателем или автомобили с ДВС. Так как не имели запаха, были не сильно шумные, без противного запаха, что в свою очередь было у двигателя внутреннего сгорания [1].

Но развитие двигателя внутреннего сгорания не стояло на месте. Устройство ДВС с каждым разом становилось лучше и они стали отодвигать автомобиль с электрическим двигателем с рынка. Такому росту послужило ещё и нахождение место рождения нефти в Техасе, что снизило стоимость топлива для ДВС. Так же появился стартер электрический, который решил проблему при запуске двигателя. Началась стройка новых дорог в большом количестве, что и привело к появлению у людей автомобилей способных проехать на большие расстояния, что не могли дать электрические автомобили [1].

Тогда массовым производством занимался Г. Форд, и его автомобиль стал доступным для большинства людей. Производители электрических автомобилей не смогли выдержать конкуренции с более дешёвым автомобилем с двигателем внутреннего сгорания и в конце двадцатых годов выпуск таких автомобилей прекратился [1].

И тут наступил кризис для электрических автомобилей, который длился не один десяток лет. Небольшой импульс для их развития послужил кризис нефти в нефтедобывающих странах в 1973 году, и арабские страны перестали продавать нефти США и вследствие того бензин подорожал. Тогда же стали проектировать новые электрические автомобили, но когда опять снизилась цена на бензин, то производители перестали экспериментировать с ними. Снова появилась конкуренция с двигателем внутреннего сгорания, и он победил. Поддержка для электрического двигателя подоспела со стороны экологии. Из-за бурного роста числа автомобилей и из-за выхлопных газов, которые привели к загрязнению воздуха. Многие страны ввели ограничения, сколько, может быть вредных веществ в автомобиле. Очень скоро такие ограничения в США установили обязательными на федеральном уровне. И так же за США последовали и многие другие страны. И производителям автомобилей ничего не осталось, как искать решения, чтобы соответствовать принятым законам. Что и поспособствовало быстрому прогрессу в электронике в семидесятых годах [1].

Спустя время экологи спрогнозировали глобальное потепление и самой главной причиной этого они заявили, что является углекислый газ, который попадает в воздух вместе с выхлопами от автомобиля. Производители автомобилей с ДВС поняли, что резко снизить выбрасываемый углекислый газ не получится [1].

В середине девяностых годов все вспомнили про электрические и гибридные автомобили, и началось их возрождение, которое длится и по сегодняшний день. Хотя в настоящее время количество гибридных и электрических автомобилей осталось не большим, но говорят о них много [1].

Гибридное транспортное средство – автотранспортное средство (автомобиль), которое снабжено электрическим и бензиновым двигателем. Каждый из них стоит для выполнения своей определенной задачи. У бензинового двигателя основной функцией является под зарядное устройство для аккумулятора или как для увеличения суммарной мощности потребляемой двигателем. А электродвигатель может работать на полную мощность и быстро разогнаться и когда от такой поездки он разряжается, то подключается бензиновый двигатель. Оба двигателя гармонично дополняют друг друга. Они могут использоваться и по отдельности и в сумме. Сущность гибридного автомобиля в том, что отсутствие тормозных колодок и инерционное торможение рекуперировано в подзарядку аккумулятора, и в результате повышается энергоэффективность.

Далее в таблице 1.1 представлены положительные и отрицательные стороны гибридного автотранспорта.

Таблица 1.1 – Положительные и отрицательные стороны гибридного транспортного средства

Положительные стороны	Отрицательные стороны
Гибриды более экономичны по сравнению со своими традиционными бензиновыми аналогами. Экономия топлива может достигать 30%.	Проблемы, связанные с правильной и безопасной утилизацией аккумуляторов. Вопрос утилизации подобных аккумуляторов остается одним из первостепенных при производстве гибридов.
Автомобили производят меньше выхлопных газов при рациональном использовании бензинового двигателя.	Завышенная стоимость аккумулятора, который используется в гибридном автомобиле, при его ограниченном сроке службы.
Гибридные автомобили по своим эксплуатационным характеристикам не уступают традиционным	Ремонт и техническое обслуживание гибридов дорогостоящее удовольствие, по сравнению с

автомобилям.	обслуживанием автомобилей традиционного типа.
Электродвигатели гибридов более совершенны по сравнению с электродвигателями электромобилей, что делает их экономически выгодными в эксплуатации.	Сложное устройство автомобилей не позволяет осуществлять ремонт самостоятельно, что удорожает их процесс эксплуатации.
Автомобиль может обеспечить больший пробег по сравнению с традиционными транспортными средствами	
В городских условиях гибриды можно использовать как электромобили.	

Невзирая на существующие недостатки, количество гибридных автомобилей увеличивается. Автопроизводители неустанно работают над усовершенствованием аккумуляторов и всего автомобиля, благодаря чему понижается стоимость и повышается срок работы гибридного автомобиля.

1.2. Развитие вентильного электропривода

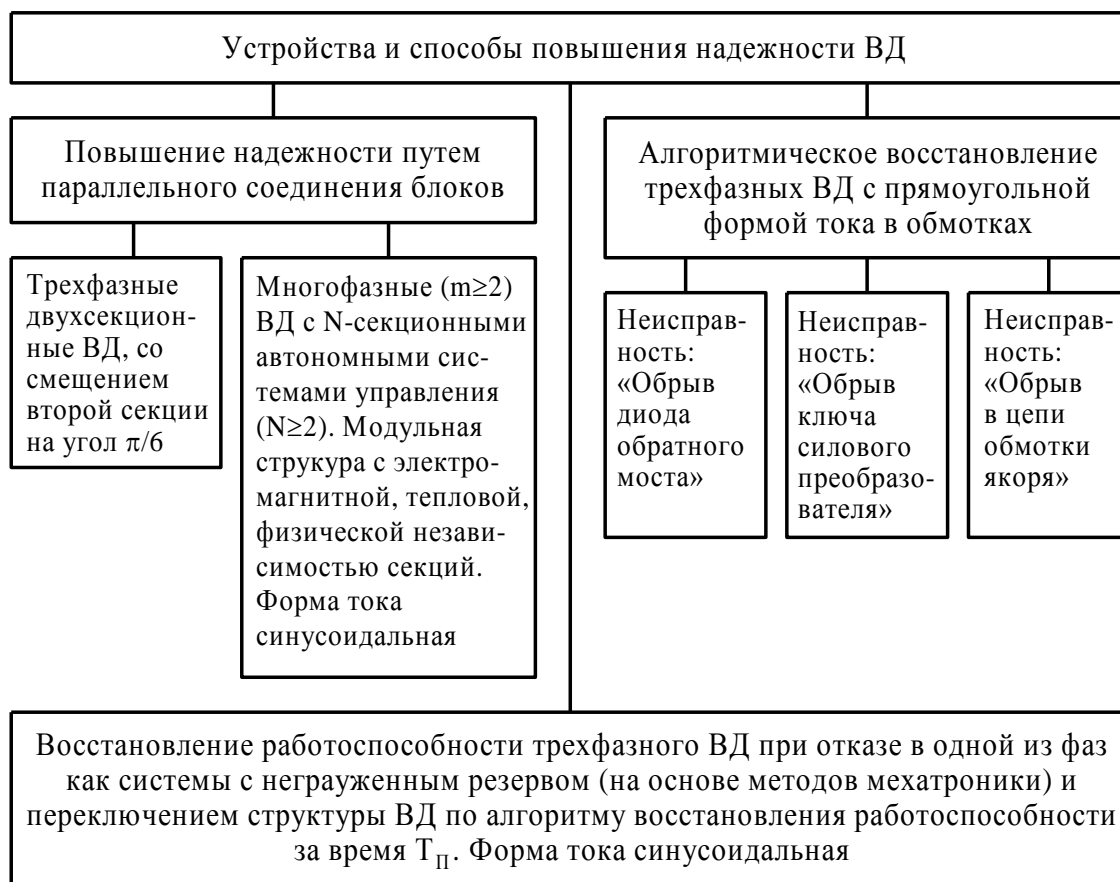
Вентильный электропривод – привод, в котором для электропитания двигателя и управления его угловой скорости применяется преобразователь управляемый электрическими вентилями то, есть управляемый преобразователь частоты (например: на IGPS транзисторах), питающий двигатель переменного тока, или управляемый выпрямитель, питающий ДПТ (двигатель постоянного тока).

Большинство фирм сейчас занимается производством таких электроприводов. Представление вентильных двигателей квалифицируется

большим диапазоном по мощности от единиц ватт до сотен киловатт, которые применяются для различных сфер промышленности.

В таблице 1.2. приведены известные устройства и способы повышения надежности ВД.

Таблица 1.2 – Устройства и способы повышения надежности ВД



Рассмотрели, что сделано в настоящий момент, в применение отказоустойчивого вентильного двигателя. Из предложенных вариантов нечего брать. Если мы возьмём три инвертора, то структура обычного гибридного двигателя получается в два раза больше, что не допустимо. То что нам предлагается, требует дополнительных аппаратных затрат и в стандартной конструкции автомобиля не может быть применено.

Известны ВД с высокой надёжностью с программной избыточной схемой управления, которые реализуют алгоритм восстановления при разных дефектах силовых цепей.

В ВД для механизмов космических станций с высокоточным управлением показана возможность восстановления работоспособности при неисправности типа: короткое замыкание и обрыв фазы. Надёжность обеспечивается диагностикой с последующим отключением отказавшей фазы и применением модульного подхода с выполнением электромагнитной, тепловой и физической независимости каждой фазы 6-фазного ВД [2].

Электропривод с системой преобразователь частоты синхронный двигатель (СД) можно обеспечить деятельность двухфазного режима работы трехфазного двигателя при неисправности «выход из строя силового транзистора». При обрыве, какой либо фазы ПЧ нейтральная точка статорной обмотки СД подключится к средней точке цепи постоянного тока, образованной конденсаторами, а ПЧ переводится в режим двухфазной работы с фазовым сдвигом между векторами фазных токов $\pi/2$ [3].

Существует вентильный электродвигатель [4], который позволяет повышать безошибочность работы при повреждении типа “обрыв диода обратного моста”. В таком вентильном двигателе содержится электрическая машина с индуктором, m -секционная обмотка якоря, преобразователь частоты с управляемыми ключами и диодами обратного моста, блок формирования сигналов управления, $2m$ триггеров Шмитта, блок запрета с $2m$ – управляющими входами.

Когда преобразователь частоты работает исправно, то по сигналам блока формирования сигналов управления происходит периодическое подключение и выключение от него комбинаций секций обмотки якоря электрической машины при помощи ключей. Обратный мост в котором диоды необходимы для замыкания коммутационного тока. Если перестаёт работать какой либо диод, то возникает перенапряжение в одном из ключей ПЧ и сработает соответственный триггер Шмитта, обесточивающий все ключи ПЧ помимо того где появилось перенапряжение. Таким образом происходит защита от пробоя данного ключа и увеличивается надёжность всего электродвигателя.

Обрыв ключа в преобразователе частоты ВД не будет безусловным отказом. ВД будет сохранять рабочее состояние, но при этом ухудшаются электро-механические характеристики из-за того, что какая-нибудь из секций обмотки якоря не подключается к источнику электрической энергии. В ВД развивается пусковой момент, но не во всех положениях индуктора синхронной машины. Там где положение индуктора, при котором ВД не получает пускового момента называют «мёртвыми точками».

Преимущество и недостатки вентильных электродвигателей, представлены в таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Преимущества и недостатки ВД

Преимущества	Недостатки
Не связность и отсутствие узлов, требующих обслуживания.	Необходимость наличия специального датчика положения ротора.
Большая перегрузочная способность по моменту.	
Высокое быстродействие.	
Наивысшие энергетические показатели (кпд и \cos). КПД ВД превышает 90% и практически не меняются с увеличением нагрузки и при изменении напряжения сети.	
Диапазон регулирования частоты вращения 1:10000 и более.	
Российскими специалистами запатентован способ управления вентильными электроприводами мощностью до 160 кВт без датчика положения ротора.	

2. Техническое решение по обеспечению отказоустойчивого вентильного двигателя для гибридного транспортного средства

2.1. Устройство гибридного транспортного средства

Функциональная схема гибридного транспортного средства с отказоустойчивым вентильным электроприводом, представлена на рисунке 2.1.1.

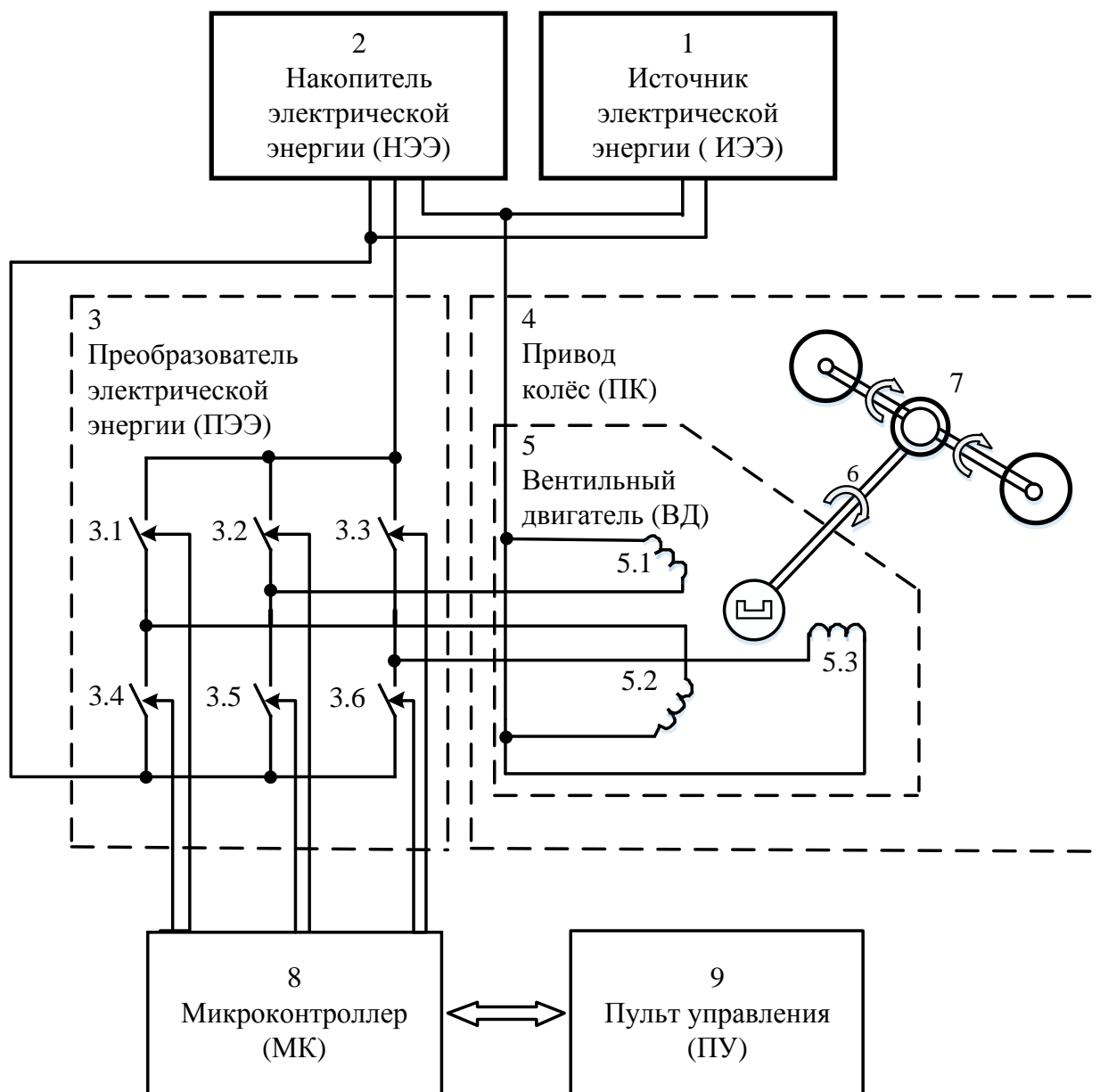


Рисунок 2.1.1 - Функциональная схема гибридного транспортного средства с отказоустойчивым вентильным электроприводом

где 3.1 – 3.6 – транзисторные ключи, на IGBT транзисторах,
5.1 – 5.3 – статорные обмотки ВД, 6 – вал вращения ВД,
7 – дифференциальная передача

Источник электрической энергии 1 (ИЭЭ) может быть выполнен в виде последовательно соединенных: двигателя внутреннего сгорания, выпрямителя и генератора.

Накопитель электрической энергии 2 (НЭЭ) содержит последовательно соединенные между собой две аккумуляторные батареи.

Преобразователь электрической энергии 3 (ПЭЭ) содержит три полумоста, которые выполнены на транзисторных ключах 3.1 – 3.6.

Первый 3.1, второй 3.2 и третий 3.3 ключи соединены и подключены к положительному выводу накопителя электрической энергии 2 (НЭЭ). Четвёртый 3.4, пятый 3.5 и шестой 3.6 ключи соединены и подключены к минусовому выводу накопителя электрической энергии 2 (НЭЭ).

Привод колёс 4 (ПК) содержит вентильный двигатель 5 (ВД) со статорными обмотками 5.1–5.3, которые подключены схеме звезда. Вторые выводы статорных обмоток 5.1–5.3 подключены к выходам трех полумостов образованных транзисторными ключами 3.1–3.6.

Нулевые провода обмоток вентильного двигателя 5 подключены к накопителю электрической энергии 2 (НЭЭ).

Вал 6 вентильного двигателя 5 (ВД) соединен с валами вращения колес транспортного средства через дифференциальную передачу 7.

Управляющие входы ключей 3.1–3.6 соединены через стандартные узлы оптронной развязки с выходами блока микроконтроллера 8 (МК) подключенного к пульту управления 9 (ПУ). Пульт управления 9 (ПУ) состоит из монитора, педалей и руля.

2.2. Принцип работы гибридного автомобиля

Гибридное транспортное средство работает так:

1. Водитель гибридного транспортного средства с помощью пульта управления 9 (ПУ) съёмным ключом зажигания подает на

микроконтроллер 8 (МК) сигнал включения источника электрической энергии 1 (ИЭЭ) электропитания гибридного транспортного средства. Начинается процесс движения.

2. Микроконтроллер 8 (МК) подает управляющий сигнал на преобразователь электрической энергии 3 (ПЭЭ) для его подключения к силовым аккумуляторам накопителя электрической энергии 2 (НЭЭ) и преобразования постоянного напряжения указанных аккумуляторов в переменное трёхфазное напряжение.

3. Водитель включает направление движения гибридного транспортного средства рычагом «вперед – назад».

4. Во время выполнения пункта 3 микроконтроллер 8 (МК) через пульт управления 9 (ПУ) подает сигнал для переключения статорных обмоток 5.1 – 5.3 вентильных двигателей 5 (ВД) в выбранное направление вращения привода колёс 4 (ПК).

5. Далее водитель педалью скорости движения гибридного транспортного средства задает через микроконтроллер 8 (МК) на преобразователь электрической энергии 3 (ПЭЭ) частоту трёхфазного напряжения, которая пропорциональна скорости вращения привода колёс 4 (ПК). При этом трёхфазное напряжение определённой частоты преобразователя электрической энергии 3 (ПЭЭ) подается одновременно на статорные обмотки 5.1–5.3, передних и/или задних привода колёс 4 (ПК) в зависимости от выбранного водителем режима движения в зависимости качества дорожного полотна и ограничений по скорости.

6. При нажатии педали для торможения микроконтроллер 8 (МК) выдаёт с помощью пульта управления 9 (ПУ) команду на преобразователь электрической энергии 3 (ПЭЭ) для переключения обмоток статора двигателей

5 на противоположное движение и для изменения частоты напряжения, которая пропорциональна силе нажатия на педаль тормоза.

7. В момент выполнения пункта 6 двигатель 5 (ВД) переходит на режим генерации электроэнергии, т.е. преобразования при торможении колёс энергии инерции гибридного транспортного средства в электрическую энергию. При этом электроэнергия торможения с обмоток двигателя 5.1–5.3 через преобразователь электрической энергии 3 (ПЭЭ) и накопитель электрической энергии 2 (НЭЭ) возвращается для подзарядки его силовых аккумуляторов.

8. Когда возникает авария в двигателе например, обрыв фазы обмотки статора двигателя 5.1–5.3 происходит падение мощности, падает скорость. Тогда через управляющий вход микроконтроллера 8 (МК) поступает информация о снижении потребления тока преобразователем электрической энергии 3 (ПЭЭ) и на пульте управления 9 (ПУ) появляется информация об аварии и о доступном остаточном запасе по мощности приводного двигателя 5. Скорость движения уменьшается. Водитель либо продолжает движение с учётом ограничений по мощности или если ресурс мощности позволяет, то водитель педалью скорости движения компенсирует потери на 33%.

9. Если же водитель пускает гибридное транспортное средство, то если не была устранена авария, то и движение гибридного транспортного средства не отличается от нормальной эксплуатации, с учетом ограничений по сниженной мощности привода колёс 4 (ПК), которая сохраняется в микроконтроллере 8 (МК) и выводится на пульт управления 9 (ПУ).

2.3. Виды аккумуляторных батарей применяемых в технике

На данный момент эволюция технологий вплотную связана с модернизацией аккумуляторов. Они необходимы для электромобилей, новых портативных устройств или для систем бесперебойного питания. Скоро на смену старым придут новые типы аккумуляторов.

В настоящее время для производства электромобилей применяют:

- свинцово-кислотные батареи
- литий ионные
- натрий никель-хлоридные
- никель-кадмиевые
- щелочные
- никель-металлогидридные
- суперконденсаторы
- топливные элементы

Стоимость аккумуляторной батареи для электромобилей довольно актуальный вопрос. Аккумуляторы одна из основных расходных частей, вследствие этого необходимо минимизировать расходы на замену аккумуляторной батареи при выборе и расчётах двигателя.

Первыми вторичными химическими источниками тока стали свинцово-кислотные аккумуляторы. Они до шестидесятых годов этого столетия были единичными источниками энергии для маленького количества электромобилей. Невзирая на улучшения энергетических показателей, эти батареи не удовлетворяют требования электромобиля, с конкурентоспособностью автомобиля.

Началось создание новых более эффективных источников тока с большим энергетическим, экономическим и экологическим высоким показателем. Для решения этих проблем появилось два варианта: первый – воспользоваться каким-либо элементом топливного, работа над которым достигла в то время наибольшей интенсивности, и второе – создание электрического аккумулятора на одном из основных электрохимических систем с энергетическими показателями, которые соизмеримы с показателем для карбюратора двигателя. Создание топливного элемента и нового электрического аккумулятора привело к сложным проблемам, и для их решения уровень знания и технологического прогресса были не достаточны. Благодаря этому наметилось частичное решение проблем, например, улучшить энергетические и эксплуатационные характеристики промышленной батареи и использование в электромобиле.

Разработчики стали снова привлекать железоникелевый и свинцово-никелевый аккумулятор. В этом направлении успехи, основанные на лучшем понимании фундаментальных механизмов работы электрохимических систем, стали существенными.

Базовым осложнением при использовании аккумуляторов служит недостаточная обращаемость химических процессов, вследствие которых в устройстве скапливаются побочные продукты. Появляется так называемый «эффект памяти», когда при частичной разрядке аккумулятора емкость следующего заряда уменьшается. Преимущественно к этому склонны никель-кадмиевые аккумуляторы. «Эффект памяти» существует в меньшей степени, в никель-металлгидридных и в литий-ионных аккумуляторах.

На данный момент применяют в основном литий-ионные аккумуляторы. Эти аккумуляторы, при их достоинствах связанных сравнительно не маленькими размерами, страдают от изменения характеристик со временем. Большинство аккумуляторов не служит более пяти лет. Количество зарядно-разрядных циклов не так влияют на ресурс, как возраст, при коротком времени цикла заряда и разряда, батарея выдерживает до 2000 циклов. Для достижения максимальной длительности эксплуатации аккумулятора, при заряде необходимо использовать токи равные половине емкости. И нежелательно превышать предел в одну ёмкость, так как это приводит к резкому сокращению срока службы.

2.4. Расчёт аккумуляторной батареи для гибридного автомобиля

При быстром разряде часть ионов не успевает войти из электролита в электрод или, наоборот, за время разряда, что ограничивает выдаваемую аккумулятором емкость. Математическая модель этого процесса была представлена Пекертом в 1897 году [5]. Он установил, что связь между временем разряда аккумулятора T и разрядным током I (от полностью заряженного к полностью разряженному) представляет собой отношение:

$$C_p = I^n \cdot T \quad (2.4.1)$$

где C_p – емкость Пекерта; n – экспонента Пекерта.

n всегда больше единицы, чем больше экспонента Пекерта, тем слабее возможность аккумулятора передавать всё емкость при большой нагрузке. Она просчитывается из принципа измерения времени полного разряда (T_1 и T_2) для двух токов (I_1 и I_2). Для приближенных расчетов можно применять графики или таблицы разрядки. Отсюда:

$$C_p = I_1^n \cdot T_1 = I_2^n \cdot T_2 \quad (2.4.2)$$

конвертируя выражение, получим формулу для экспоненты Пекерта:

$$n = \log(T_2 / T_1) / \log(I_1 / I_2) \quad (2.4.3)$$

Зная смысл n и C_p записывается формула для времени когда аккумулятор работает с нагрузкой:

$$T = C_p / I^n \quad (2.4.4)$$

Для литий-ионных аккумуляторов 1,3 – 1,6.

При вычислении необходимой нам батареи зададимся тем, что наш автомобиль применяется для города. Где в городе есть пробки, светофоры. Он будет ехать с обычной скоростью 60 км/час и путём 120 км время поездки 2 часа.

При умеренном токе использования автомобилем 50А вычислим C_p :

$$C_p = I^n \cdot T = 2 \cdot 50 = 100 \text{ А} \cdot \text{ч} \quad (2.4.5)$$

Из представляемого ряда стандартных аккумуляторов выберем для использования в проекте батарею емкостью 140 А·ч. В накопителе электрической энергии 2 (НЭЭ), будем использовать аккумуляторные батареи типа VARTA Promotive Blue 640 400 080 K8 (с нижним "бортиком"), которая представлена на рисунке 2.1 [6].

Количество модулей в батарее – 40. Количество сегментов в модуле – 6. Итого 240 сегментов. Напряжение в сегменте – 1,2 В. Суммарное напряжение $U_6 = 240 \cdot 1.2 = 288\text{В}$.



Рисунок 2.1 – Аккумуляторная батарея типа VARTA Promotive Blue 640

2.5. Расчёт и выбор вентиляционного электродвигателя для гибридного транспортного средства

Рассчитываем мощность двигателя, задаваясь данными электроавтомобиля (автомобиль Toyota Prius-3) и данным заданием: масса автомобиля – 1530 кг; коэффициент трения об асфальт – 0.1; коэффициент обтекаемости кузова – 2; площадь лобового сопротивления – 2 м²; максимальная скорость движения 160 км/час = 45 м/с.

$$P = g \cdot K_{\text{тр}} \cdot m \cdot V + K_{\text{ок}} \cdot S \cdot V^2 + g \cdot m \cdot \sin\alpha \quad (2.5.1)$$

где g – ускорение свободного падения [м/с²]; $K_{\text{тр}}$ – коэффициент трения об асфальт; m – масса автомобиля [кг]; V – скорость движения [м/с];

$K_{\text{ок}}$ – коэффициент обтекаемости; S – лобовая площадь [м²]; α – угол наклона дорожного полотна равен 20 градусов. В формулу (2.4.1) подставляем численные значения и находим мощность двигателя:

$$P = 9.8 \cdot 0.1 \cdot 1525 \cdot 45 + 2 \cdot 2 \cdot 45^2 + 9.8 \cdot 1525 \cdot \sin 20 = 79,046 \text{ кВт}$$

На основе расчётной величины мощности двигателя, можно выбрать вентиляционный двигатель мощностью 80 кВт. Из ряда двигателей выбираем наиболее близкий по мощности, двигатель марки DST315L54W20-5. Технические данные двигателя, представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Технические данные двигателя марки DST315L54W20-5

Номинальная мощность $P_{\text{ном}}$, кВт	80
КПД, %	0.918
$\cos\varphi$, о.е.	0.92
Номинальное напряжение, В	380
Номинальный ток, А	156
Момент инерции, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$	0.76
Степень защиты	IP54
Синхронное индуктивное сопротивление обмотки, $X_c = X_d = X_q$, Гн	0,0914
Сопротивление рассеяния обмотки, X_p , Гн	0,0293
Сопротивление фазы обмотки, R_ϕ , Ом	0,00329
Постоянная противо-ЭДС K_E , $\text{В} \cdot \text{об} \cdot \text{мин}^{-1}$	161

Конструкция двигателя, представлена на рисунке 2.2.

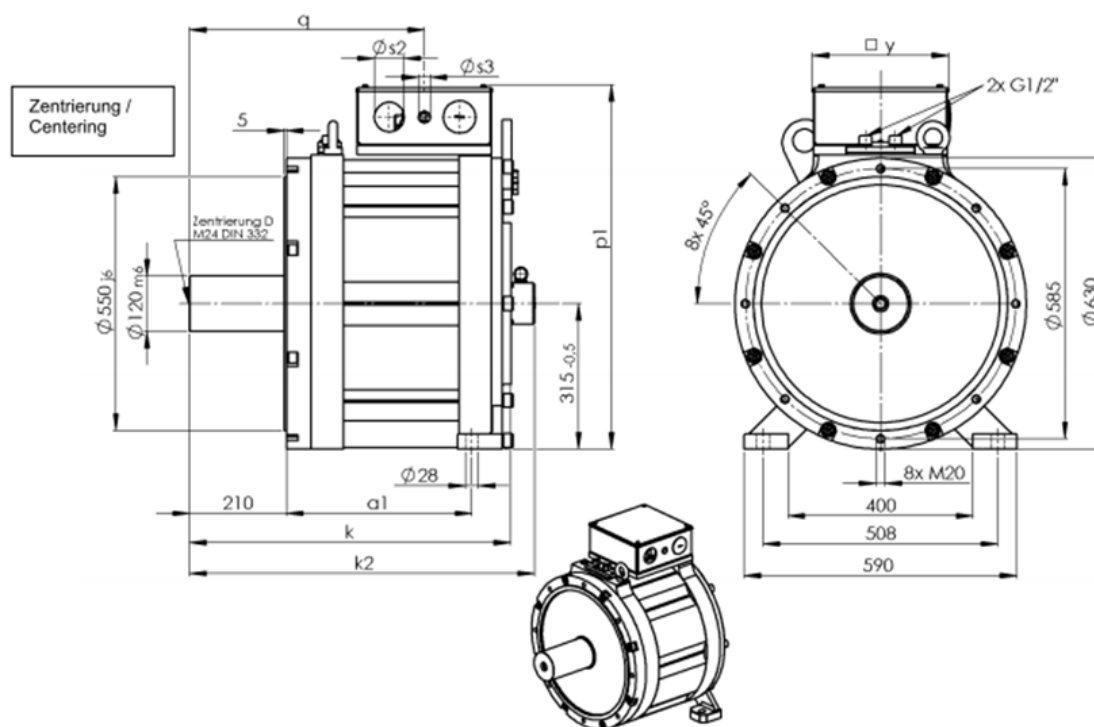


Рисунок 2.2 – Конструкция двигателя DST315L54W20-5

2.6. Статические механические характеристики

Что бы построить механические характеристики необходимо рассмотреть соотношение между моментом и частотой вращения двигателя постоянного

тока. В двигателе, где для создания магнитного потока используют постоянные магниты, представляется в упрощенной эквивалентной схеме замещения, которая представлена на рисунке 2.3. Сопротивление якоря R_α и противо-ЭДС E соединены на схеме последовательно.

Если пренебречь падением напряжения в щёточно-коллекторном узле, то уравнение баланса напряжений на зажимах двигателя имеет вид:

$$U = R_\alpha I_\alpha + K_E \Omega \quad (2.6.1)$$

Ток якоря:

$$I_\alpha = (U - K_E \Omega) / R_\alpha \quad (2.6.2)$$

Момент:

$$M = K_T I_\alpha = \frac{K_T}{R_\alpha} (U - K_E \Omega) \quad (2.6.3)$$

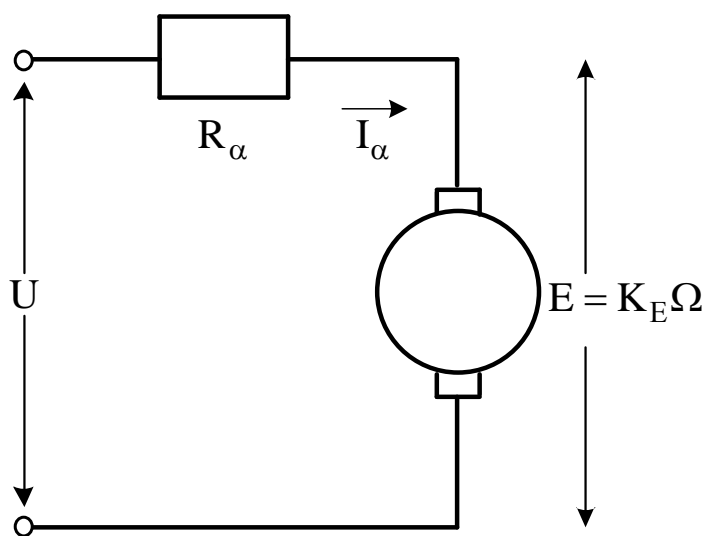


Рисунок 2.3 – Эквивалентная схема замещения коллекторного двигателя постоянного тока

Постоянные момента и ЭДС в точности равны между собой, их значения представлены в таблице 2.2 [7].

Таблица 2.2. Преобразование единиц измерения для постоянного момента и ЭДС

Постоянная момента K_T		Постоянная противо-ЭДС K_E	
$\text{Н} \cdot \text{м} \cdot \text{А}^{-1}$	$\text{кг} \cdot \text{А}^{-1}$	$\text{В} \cdot \text{с} \cdot \text{рад}^{-1}$	$\text{В} \cdot \text{об} \cdot \text{мин}^{-1}$
1.5377	6.17288	1.5377	161
1	4.01436	1	104.7
0.09807	0.3938	0.09807	10.27
0.07061	0.02835	0.007061	0.7394
0.009549	0.03833	0.009549	1

Нужно отметить, что K_T и K_E равны друг другу, когда они определены в единой системе единиц. Такая система единиц является международной системой СИ. Например, если $K_T = 1.5377 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{А}^{-1}$, то и $K_E = 1.5377 \text{ В} \cdot \text{с} \cdot \text{рад}^{-1}$, данные цифры представлены в таблице 2.2. Пример с постоянными был рассмотрен на данных, для выбранного ранее двигателя марки DST315L54W20-5, у которого $K_E = 161 \text{ В} \cdot \text{об} \cdot \text{мин}^{-1}$ по паспортным данным и из таблицы выбирается соответствующее значение K_E и K_T для системы СИ. В международной системе единиц частота вращения измеряется в $\text{рад} \cdot \text{с}^{-1}$, однако эта единица не всегда используется, так как один оборот в секунду будет равен $6.28 \text{ рад} \cdot \text{с}^{-1}$. Часто на практике для измерения частоты вращения двигателя используется единица измерения оборот в минуту (об/мин). В промышленности принята единица измерения постоянной ЭДС, равная $\text{В} \cdot \text{об} \cdot \text{мин}^{-1}$. С учётом этой единицы по известному значению постоянной ЭДС K_E определяем с помощью таблицы 2.2 определяем постоянную момента K_T . В теории электрических машин [7]:

$$K_T = K_E = K \quad (2.6.4)$$

где K коэффициент постоянной двигателя.

Для коллекторных двигателей постоянного тока K_T и K_E соотносятся между собой таким образом, что правая и левая части таблицы 2.2

соответствуют друг другу. Поэтому если $K_E = 1 \text{ В} \cdot \text{с} \cdot \text{рад}^{-1}$, то автоматически $K_T = 1 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{А}^{-1}$ [7].

На рисунке 2.4 показано соотношение между напряжением моментом и частотой вращения при напряжении питания двигателя постоянного тока. При увеличении частоты вращения момент линейно уменьшается. Наклон этой функции $K_T K_E / R_\alpha$ постоянный и не зависит от значения напряжения питания и частоты вращения двигателя. Благодаря такой характеристики упрощается управление частотой вращения и углом поворота двигателей постоянного тока. Это характерно для коллекторных и вентильных двигателей постоянного тока, что нельзя сказать о двигателях переменного тока и шаговых двигателях [7].

Момент рассчитываем по формуле (2.6.3) с учётом, что наклон функции $K_T K_E / R_\alpha$ постоянен и не зависит о напряжения [7].

Частота вращения холостого хода (хх) – это часто вращения двигателя при отсутствии потерь в подшипниках. Частоту вращения хх определяем из выражения [7]:

$$\Omega_{\text{хх}} = \frac{U}{K_E}, \text{рад/с} \quad (2.6.5)$$

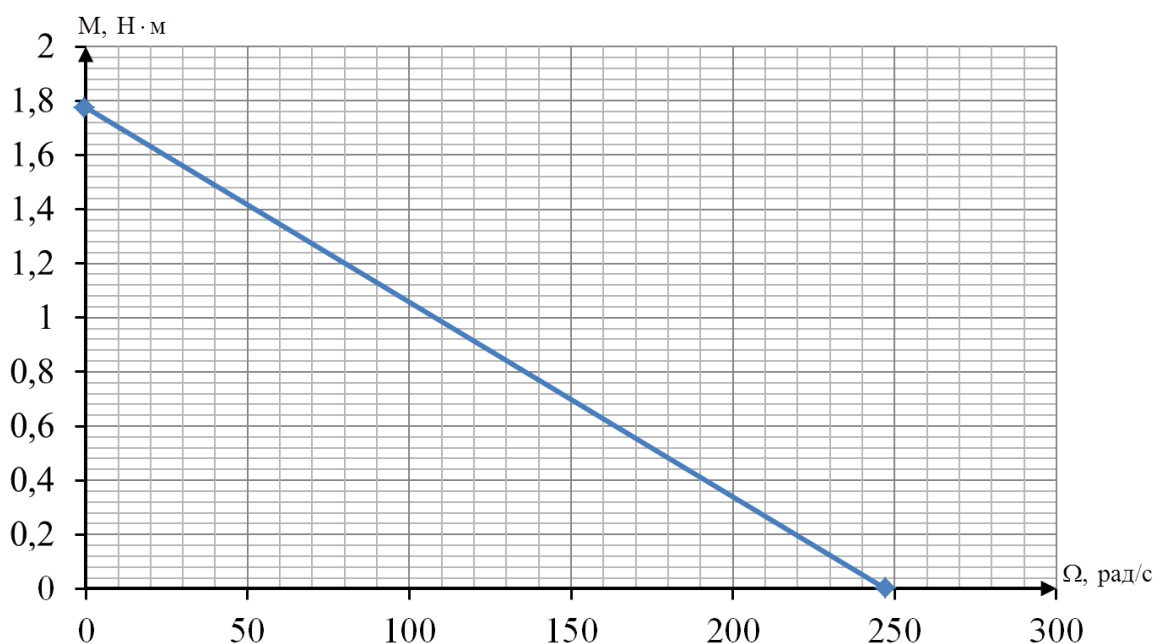


Рисунок 2.4 – Зависимость момента от частоты вращения двигателя постоянного тока

2.7.Выбор транзистора для ПЧ

Мощность, которая приходится на три фазы двигателя DST315L54W20-5, обозначим $P_{3\phi}$, она равна 80 кВт. Рассчитаем мощность, которая приходится на одну фазу, и обозначим её $P_{1\phi}$:

$$P_{1\phi} = \frac{P_{3\phi}}{3} = \frac{80}{3} = 27\text{кВт} \quad (2.7.1)$$

Находим действующий ток:

$$I_{д} = \frac{P_{1\phi}}{U_{\phi}} = \frac{27000}{288} = 94\text{А} \quad (2.7.2)$$

Рассчитываем импульсный ток:

$$I_{имп} = I_{д} \cdot \sqrt{2} = \sqrt{2} \cdot 94 = 133\text{А} \quad (2.7.3)$$

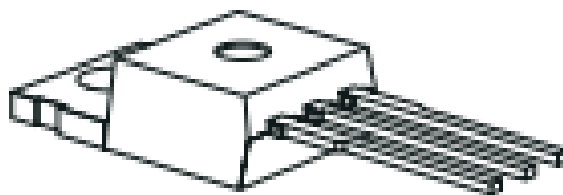
Находим пусковой ток:

$$I_{п} = I_{имп} \cdot k_{п} = 3 \cdot 133 = 399\text{А} \quad (2.7.4)$$

Принимаем коэффициент нагрузки равный $k_{н}=60\%$ и рассчитываем ток транзистора:

$$I_{тр} = I_{п} \cdot \frac{1}{k_{н}} = 399 \cdot \frac{1}{0.6} = 665\text{А} \quad (2.7.5)$$

При выборе транзистора учитываем, что необходим запас по напряжению в два раза, т.е. $U_{тр} = 2 \cdot U_{\phi} = 2 \cdot 288 = 576\text{В}$. Из стандартного ряда IGBT транзисторов выбираем IGBT транзистор фирмы Infineon выполненный по NPT технологии типа SKP15N60. Этот транзистор быстродействующий с обратным диодом, тип корпуса такого транзистора представлен на рисунке 2.5.



TO-220AB

Рисунок 2.5 – Корпус IGBT транзистора SKP15N60

Схема преобразователя частоты – двигатель, представлена на рисунке 2.6.

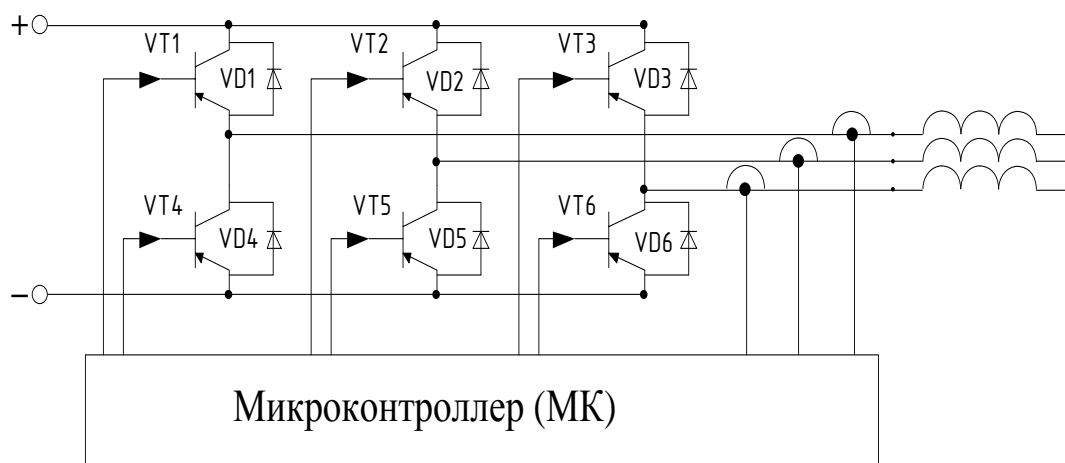


Рисунок 2.6 – ПЧ – двигатель

2.8.Обоснование возможности работы трёхфазного вентильного двигателя в аварийном двухфазном режиме

В качестве примера рассмотрен способ реализации двухфазного режима работы вентильного двигателя на основании диссертации «Микроконтроллерное управление вентильным двигателем в аварийном режиме» автора Однокопылова Г.И.. Рассмотрение данной работы необходимо для реализации работы гибридного транспортного средства при обрыве одной из фаз двигателя .

Обеспечение отказоустойчивого управления ВД предполагает его работу в аварийном двухфазном режиме работы [8].

Наиболее интересным представляется для рассмотрения процесс алгометрического восстановления работоспособности трёхфазного ВД на основе микроконтроллерной системы управления.Что бы решить данную задачу необходимо обеспечивать выбор и обоснование угла нагрузки в аварийном двухфазном режиме работы [8].

На рисунке 2.7 приводится схема замещения синхронного двигателя при обрыве фазы «В», которой в установившемся режиме соответствуют уравнения в комплексной форме (2.8.1) на основе которых была разработана расчётная модель (2.8.2) в тригонометрической форме [8]:

$$\begin{aligned}\dot{U}_A &= \dot{I}_A \cdot r + j \cdot \dot{I}_A \cdot X_S + j \cdot \dot{I}_A \cdot X_A - j \cdot \dot{I}_C \cdot X_M - \dot{E}_A \\ \dot{U}_C &= \dot{I}_C \cdot r + j \cdot \dot{I}_C \cdot X_S + j \cdot \dot{I}_C \cdot X_A - j \cdot \dot{I}_A \cdot X_M - \dot{E}_C\end{aligned}\quad (2.8.1)$$

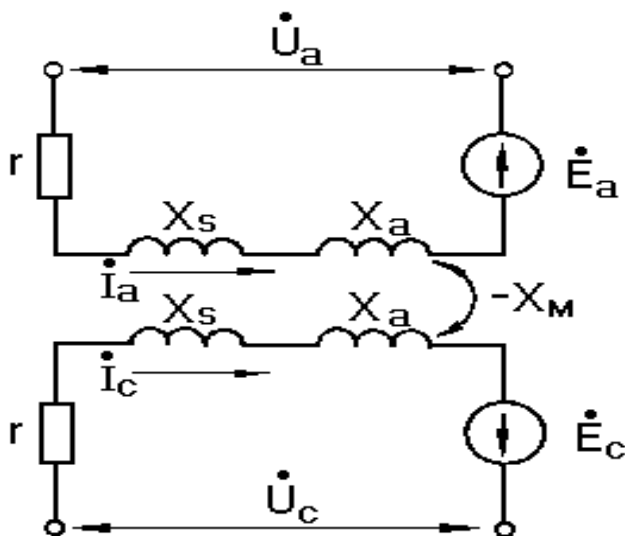


Рисунок 2.7 – Схема замещения синхронного двигателя при обрыве фазы «В»

В трёхфазном режиме ВД угол нагрузки задаётся углом θ и электромагнитный момент имеет максимум при максимуме активной мощности для углов $\theta_A = \theta_B = \theta_C = \pi/2$. В двухфазном режиме ВД углы θ_A и θ_C будут разными, т.к. отличаются в общем случае вектора фазных напряжений \dot{U}_A и \dot{U}_C по амплитуде, а их фазовые сдвиги φ_A и φ_C относительно векторов тока могут иметь разные знаки. Поэтому построение системы управления ВД в двухфазном режиме с использованием углов θ_A и θ_C в качестве параметров, определяющих максимум момента нецелесообразно, так как это приведет к неоправданному усложнению системы управления электроприводом. Что доказывает скоростная характеристика ВД в аварийном двухфазном режиме аварийном, полученная из соотношения вытекающие из уравнений (2.8.1) имеющая вид [8]:

$$n = - \frac{60 \langle U_C \cdot \cos \theta_C - U_A \cdot \cos \theta_A + I \cdot r \cdot [\cos \psi_A - \cos(\pi/6 - \psi_A)] \rangle}{pI \langle (L_A + L_C) \cdot [\cos(\psi_A + \pi/6) + \sin \psi_A] - 2M \cdot \cos(\psi_A - \pi/6) \rangle}$$

Выбор и оптимизация значения угла нагрузки в аврийном двухфазном режиме могут быть выполнены на основе статической модели расчёта суммарных суммарных активной и реактивной мощностей ВД:

$$\left\{ \begin{array}{l} u_A = I_{AM} \cdot \sin(\omega t + \pi + \psi_A) \cdot r + I_{AM} \cdot \sin\left(\omega t + \frac{3\pi}{2} + \psi_A\right) \cdot (L_A + L_S) \cdot \omega + \\ + \text{sign}(\varphi_C) \cdot I_{CM} \cdot \sin\left(\omega t + \frac{5\pi}{6} + \psi_A\right) \cdot \omega \cdot L_M + E_{AM} \cdot \sin(\omega t + \pi); \\ u_C = I_{CM} \cdot \sin\left(\omega t + \frac{4\pi}{3} + \psi_A\right) \cdot r + I_{CM} \cdot \sin\left(\omega t + \frac{11\pi}{6} + \psi_A\right) \cdot (L_A + L_S) \cdot \omega + \\ + \text{sign}(\varphi_A) \cdot I_{AM} \cdot \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2} + \psi_A\right) \cdot \omega \cdot L_M + E_{CM} \cdot \sin\left(\omega t + \frac{5\pi}{3}\right) \\ \text{sign}(\varphi) = 1, \text{ если } \varphi \geq 0; \text{ sign}(\varphi) = -1, \text{ если } \varphi < 0 \\ P_\Sigma = \frac{1}{2}(U_{AM} \cdot I_{AM} \cdot \cos \varphi_A + U_{CM} \cdot I_{CM} \cdot \cos \varphi_C) \quad Q_\Sigma = \frac{1}{2}(U_{AM} \cdot I_{AM} \cdot \sin \varphi_A + U_{CM} \cdot I_{CM} \cdot \sin \varphi_C) \end{array} \right. \quad (2.8.2)$$

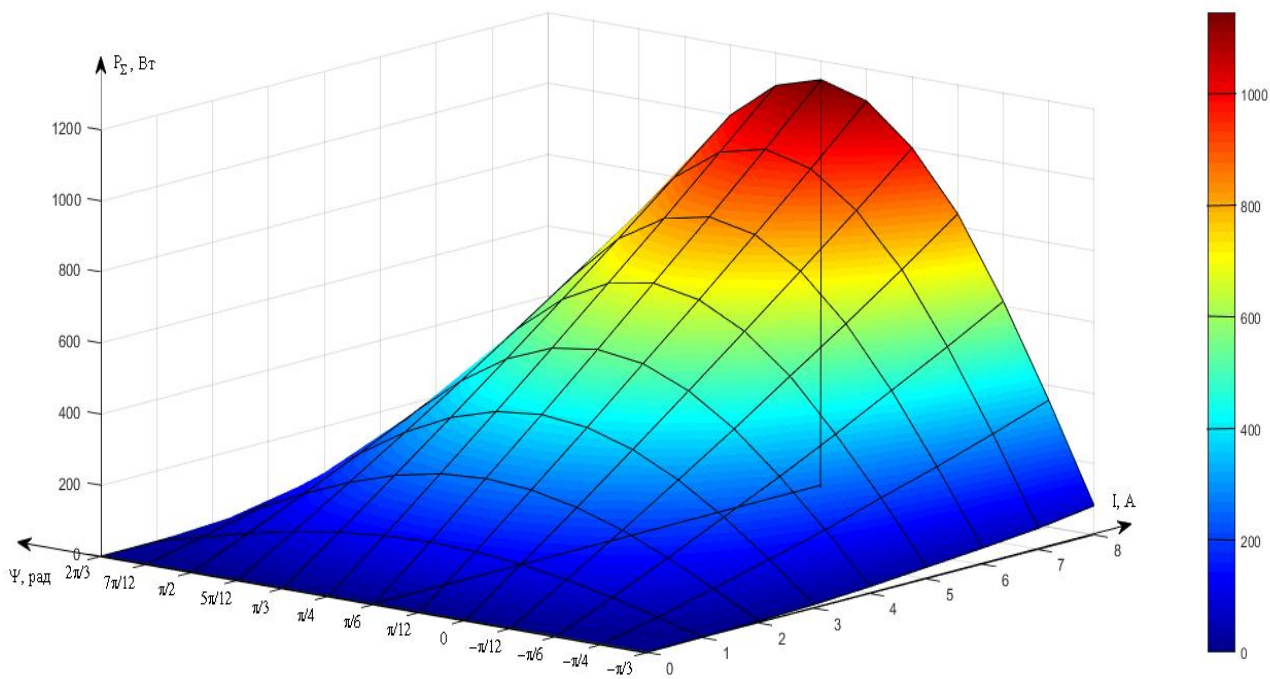
где I_{AM} , I_{CM} – амплитудные значения векторов фазных токов равной амплитуды (А), E_{AM} , E_{CM} – амплитудные значения векторов фазных ЭДС равной амплитуды (В), P_Σ – суммарная активная (Вт), Q_Σ – суммарная реактивная (Var). В результате расчетов были получены следующие функциональные зависимости для СД ДСТ-0,18: $P_\Sigma(I, \psi)$, $P_\Sigma(n, \psi)$, $Q_\Sigma(I, \psi)$, $Q_\Sigma(n, \psi)$, представленные на рисунке 2.8 а, б, в, г [8].

Двигатель СД ДСТ-0,18 в данной работе выбран в качестве примера, он более низкой мощности (по сравнению с двигателем необходимым для гибридного транспортного средства) и его можно исследовать, так как всё тоже самое возможно реализовать на двигателе любой мощности.

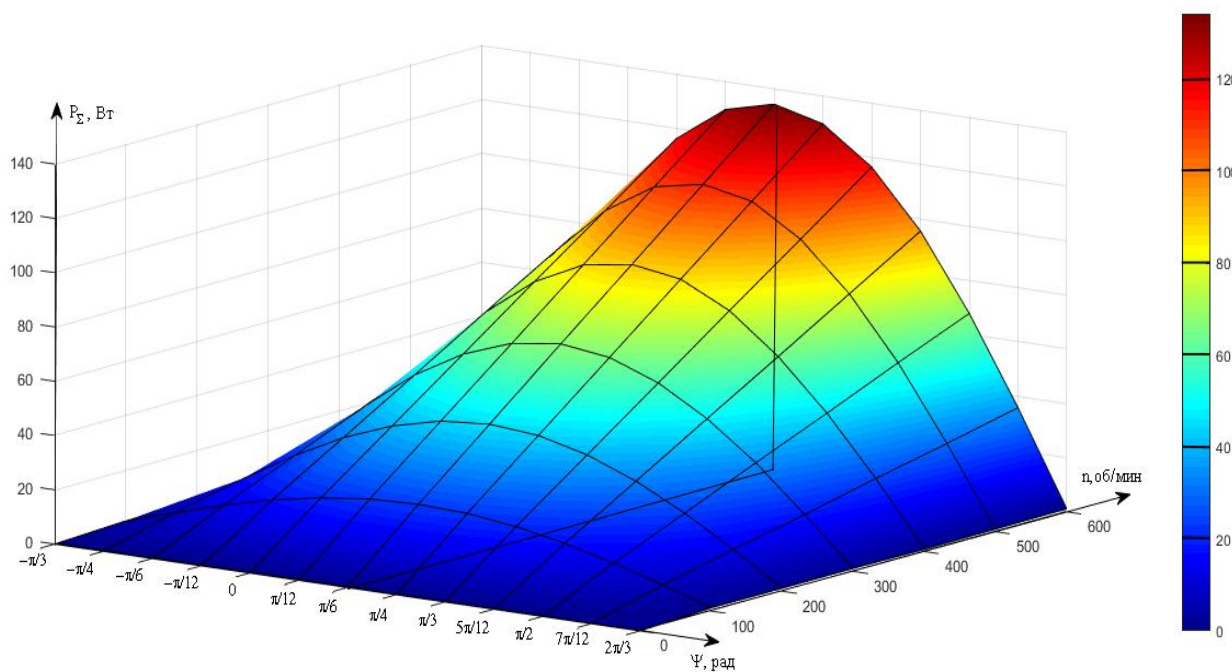
Как видно из рисунка 2.8 а, б угол ψ может быть сопоставлен сопоставлен с углом θ , определяющим максимум момента в трёхфазном режиме, по форме зависимости и диапазону изменения угла π радиан [8].

Для определения допустимых значений величины и знака погрешности задания угла ψ можно рассмотреть зависимость суммарной реактивной мощности от частоты вращения, тока и угла ψ на рисунке 2.8 в, г. Зависимость $Q_\Sigma(I, \psi)$ построена при условии $n=n_{\max}=6000$ (об/мин). Зависимость $Q_\Sigma(n, \psi)$ построена при: $I=1$ А. Для значений угла ψ в диапазоне $\pi/6 \dots \pi/3$ радиан функция пересекает нулевую плоскость. Спад активной мощности для зависимостей $P_\Sigma(I, \psi)$, $P_\Sigma(n, \psi)$ при изменении значения угла ψ_A в диапазоне

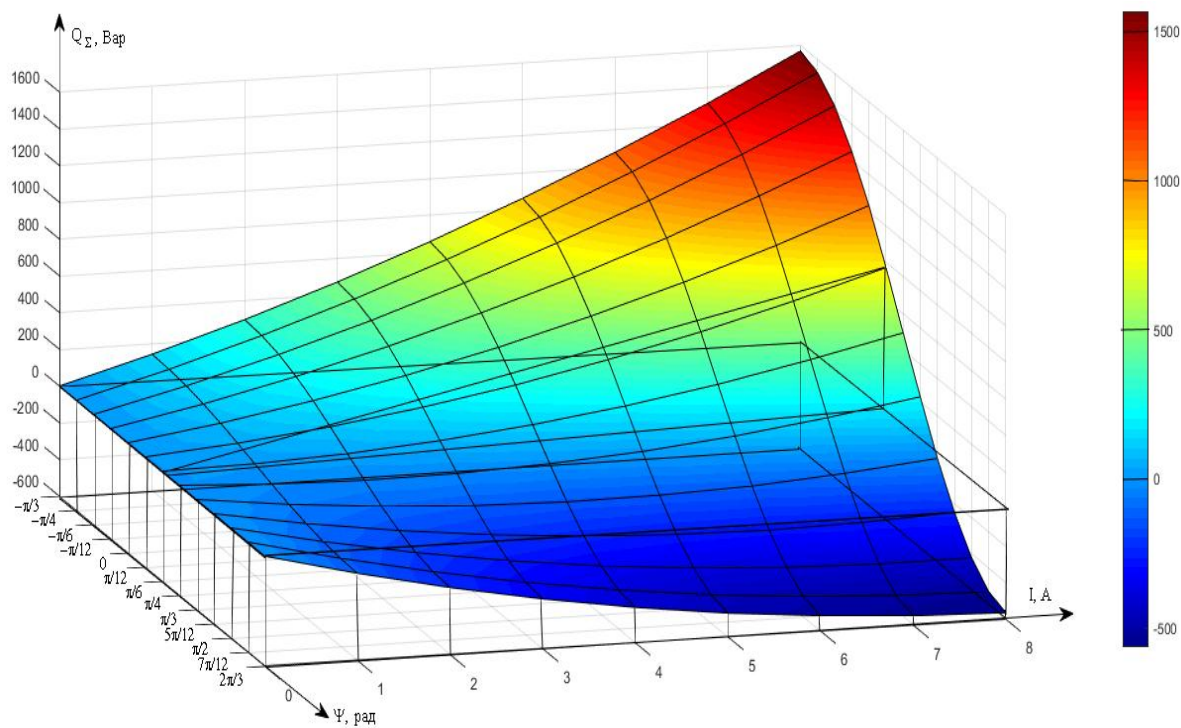
$\psi_A = \pi/6 \dots \pi/4$ радиан не превышает 5%. В силу этого в аварийном двухфазном режиме максимум активной при минимуме реактивной мощности ВД может быть определён в функции угла ψ_A в диапазоне значений угла $\psi_A = \pi/6 \dots \pi/4$. Зона предпочтительных рабочих параметров лежит в диапазоне $\psi_A \pm \delta\psi_A$, где $\delta\psi_A$ – погрешность задания угла ψ_A . С целью минимизации реактивной мощности необходимо выполнение условия: $\delta\psi_A < 0.1\psi_A$ и погрешность задания должна формироваться со знаком плюс.



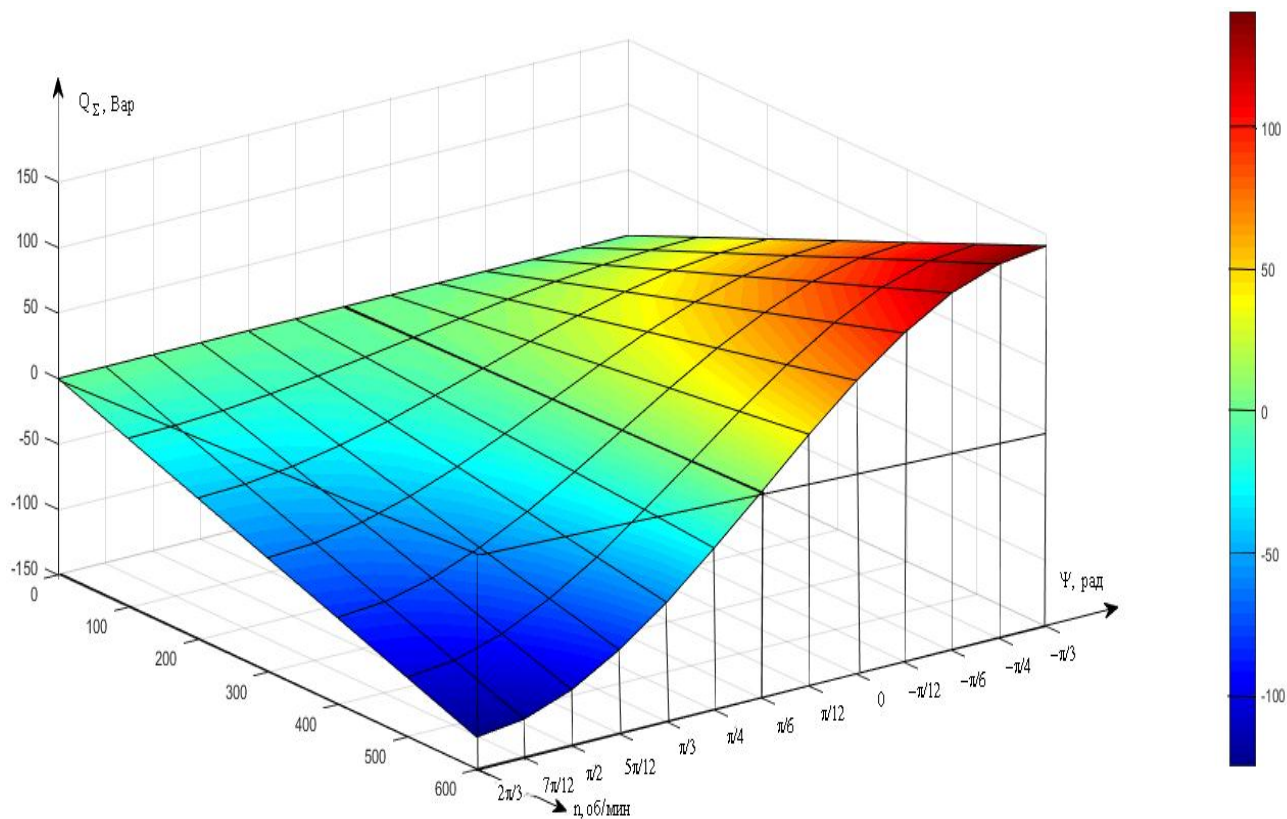
а



б



В



Г

Рисунок 2.8 – Зависимости суммарной активной и реактивной мощности ВД в аварийном двухфазном режиме: а – $P_{\Sigma}(I, \psi)$, б – $P_{\Sigma}(n, \psi)$, в – $Q_{\Sigma}(I, \psi)$, г – $Q_{\Sigma}(n, \psi)$

На рисунке 2.9 приведены временные диаграммы переходных процессов в аварийном двухфазном режиме трёхфазного ВД выполненного по схеме с развязанными фазами [9, 10] и полученные на основе экспериментальной испытательной установки [11] с алгоритмами восстановления работоспособности вентильного двигателя [12, 13].

На рисунке 2.8 видно, что при неконтролируемой аварийной ситуации момент двигателя с номинальной нагрузкой стремится к нулю и двигатель останавливается, при активизации алгоритма восстановления, включающего угол нагрузки $\psi_A = \pi / 6$, двигатель имеет кратковременный провал электромагнитного момента, что видно по диаграмме суммарного потребляемого тока I_Σ , двигатель продолжает работу с обеспечением отказоустойчивости при обрыве фазы.

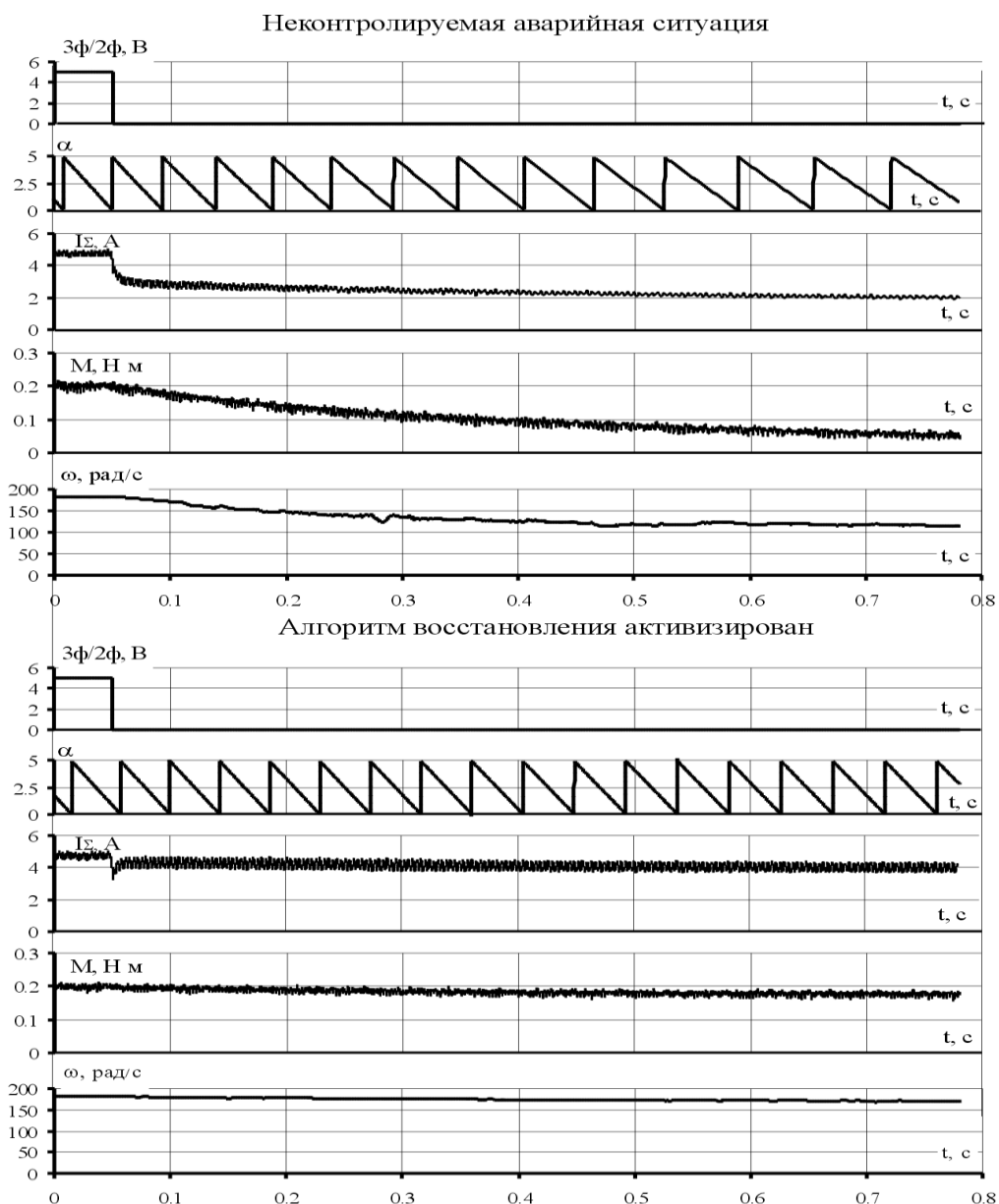


Рисунок 2.9 – Временные диаграммы переходных процессов в аварийном двухфазном режиме трехфазного ВД

1. В двухфазном режиме работы трехфазного ВД использование углов между обратными векторами ЭДС и векторами напряжений фаз в качестве параметров, определяющих максимум момента, приводит к усложнению системы управления ввиду их различия и зависимости от режима работы.

2. Получено на математической модели и экспериментально установлено, что использование угла между обратными векторами Э.Д.С. и вектором тока фазы одной из двух фаз в двухфазном режиме ВД позволяет получить максимум активной мощности, максимум момента для значений углов $\psi = \pi/6$, при этом активные мощности фаз равны, а максимум активной мощности не зависит от рабочей частоты и величины фазного тока.

3. Суммарная реактивная мощность в двухфазном режиме трехфазного ВД может принимать как положительные, так и отрицательные значения в функциях рабочей частоты, тока. При $\psi = \pi/6$ суммарная реактивная мощность ВД минимальна.

Заключение

Сегодня в распоряжении разработчиков появились относительно недорогие редкоземельные магниты из материала неодим – железо – бор с высокими энергетическими характеристиками. Усилиями ученых удалось довести температуру эксплуатации таких магнитов до рабочей температуры механизма, а нанесение коррозионно – стойких покрытий позволило продлить их срок службы на все время работы электропривода .

В настоящее время вентильные двигатели с постоянными магнитами прочно завоевали позицию надежных, компактных и экономичных электромеханических преобразователей энергии . Кроме того, будучи дискретными по своей структуре и имея встроенный датчик положения ротора, они без дополнительных устройств стыкуются с цифровыми блоками управления, что позволяет на их базе легко создавать замкнутые системы электроприводов со сложной циклограммой работы.

Вентильные двигатели с редкоземельными магнитами целесообразно применять не только в медицине и необслуживаемых механизмах, но и в авиационной и космической технике и для гибридного транспортного средства. И выбор вентильного двигателя мощностью 80 кВт был произведён в данной работе для гибридного транспортного средства. Так же были рассмотрены его механические характеристики и выбраны транзисторы для его управления.

Список литературы

1. Я знаю автомобиль [Электронный ресурс] / Жарцов Е.Н. URL: <http://autology.jimdo.com>, свободный. Дата обращения: 10.04.2016 г.
2. Fault-tolerant permanent magnet machine drives / Mecrow B.C., Jack A.G., Haylock J.A., Coles J. // IEE Proc. Elec. Power Appl.[IEE Proc. B]. –1996. V 143, № 6. – P. 437–442.
3. Commande optimisée d'un ensemble convertisseur-machine synchrone autopilotée fonctionnant en mode dégradé biphasé / Fan Yuchao, Hautier J.P. // J. phys. Sec. 3. – 1994. – V 41, № 1. – P. 143–157.
4. А.с. № 1262678 (СССР), МКИЗ Н 02 Р 6/02, Н 02 К 29/00. Вентильный электродвигатель / А.А. Иванов, В.К. Лозенко, О.Н. Рублева. – Оpubл. в Б.И., 1986, № 37.
5. Нефть и газ Западной Сибири : материалы Международной научно-технической конференции. Т. 4. — Тюмень : ТюмГНГУ, 2013. — 173 с.
6. Сеть магазинов в Санкт-Петербурге [Электронный ресурс] / сеть магазинов «Катод». URL: <http://retail.katod.ru>, свободный. Дата обращения: 12.04.2016 г.
7. Кенио Т., Нагаморин С. Двигатели постоянного тока с постоянными магнитами: Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1989-184 с.: ил.
8. Однокопылов Г.И. [Автореферат диссертации]//Микроконтроллерное управление вентильным двигателем в аварийном режиме.
9. Патент на ПМ №59905 (RU), H02K 29/06, H02P 6/00. Вентильный электропривод со свойством живучести/ Г.И. Однокопылов, К.В.Образцов. - №2006128881; Заявл.08.08.2006; Оpubл.27.12.2006 г. Бюл.№36.
- 10.Патент РФ на изобретение № 2447561(RU), H02P 7/09. Вентильный электропривод с обеспечением свойства живучести/ Г.И.Однокопылов, Ю.Н.Дементьев, И.Г.Однокопылов, К.В.Образцов -№2011112102; Заявл. 30.03.2011; Оpubл10.04.2012 Бюл. № 10.
- 11.Патент РФ на ПМ № 136184(RU), G01R 31/02. Установка для исследований аварийных режимов работы вентильного двигателя/ Г.И.Однокопылов,

И.А.Розаев, А.Д.Брагин. -№2013138092; Заявл.14.08.2013; Оpubл.27.12.2013
Бюл. № 36.

12. Патент на изобретение №2311721 (RU), H02P 6/12, H02P 6/16, H02K 29/06.
Способ обеспечения живучести трёхфазного вентильного двигателя /Г.И.
Однокопылов, К.В. Образцов, - № 2006128538; заявл. 04.08.2006 г.; опубл.
27.11.2007г. Бюл. №33.

13. Патент РФ на изобретение № 2435291, H02P 6/12, H02P 6/16. Способ
обеспечения живучести трёхфазного вентильного двигателя на основе
явнополюсной синхронной машины /Г.И. Однокопылов, К.В. Образцов, - №
2010135857; заявлено 26.08.2010 г.; опубл. 27.11.2011 г. Бюл. №33.