

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 асинхронный электропривод для гибридного транспортного средства	

УДК 621.313.333.2:629.113

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5Г2А	Сенькив Елена Петровна		

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		

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального 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 Сенькив Елене Петровне

1. Тема выпускной квалификационной работы
«Отказоустойчивый асинхронный 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/220 В.

Параметры гибридного транспортного средства:

Трение качения по асфальту: 0.092 Н

Максимальная скорость движения: 45 м/с

Коэффициент обтекаемости: 2

Лобовая площадь кузова: 2.1 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: отказ ключей, обрыв обмоток.

4. Содержание текстового документа (перечень подлежащих разработке вопросов)

4.1 Введение

- 4.2 Анализ методов и принципов отказоустойчивого управления асинхронным электроприводом
- 4.3 Выбор электродвигателя.
- 4.4 Математическая модель отказоустойчивого асинхронного электропривода.
- 4.5 Исследование неполнофазных режимов отказоустойчивого асинхронного электропривода.
- 4.6 Проверка адекватности асинхронного электропривода в аварийных и неполнофазных режимах
- 4.7 Социальная ответственность
- 4.8 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение
- 4.9 Заключение
- 5. Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей)
 - 5.1 Функциональная схема отказоустойчивого асинхронного электропривода
 - 5.2 Структурная схема отказоустойчивого асинхронного электропривода
- 6. Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы

Руководитель _____
(подпись, дата)

Задание принял к исполнению

(подпись, дата)

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа содержит 84 страниц, 13 рисунков, 23 таблиц, 30 источников, 5 приложения.

Ключевые слова: отказоустойчивый асинхронный электропривод, математическая модель асинхронного двигателя, неполнофазный режим работы, обрыв фазы двигателя, отказ элементов преобразователя частоты, резервирование элементов электропривода, алгоритм восстановления работоспособности.

Цель работы – разработка отказоустойчивого асинхронного электропривода для гибридного транспортного средства, обеспечить функционирование микроконтроллерной системы управления с алгоритмом восстановления работоспособности. Обеспечить мониторинг отказов типа обрыв фазы двигателя, «невключение» и «невключение» ключа преобразователя частоты. Разработать математическую модель асинхронного двигателя в среде MatlabSimulink для исследования аварийного двухфазного режима работы, проверить ее адекватность.

Выпускная квалификационная работа выполнена в текстовом редакторе Microsoft Office Word 2013 с использованием пакетов: Microsoft Visio 2013, Matlab Simulink, MathType 6.9, Mathcad 15.

Оглавление

Задание.....	1
Введение.....	6
1. Асинхронный электропривод.....	8
1.1 Анализ методов и принципов отказоустойчивого управления асинхронным электроприводом.....	8
1.1.1 Обзор известных технических решений отказоустойчивого электропривода переменного тока.....	8
1.1.2 Схемные и алгоритмические технические решения для обеспечения свойства живучести.....	11
1.1.2 Выводы по разделу.....	13
1.2 Выбор электродвигателя.....	14
1.2.1 Выбор электрооборудования, расчет параметров элементов.....	14
1.2.2 Выбор способа управления скоростью двигателя в системе преобразователь частоты – асинхронный двигатель (ПЧ-АД)	16
1.2.3 Структурная схема силового канала ЭП.....	17
1.2.4 Расчет параметров элементов структурной схемы силового канала электропривода.....	17
1.2.5 Выводы по разделу.....	22
1.3 Математическая модель асинхронного электродвигателя в аварийных и неполнофазных режимах работы.....	22
1.3.1 Постановка задачи.....	23
1.3.2 Математическое моделирование процессов асинхронного электродвигателя.....	23
1.3.3 Проверка адекватности асинхронного электропривода в аварийных и неполнофазных режимах.....	34
1.3.4 Экспериментальные исследования асинхронного электропривода в аварийных и неполнофазных режимах.....	36
1.3.4.1 Автоматизированный испытательный стенд.....	36
1.3.6 Отказоустойчивое гибридное транспортное средство с асинхронным электроприводом.....	37
1.3.7 Постановка задачи	37
1.3.8 Функциональные возможности и работа отказоустойчивое гибридное транспортного средства.....	38
1.3.9 Выводы по разделу.....	40
2. Социальная ответственность.....	40
2.1 Производственная безопасность.....	40
2.2 Анализ выявленных опасных факторов проектируемой производственной среды.....	41

2.3 Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды	44
2.4 Экологическая безопасность.....	49
2.5 Тепловое излучение.....	49
2.6 Утилизация твердых отходов	50
2.7 Требования охраны труда в аварийных ситуациях.....	51
2.8 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности.....	52
2. Вывод по разделу.....	53
3. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение...	54
3.1 Технология QuaD.....	54
3.2 SWOT- анализ.....	57
3.3 Планирование научно-исследовательских работ.....	64
3.4 Определение трудоемкости выполнения работ.....	65
3.4.1 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)	65
3.5 Разработка графика проведения научного исследования.....	66
3.6 Расчет материальных затрат НТИ.....	70
3.7 Расчет затрат на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ.....	72
3.8 Основная заработная плата исполнителей темы.....	73
3.9 Дополнительная заработная плата исполнителей темы.....	78
3.10 Накладные расходы.....	79
3.11 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта.....	80
3.12 Определение ресурсоэффективности проекта.....	81
3.13 Вывод по разделу.....	84

Введение

Электромобиль с применением двигателя внутреннего сгорания, появился немного позже электромобиля. Первый в мире электромобиль был в виде тележки с электромотором и создан в 1841 году. Запас, изначально, скорость и хода у бензиновых и электрических экипажей были равными. Основным недостатком электромобилей заключалась в сложности, а точнее в системе подзарядки. Так как, в то время не имелось модернизированных преобразователей переменного тока в постоянный, зарядка выполнялась чрезвычайно трудным способом. Чтобы к подзарядке применялся электромотор, делавший от тока переменного. Который, вращал генератора вал, были к нему. Подключены батареи электромобиля. Был изобретён в году 1906 относительно не сложный в применении выпрямитель тока, но это значительно вопрос подзарядки не разрешило. Автопроизводители в настоящее время не редко прибегают к совместному использованию электродвигателя и двигателя внутреннего сгорания (ДВС), что дает возможность обречься от работы ДВС в режиме не больших нагрузок, а также при повышении топливной эффективности силовой установки, реализовывать рекуперацию кинетической энергии. Не менее распространённый вид гибридов—автомобили, в которых ДВС совмещён с двигателями, работающими на сжатом воздухе. Нужно отличать от гибридов транспортные средства с электромеханической трансмиссией, такие как тепловозы.

Преимущества:

- Экономная эксплуатация
- Экологическая чистота
- Улучшенные ходовые характеристики
- Увеличение дальности пробега
- Сохранение и повторное использование энергии
- Обычная заправка топливом

Недостатки:

- Высокая сложность
- Утилизация аккумуляторов
- Подогрев салона
- Опасность для пешеходов (из-за своей бесшумности)

Современное использование, Toyota лидирует по количеству гибридов и активно выпускает эти, автомобили с 1997 года, причем в модификациях как обычно автомобилей серии Prius, кроссоверов серии Lexus RX400h, так и автомобилей люкс-класса – Lexus LS 600h.

Одним из основных элементов электромобиля является электродвигатель, который служит для создания необходимого для движения крутящего момента. В качестве электродвигателя используют трехфазные асинхронные электрические машины переменного тока мощностью от 15 до 200 и более кВт. В сравнении с ДВС

электродвигатель имеет высокую эффективность и меньшие потери энергии. КПД электродвигателя составляет 90% против 25% у ДВС.

Основными преимуществами электродвигателя являются:

- реализация максимального крутящего момента во всем диапазоне скоростей;
- возможность работы в двух направлениях без дополнительных устройств;
- простота конструкции, воздушное охлаждение;
- возможность работы в режиме генератора.

Очевидно, что повышение отказоустойчивости неразрывно связано с живучестью электроприводов, обеспечивающих функциональные свойства электромобиля в заданных пределах. Обеспечить свойство живучести возможно на основе технологии построения избыточных систем, используя комбинацию следующих видов резервирования: структурного, функционального, временного, информационного и нагрузочного.

Глава 1. Асинхронный электропривод.

1.1 Анализ методов и принципов отказоустойчивого управления асинхронным электроприводом

1.1.1 Обзор известных технических решений отказоустойчивого электропривода переменного тока

Электропривод переменного тока построенный на основе асинхронных двигателей (АД) является базой для организации практически всех технических сложных систем поступательного и вращательного принципа воздействия.

Можно выделить три группы неисправностей:

- неисправности электрической части электродвигателя и питающей сети;
- неисправности механической части электропривода (включая редуктор);
- неисправности, вызванные климатическими параметрами электропривода и окружающей среды.

1. Неисправности электрической части электродвигателя и питающей сети:

- короткое замыкание в обмотках двигателя;
- перегрузка по току;
- обрывы в обмотках двигателя;
- пробой изоляции фазы обмоток на корпус;
- обрыв питания одной из фаз;
- возникновение 1 или 2 фазного режима 3 фазного электродвигателя;
- увеличение потребляемой мощности при постоянной нагрузке на валу электродвигателя;
- несимметрия фаз питающей сети;
- падение скорости вращения вала электродвигателя ниже номинальной (превышен вращающий момент);

- холостой ход электродвигателя в случае сброса нагрузки (при поломке пальцев муфты, срезания шпонки или обрыве ремня);
- «опрокидывание» АД или внезапное уменьшение нагрузки;
- Токовая несимметрия, небаланс токов;
- неправильное чередование фаз;
- обрыв одного или нескольких стержней ротора;
- снижение межвитковой и межфазной изоляции (полное или частичное междуфазное замыкание);
- изменения частоты и напряжения питающей сети за допустимые значения;
- не отработки команды на пуск двигателя вследствие неисправности (пропадания) фазы сети;
- чрезмерно большая частота включений;
- затянувшийся пуск;
- отказ полный или частичный магнитного пускателя (отказ отдельных контактов), приводящий к не отработке команды на пуск электродвигателя или неполнофазному режиму;
- отказ в функционировании микроконтроллера (не прохождение операции самотестирования).

2. Неисправности механической части электропривода:

- заклинивание подшипников;
- стопорение ротора; заторможенный ротор;
- включение при заторможенном роторе;
- поломка пальцев муфты, срезание шпонки, обрыв ремня;
- повышенная вибрация;
- износ редуктора (дефекты шестерен);
- износ подшипников;
- износ электромагнитного тормоза;

3. Неисправности, вызванные климатическими параметрами электропривода и окружающей среды:

- возрастание температуры активных частей двигателя выше допустимой;
- снижение «запаса по нагреву электродвигателя до нуля»;
- температура окружающего воздуха выше допустимой;
- срабатывание датчика влажности расположенного на статоре при попадании воды;
- перегрев подшипников;
- прекращение вентиляции двигателя.

В данной работе рассмотрены аварийные ситуации типа обрыв фазы статора. Процессы, происходящие в асинхронном двигателе при обрыве фазы питающей сети. Последствия, вызванные потерей фазы двигателя со схемой подключения со связанными фазами, могут привести к выходу двигателя из строя и нарушению технологического процесса для типовой схемы подключения. Аварийный двухфазный режим работы представляет большую опасность для двигателя. Токи, протекающие по обмоткам статора превышают номинальные и зависят от большого числа различных факторов таких, как величина момента нагрузки, скольжения, схемы соединения обмотки и т.д. Если момент нагрузки превышает критический момент двигателя в двухфазном режиме работы, то произойдет остановка двигателя, в случае же продолжения работы может возникнуть тепловое повреждение двигателя и выход электропривода из строя.

Исходя из этого, можно заключить, что работа электродвигателя со связанными фазами в аварийном двухфазном режиме работы не допустима.

Для обеспечения работоспособности в случае наступления аварийной ситуации необходимо применить один из перечисленных на рисунок 1 способов исполнения отказоустойчивого электропривода.

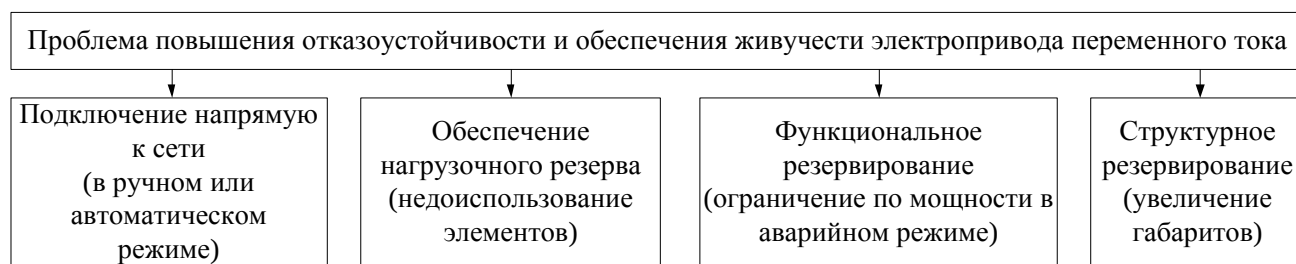


Рисунок 1 – Способы обеспечения отказоустойчивости электропривода

Подключение двигателя напрямую к сети переводит систему в режим нерегулируемого электропривода, что негативно сказывается на эксплуатационных качествах.

При использовании нагрузочного резерва происходит не полное использование оборудования электропривода, что уменьшает энергетические показатели.

Рассмотрим подробнее функциональное и структурное резервирование. Вопросы обеспечения отказоустойчивости и живучести n -секционного асинхронного электропривода описаны в работах российских [6, 7, 8, 9, 10] и зарубежных ученых [11]. Повышение отказоустойчивости неразрывно связано с обеспечением живучести электроприводов в аварийных режимах работы.

Под функциональным резервированием отказоустойчивого асинхронного электродвигателя понимается построение ЭП, в котором резервирование выполняется за счет организации вращающегося кругового поля в аварийном двухфазном режиме трехфазного АД(1), что обеспечивает необходимый уровень живучести. Подобный подход дает возможность без дополнительных аппаратных затрат, обеспечить живучесть, однако он ограничен в применении, т.к. обрыв одной из фаз двигателя может привести к уменьшению мощности, но возможно компенсировать ее за счет нагрузки АД(n).

Известны следующие работы [6, 10] по применению функционального резервирования асинхронного электропривода, а также технические решения, полученные в патентах [12, 13].

1.1.2 Схемные и алгоритмические технические решения для обеспечения свойства живучести.

1. Живучесть в электроприводе возможна быть обеспечена при рассмотрении трехфазного АД, как система мехатронной с ненагруженным резервом. При возникновении аварийной ситуации, т.е. в одной из фаз АД может быть

переведен в двухфазный режим работы с возможностью ее реализацией алгоритма восстановления работоспособности.

2. Электротехнические конденсаторы не надежны, т.к. присутствует электротехнический нагрев, поэтому лучше, когда в схеме конденсаторов меньше. Схема конденсатора (а) идеальна, но затратная. В гибридном автомобиле используется схема (б). С помощью структурной схемы автомобиля, можно провести модернизацию автомобиля не ухудшая параметры привести к живучести.

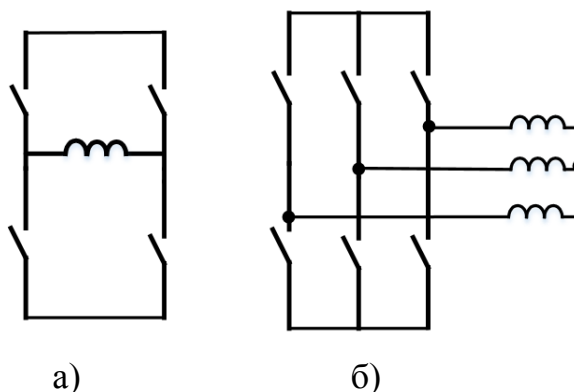


Рисунок 2 – Изображена схема конденсаторов а , б

3. Строится асинхронный электропривод на базе управляющего микроконтроллера. Алгоритм реализуется для восстановления работоспособности при проявлении аварийной ситуации (при отказе одной или нескольких фаз) сформированием программных заданий на токи фазные. Микроконтроллерная работа реализовывается с неизменным программным циклом на частоте, которая, не ниже частоты ШИМ модуляции силового преобразователя.

4. Асинхронный электропривод осуществляется по принципу подчиненного регулирования параметров. В наименьшем составе (моментный двигатель с параметром регулирования I_{ω}) обязан иметь по току обратные связи. Контур тока, предназначенный для отработки заданного значения, может быть цифровым или аналоговым. Структура регулятора тока обязана обеспечивать максимальную скорость нарастания формируемого тока. Контура обратной связи, по частоте вращения, самостоятельно в реализации алгоритма восстановления не могут участвовать.

5. Электропривод асинхронный должен содержать в составе силового

преобразователя, преобразовательных ячеек, датчики состояния, они вырабатывают три бита отказа (фазной обмотки двигателя ячейки или силового преобразователя) a, b, c , зачисляющиеся в управляемую систему для отключения отказавшей фазы и для реализации алгоритма восстановления.

Упрограммных датчиков происходит опрос, состояния которых должен осуществляться микроконтроллерном цикле управления.

Функциональная схема отказоустойчивого гибридного транспортного средства с одним приводом и дифференциальной передачей на два ведущих колеса приведена (в приложении рисунок №4).

Под структурным резервом понимается способ, который, обеспечивает свойства живучести электропривода асинхронного за счет управления микроконтроллерного с реализацией восстановления алгоритма работоспособности на основе элементов в резерве, позволяющий восстановить полностью работоспособность при внезапных отказах преобразователя частоты типа «не выключение ключа» или «не включение ключа» преобразователя частоты.

Уровень, заданный, для живучести в асинхронном трехфазном ЭП возможен достигнут быть при не нарушении следующих достаточных и необходимых условий в случае при обрыве одной из фаз или аварийной ситуации преобразователя частоты:

1. Электропривода живучесть может быть, снабжена за счет структурного резервирования – возможности мониторинга системы и ее восстановление.

2. Строится электропривод на основе микроконтроллера с управлением и с использованием информационного резервирования – избыточности процессорного ресурса. Микроконтроллерная работа может осуществляться с программным, постоянным циклом не ниже частоты ШИМ. В итоге программного анализа фазных токов вырабатывается один из трех битов отказа: прямые a, b, c и инверсные $\bar{a}, \bar{b}, \bar{c}$ биты отказов.

Изучение отказоустойчивого асинхронного электропривода со структурным резервированием отражено в следующих работах [14, 15].

1.1.2 Выводы по разделу

1. Произведен обзор и анализ способов обеспечения отказоустойчивости электропривода переменного тока. Перспективным является использование функционального и структурного резервирования.
2. Определено, что для построения отказоустойчивого асинхронного электропривода требуется обеспечить непрерывную мониторинг элементов преобразователя частоты и обмотки статора двигателя, организовать систему управления, содержащую алгоритм восстановления и позволяющую использовать функциональный или структурный резерв. К таким системам управления можно отнести разработанные системы векторного [16] и частотно-токового [17, 18, 19] управления.

1.2. Выбор электродвигателя

1.2.1 Выбор электрооборудования, расчет параметров элементов

1. Электродвигатель выбираем общепромышленного назначения серии А250S2.
2. Скорость, номинальная, электродвигателя выбирается исходя из условия $\omega_{\text{двном}} < \omega_{\text{ЭПМАКС}}$, что требует регулирования у двигателя скорости в первой зоне с постоянным потоком двигателя ($f_{\text{и}} \leq 50$ Гц).
3. Мощность электродвигателя избирается в соответствии с зависимостями длительно кратковременно и допустимого, момента и допустимого тока или двигательной мощности в функции скорости.

Мощность номинальная электродвигателя, выбирается в длительной работы режиме в соответствии со следующим условием: $P_{\text{двном}} \geq P_{\text{двпотр}}$

Требуемая мощность двигателя в зоне длительной работы с постоянным потоком: $\omega \leq \omega_{\text{двн}}$

$$P_{mp} = g \cdot F_{mp} \cdot m \cdot V \cdot C_x \cdot S \cdot V^2 + g \cdot m \cdot \sin \alpha = \\ = 9.8 \cdot 0.092 \cdot 1525 \cdot 45 + 2 \cdot 2.1 \cdot (45)^2 + 9.8 \cdot 1525 \cdot \sin 20 = 75,$$

где g – ускорение свободного падения;

$F_{тр}$ – трение качения по асфальту;

m – полная масса транспортного средства;

V – скорость движения, максимальная;

C_x – коэффициент обтекаемости;

S – лобовая площадь кузова;

α – угол наклона дорожного полотна.

Выбранные данные технические электродвигателя сведены в таблице 1, параметры замещения схемы – в таблице 1

Таблица 1- Исходные данные АД

Типоразмер	$n_0, \left[\frac{\text{об}}{\text{мин}} \right]$	$U_{\text{ин}}, [\text{В}]$	$P_{\text{дв.н}}, [\text{кВт}]$	При номинальной нагрузке			$J_{\text{дв}}, [\text{кг} \cdot \text{м}^2]$
				$s_{\text{н}}, \%$	$\cos \varphi_{\text{н}}$	$\eta_{\text{н}}, \%$	
АИР250S2	3000	380	75	2	0,9	93	0,3500

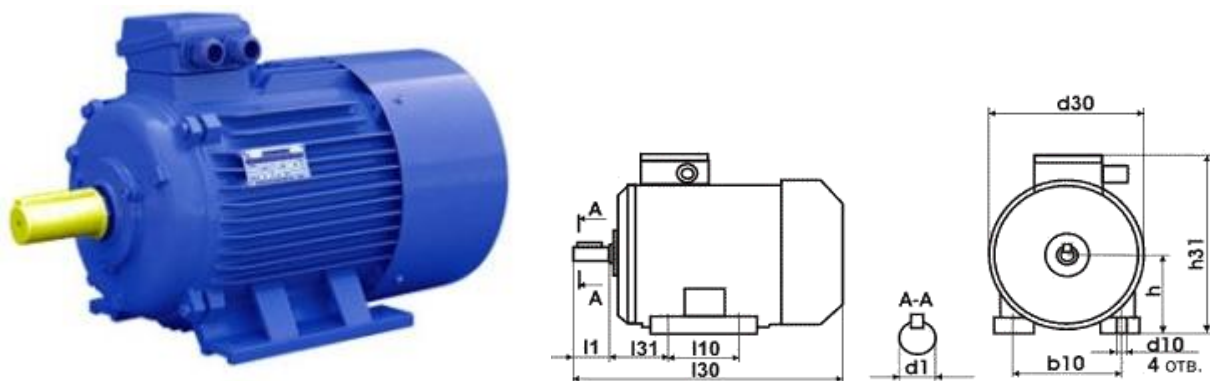


Рисунок 3 – электродвигатель АИР250S2 на напряжение 380

Продолжение таблицы 1

$m_{\text{п}} = \frac{M_{\text{пуск}}}{M_{\text{н}}}$	$m_{\text{к}} = \frac{M_{\text{макс}}}{M_{\text{н}}}$	Степень защиты	$s_{\text{к}}, \%$
1,8	3	IP44	43

– замкнутая система с обратной связью по скорости;	до 120
Векторное управление:	
– без датчика скорости(с внутренней моделью)	100–120
– с датчиком скорости	1000

Принимаем способ управления – векторное управление с датчиком скорости, диапазон регулирования 20. Использование векторного управления позволяет повысить энергетические показатели электропривода, а также обеспечить работоспособность в случае возникновения аварийной ситуации.

1.2.3 Структурная схема силового канала ЭП.

В электропривод силового канала входят:

- преобразователь частоты, реализовывающий функцию преобразователя электрического;
- электродвигатель, который осуществляет функцию преобразователя электромеханического;
- механическая система, которая исполняет функцию преобразователя механического.

При разрешении задач синтеза и анализа регулируемых электроприводов асинхронных часто используются модели электродвигателя, составленные на основе электрической обобщенной машины и выполненные двухфазной вращающейся системе координат (х, у) или в неподвижной.

1.2.4 Расчет параметров элементов структурной схемы силового канала электропривода

Расчет параметров преобразователя выполним по следующим выражениям:

Значение максимальное коэффициента усиления преобразователя

$$k_u = \frac{\sqrt{2} \cdot U_{1\phi}}{U_{уп\max}} = \frac{\sqrt{2} \cdot 380}{10} = 53,740,$$

где $U_{уп\max} = 10$ В, – максимальное значение напряжения управления.

Принимаем несущую частоту инвертора $f_{инв} = 10$ кГц [30]

Эквивалентная постоянная времени преобразователя

$$T_u = \frac{0,5}{f_u} = \frac{0,5}{10 \cdot 10^3} = 5 \cdot 10^{-5} \text{ с},$$

где f_u – несущая частота инвертора, Гц.

Расчет параметров двигателя проведем последующим выражениям.

Индуктивность эквивалентная обмоток:

- статора: $L_1 = L_{1\delta} + L_\mu = 0,0614 + 0,9107 \cong 0,9721 \text{ Гн};$
- ротора: $L_2' = L_{2\delta}' + L_\mu = 0,0791 + 0,9107 \cong 0,9898 \text{ Гн}.$
- Коэффициент рассеяния: $\sigma = 1 - \frac{L_\mu^2}{L_1 \cdot L_2} = 1 - \frac{0,9107^2}{0,9721 \cdot 0,9898} = 0,138.$

Эквивалентное сопротивление:

$$R_\gamma = R_1 + R_2' \cdot \frac{L_\mu^2}{L_2^2} = 0,021 + 0,015 \cdot \frac{0,9171^2}{0,079^2} = 2,042.$$

Электромагнитные постоянные времени:

$$T_\gamma = \frac{\sigma \cdot L_1}{R_\gamma} = \frac{0,138 \cdot 0,9171}{2,042} = 0,066;$$

$$T_2 = \frac{L_1}{R_2'} = \frac{0,9171}{0,015} = 61,14 \text{ с}.$$

Эквивалентный момент инерции и момент инерции механизма привода рассчитывается по следующим выражениям соответственно:

Момент инерции механизма:

$$J_M = 0,5 \cdot J_{ог} = 0,5 \cdot 0,35 = 0,175.$$

Эквивалентный момент инерции привода:

$$J_\gamma = J_{ог} \cdot J_M = 0,35 \cdot 0,00069 = 0,00024$$

Расчет батарей

Для указания номинальной емкости производители используют расчет выдаваемого аккумулятором тока в течении стандартного времени. Экспонента Пекерта чаще рассчитывается на базе измерения времени полного разряда (T_1 и

T_2) для двух разных токов (I_1 и I_2). Для ориентировочных расчетов можно использовать графики или таблицы разрядки, предоставляемые производителем аккумулятора.

Так как C_p – константа, мы можем записать такое уравнение:

$$C_p = I_1^n \cdot T_1 = I_2^n \cdot T_2.$$

Преобразуя выражение, получаем формулу расчета экспоненты Пекерта :

$$n = \log\left(\frac{T_2}{T_1}\right) / \log\left(\frac{I_2}{I_1}\right).$$

Основываясь на знании значений емкости Пекерта и экспоненты Пекерта можно рассчитывать время работы аккумулятора при определенной нагрузке:

$$T = \frac{C_p}{I^n}.$$

При расчете батареи станем исходить из-того, что будет электромобиль использован для внутригородских поездок с не менее постоянными остановками в пробках, на светофорах и определим время поездки периодом 15 минут, это вполне реально для среднего российского города. При дальности хода 80 км и средней скорости 40 км / час требуемое время хода 2 часа чистого времени.

При среднем токе потребления электродвигателя 50 А, рассчитаем аккумуляторную емкость:

$$C_p = I^n \cdot T = 0.4 \cdot 50 = 2 \cdot 50 = 100 \text{ А/час},$$

$$C_p = I^n \cdot T = 0.6 \cdot 50 = 2 \cdot 50 = 100 \text{ А/час}.$$

Из многообразия предложенных в ряде типовых батарей, мы выберем для использования в проекте батареи емкостью 120 А/час.

Из существующих в продаже на российском рынке аккумуляторов в наилучшую репутацию при оптимальной стоимости имеют аккумуляторы для

Toyota Land Cruiser, артикул EA1004, емкостью 120 А/час, номинальное напряжение 12В.

Расчет транзисторов

- Рассчитываем сколько приходится $P_{тр}$ на одну фазу:

$$P_{1ф} = \frac{P_{тр}}{m_{ф}} = \frac{75}{3} = 25 \text{ кВт};$$

$P_{тр}$ – мощность асинхронного электродвигателя,

$m_{ф}$ – количество фаз.

- Находим действующий ток:

$$I_{действ} = \frac{P_{1ф}}{U_{н}} = \frac{25000}{120} = 208,3 \text{ А};$$

$U_{н}$ - номинальное напряжение аккумулятора.

- Рассчитываем импульсный ток:

$$I_{импул} = \sqrt{2} \cdot I_{действ} = \sqrt{2} \cdot 208,3 = 295 \text{ А}.$$

- Находим пусковой ток :

$$I_{пуск} = I_{кп} \cdot I_{импул} = 3 \cdot 295 = 885 \text{ А};$$

$I_{кп}$ - коэффициент пускового тока.

Выбираем коэффициент нагрузки транзистора равен 58%, т.е.=0,58.

- Далее рассчитываем ток транзистора:

$$I_{транз} = I_{пуск} \cdot \frac{1}{0,58} = 885 \cdot \frac{1}{0,58} = 1526 \text{ А}.$$

Выбираем IGBT транзистор, т.к. он быстрый и надежный. Выбираем из условия

$U = 2 \cdot U_{н} = 2 \cdot 12 = 24 \text{ В}$ двойного напряжения, для того чтобы выдерживал нагрузку.

Из всех представленных нам транзисторов наиболее подходящий оказался IRG4BC30F, он способен выдержать до 600 В.

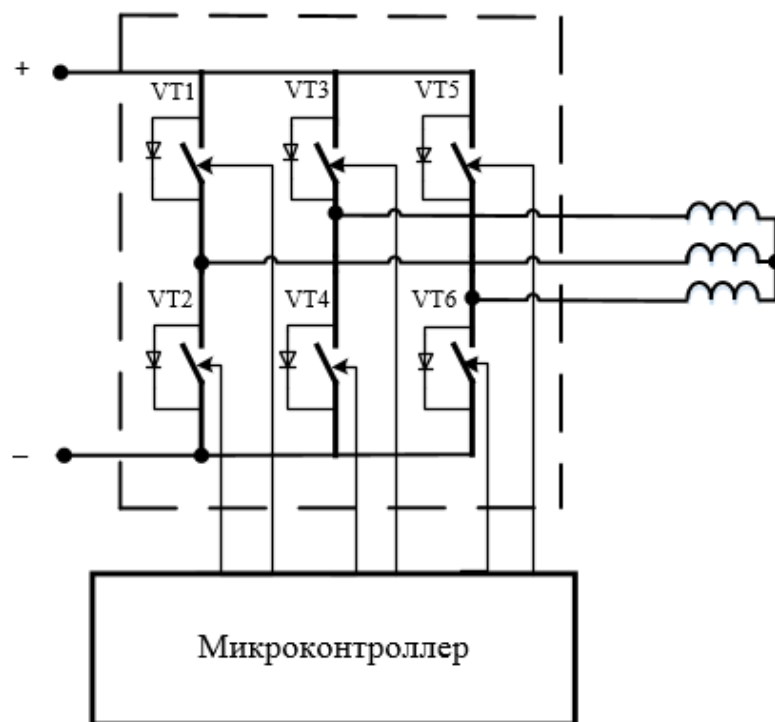


Рисунок 4 – схема преобразователя частоты (ПЧ)

Основным недостатком IGBT транзисторов является относительно большое время выключения, что берет в рамки частоты переключения до 20 – 100 кГц даже у самых быстродействующих транзисторов. Кроме того, с ростом частоты необходимо уменьшать ток коллектора.

Преимущества IGBT транзисторов, это высокое входное сопротивление и малое сопротивление между силовыми электродами во включенном состоянии.

Так же выбираем датчик тока, соблюдая условие, что I_n транзистора, будет не меньше $I_{\text{транз}}$ расчетного. Избираем датчик тока LEM Website серии LTC 1000-TF/SP20, с $I_n = 2000$ А.

Выбрав транзисторы, датчика тока. Далее выбираем тип микроконтроллера, на него поступают сигналы с ключей VT1-VT6. Изучив предложенные на рынке

микроконтроллеры, целесообразно будет выбрать микроконтроллер типа LPC2129, он выполняется на основе 16/32-разряда.

В настоящее время на российском «электронном» рынке устройства управления мощными полевыми и IGBT-транзисторами представлены фирмами Agilent Technologies, IR, Powerex, Semikron, CTConcept. Наиболее функционально полными являются драйверы фирм Semikron (серии SKHI). Наиболее подходящие драйвера серии SKHI 22A/H4.

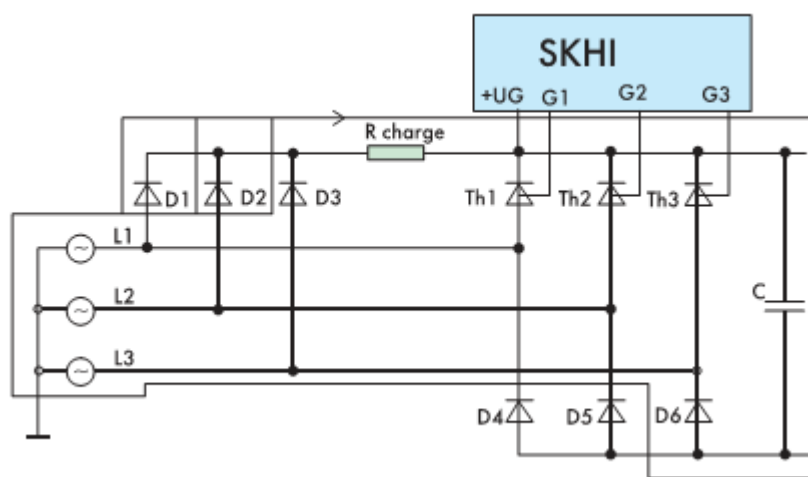


Рисунок 5 – схема подключения драйвера SKHI

1.2.5 Выводы по разделу

В данном разделе проводили расчет параметров преобразователя. Так же для указания номинальной емкости используем расчет выдаваемого аккумулятором тока в течении стандартного времени с помощью экспонента Пекерта. Далее необходимо из существующих в продаже на российском рынке аккумуляторов выбрать самый оптимальный вариант подходящие под наши расчеты. Аналогично выбираем IGBT транзистор, датчик тока LEM Website, драйвера серии SKHI.

1.3 Математическая модель асинхронного двигателя в аварийных и неполнофазных режимах работы

1.3.1 Постановка задачи

Разработка отказоустойчивого асинхронного электропривода со свойством живучести обуславливает необходимость изучения и анализа аварийных режимов работы. Для выполнения таких исследований необходимо разработать математическую модель процессов, проходящие в электродвигателе асинхронном в случае обрыве фаз, т.е. возникновения аварийной ситуации.

Описание математических процессов электромеханического преобразования энергии в машинах асинхронных отличается известной сложностью. В составлении дифференциальных уравнений переходных процессов машин асинхронных является одним из важнейших этапов подготовки задачи.

1.3.2 Математическое моделирование процессов асинхронного электродвигателя

В случае, если многофазная электрическая машина симметрична, и напряжение на ее обмотках синусоидально, то удобно анализировать такую машину, представив ее в двухфазной системе координат dq . Тем не менее при исследовании несимметричных машин, при несинусоидальных напряжениях или при исследовании машин с учетом пространственных гармоник приводить машину к двухфазной неправомерно, так как поля в зазоре многофазной и двухфазной машинах в этих условиях различаются друг от друга[20].

При рассмотрении и составлении уравнений переходных процессов машин асинхронных будем применять общепринятые ограничения и допущения, связанные с понятием «идеализированная машина»: машина не насыщена, потерями в стали пренебрегаем; сдвинуты на угол 120° и фазные электрических градусов обмотки симметричны; намагничивающие силы обмоток и магнитные поля разделены синусоидально, вдоль окружности воздушного зазора; ротор симметричен; воздушный зазор равномерен. Действительная распределенная обмотка замещается сосредоточенной, оси фаз которой сдвинуты на фазный угол, а намагничивающая сила ее равна

намагничивающей силе действительной обмотки. В случае необходимости можно отказаться от тех или иных допущений, например, потери в стали, могут быть учтены насыщение магнитной цепи, несимметрия ротора и т.д.

При описания переходных процессов машины асинхронной, работающей в режиме генератора или двигателя, составляются уравнения электрического равновесия для напряжений контуров, уравнение электромеханического преобразования энергии, а также уравнение движения электропривода.

В ней имеются три обмотки на статоре с числом витков w_A, w_B, w_C и три обмотки на роторе с числом витков w_a, w_b, w_c . Обмотки ротора вращаются с частотой $\omega = \frac{d\theta}{dt}$, а значит, взаимные индуктивности между обмотками статора и ротора изменяются в функции угла θ .

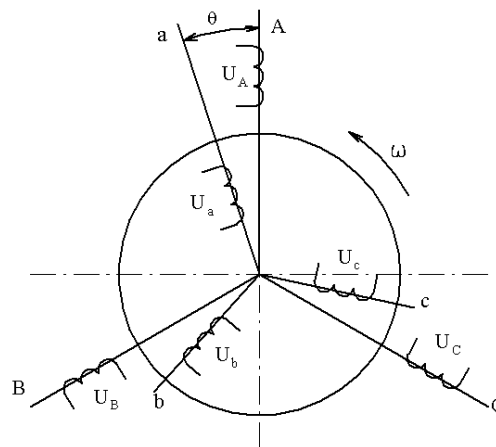


Рисунок 6 – Пространственная модель АД в естественной системе координат
Для определения токов в переходном процессе должна быть решена при заданных начальных условиях система дифференциальных уравнений мгновенных фазных напряжений обмоток статора [21]:

$$\left. \begin{aligned} U_A &= R_s \cdot i_A + \frac{d\Psi_A}{dt}; \\ U_B &= R_s \cdot i_B + \frac{d\Psi_B}{dt}; \\ U_C &= R_s \cdot i_C + \frac{d\Psi_C}{dt}; \end{aligned} \right\} \quad (2.1)$$

и мгновенных фазных напряжений обмоток ротора:

$$\left. \begin{aligned} U_a &= R_r \cdot i_a + \frac{d\Psi_a}{dt}; \\ U_b &= R_r \cdot i_b + \frac{d\Psi_b}{dt}; \\ U_c &= R_r \cdot i_c + \frac{d\Psi_c}{dt}, \end{aligned} \right\} \quad (2.2)$$

где индексы A, B, C соответствуют обмоткам статора, индексы a, b, c соответствуют обмоткам ротора. Уравнение равновесия моментов двигателя:

$$\frac{J_{\Sigma}}{p} \cdot \frac{d\omega}{dt} = M - M_c; \quad (2.3)$$

M – момент электромагнитного двигателя;

M_c – момент статического сопротивления;

J_{Σ} – момент суммарной инерции вращающихся масс, приведенных к валу двигателя.

Электромагнитный момент для трехфазной системы координат содержит все возможные пары произведений токов двигателя [20]:

$$M = p \frac{\sqrt{3}}{2} L_m [(i_A i_c + i_B i_a + i_C i_b) - (i_A i_b + i_B i_c + i_C i_a)].$$

В системе (2.2) роторные величины приведены к обмотке статора.

Потокосцепления с фазами обмоток статора и ротора выражаются через токи фаз и соответствующие индуктивности, для фазы «А» статора:

$$\Psi_A = L_{AA\Sigma} i_A + L_{AB\Sigma} i_B + L_{AC\Sigma} i_C + L_{Aa\Sigma} i_a + L_{Ab\Sigma} i_b + L_{Ac\Sigma} i_c; \quad (2.4)$$

для фазы «А» ротора:

$$\Psi_a = L_{aA\Sigma} i_A + L_{aB\Sigma} i_B + L_{aC\Sigma} i_C + L_{aa\Sigma} i_a + L_{ab\Sigma} i_b + L_{ac\Sigma} i_c. \quad (2.5)$$

Потокосцепления с другими фазами записываются аналогично. В уравнения для потокосцеплений (2.4), (2.5) входят индуктивности фаз (главные индуктивности и индуктивности рассеяния):

$$\left. \begin{aligned} L_{AA\Sigma} &= L_{AA\sigma} + L_{AA}; \\ L_{BB\Sigma} &= L_{BB\sigma} + L_{BB}; \end{aligned} \right\}$$

$$L_{CC\Sigma} = L_{CC\sigma} + L_{CC} ;$$

$$L_{aa\Sigma} = L_{aa\sigma} + L_{aa} ;$$

.....

взаимные индуктивности между фазами статора:

$$L_{AB\Sigma} = L_{AB\sigma} + L_{AB} ;$$

$$L_{AC\Sigma} = L_{AC\sigma} + L_{AC} ;$$

взаимные индуктивности между фазами ротора:

$$L_{ab\Sigma} = L_{ab\sigma} + L_{ab} ;$$

$$L_{ac\Sigma} = L_{ac\sigma} + L_{ac} ;$$

и взаимные индуктивности между фазами статора и ротора:

$$L_{Aa}, L_{Ab}, L_{Ac}, L_{Ba}, L_{Bb}, L_{Bc}, \dots$$

После приведения к обмотке статора главные индуктивности всех фаз оказываются одинаковыми и не зависящими от углового положения ротора [164]:

$$L_{AA}, L_{BB}, L_{CC}, L_{aa}, L_{bb}, L_{cc} = L_m, \quad (2.6)$$

где L_m – максимальная приведенная взаимная индуктивность между фазами статора и ротора. Обозначим сумму взаимной индуктивности L_m и индуктивности рассеяния $L_{AA\sigma}$ через индуктивность фазы статора L_S :

$$L_S = L_m + L_{AA\sigma} ;$$

аналогично для ротора:

$$L_R = L_m + L_{aa\sigma} .$$

Главные взаимные индуктивности между фазами статора:

$$L_{AB}, L_{AC}, L_{BC} = -L_m / 2 ; \quad (2.7)$$

взаимные индуктивности между фазами ротора:

$$L_{ab}, L_{ac}, L_{bc} = -L_m / 2 \quad (2.8)$$

также равны друг другу и не зависят от углового положения ротора. Значение $-L_m / 2$ получается при проецировании векторов токов I_B и I_C на ось фазы «А» и учета косинуса угла.

И лишь взаимные индуктивности между фазами ротора и статора зависят от углового положения ротора, характеризующегося углом θ между осями фаз «А» и «а»:

$$\begin{aligned} L_{Aa} &= L_{Bb} = L_{Cc} = L_m \cos \alpha_{Aa} ; \\ L_{Ab} &= L_{Bc} = L_{Ca} = L_m \cos \alpha_{Ab} ; \\ L_{Ac} &= L_{Ba} = L_{Cb} = L_m \cos \alpha_{Ac} ; \end{aligned} \quad (2.9)$$

и общая формула

$$L_{kn} = L_m \cos \alpha_{kn} ,$$

где α_{kn} – электрические углы между осями фаз статора ($k = A, B, C$) и осями фаз ротора ($n = a, b, c$), которые имеют следующие значения:

$$\begin{aligned} \alpha_{Aa} &= \alpha_{Bb} = \alpha_{Cc} = \alpha = p\theta ; \\ \alpha_{Ab} &= \alpha_{Bc} = \alpha_{Ca} = \alpha + 2\pi/3 ; \\ \alpha_{Ac} &= \alpha_{Ba} = \alpha_{Cb} = \alpha + 4\pi/3 , \end{aligned}$$

где p – число периодов. Угол θ можно в общем случае определить как

$$\theta = \theta_0 + \int_0^t \omega dt .$$

Взаимные индуктивности (2.9) являются периодическими коэффициентами, изменяющиеся по гармоническому закону при вращении ротора машины.

Обозначим эти индуктивности через L_{m1}, L_{m2}, L_{m3} :

$$\begin{aligned} L_{m1} &= L_{Aa} = L_{Bb} = L_{Cc} = L_m \cdot \cos(\alpha) ; \\ L_{m2} &= L_{Ab} = L_{Bc} = L_{Ca} = L_m \cdot \cos(\alpha + 2\pi/3) ; \\ L_{m3} &= L_{Ac} = L_{Ba} = L_{Cb} = L_m \cdot \cos(\alpha + 4\pi/3) . \end{aligned} \quad (2.10)$$

Обозначенные индуктивности подставляя (2.6), (2.7), (2.8) и (2.10) в уравнения потокосцеплений (2.4) и (2.5), а в свою очередь, потокосцепления всех фаз, в исходные уравнения электрического равновесия двигателя (2.1) и (2.2), получаем уравнения, описывающие систему и электрическую часть двигателя асинхронного в естественной трехфазной координат системе (с учетом, что фазные напряжения на роторе будут равняться нулю):

$$\begin{aligned}
U_A &= R_s \cdot i_A + L_S \frac{di_A}{dt} - \frac{L_m}{2} \frac{di_B}{dt} - \frac{L_m}{2} \frac{di_C}{dt} + \frac{d}{dt}(L_{m1} \cdot i_a) + \frac{d}{dt}(L_{m2} \cdot i_b) + \frac{d}{dt}(L_{m3} \cdot i_c); \\
U_B &= R_s \cdot i_B - \frac{L_m}{2} \frac{di_A}{dt} + L_S \frac{di_B}{dt} - \frac{L_m}{2} \frac{di_C}{dt} + \frac{d}{dt}(L_{m3} \cdot i_a) + \frac{d}{dt}(L_{m1} \cdot i_b) + \frac{d}{dt}(L_{m2} \cdot i_c); \\
U_C &= R_s \cdot i_C - \frac{L_m}{2} \frac{di_A}{dt} - \frac{L_m}{2} \frac{di_B}{dt} + L_S \frac{di_C}{dt} + \frac{d}{dt}(L_{m2} \cdot i_a) + \frac{d}{dt}(L_{m3} \cdot i_b) + \frac{d}{dt}(L_{m1} \cdot i_c); \\
0 &= R_r \cdot i_a + \frac{d}{dt}(L_{m1} \cdot i_A) + \frac{d}{dt}(L_{m2} \cdot i_B) + \frac{d}{dt}(L_{m3} \cdot i_C) + L_R \frac{di_a}{dt} - \frac{L_m}{2} \frac{di_b}{dt} - \frac{L_m}{2} \frac{di_c}{dt}; \\
0 &= R_r \cdot i_b + \frac{d}{dt}(L_{m2} \cdot i_A) + \frac{d}{dt}(L_{m1} \cdot i_B) + \frac{d}{dt}(L_{m3} \cdot i_C) - \frac{L_m}{2} \frac{di_a}{dt} + L_R \frac{di_b}{dt} - \frac{L_m}{2} \frac{di_c}{dt}; \\
0 &= R_r \cdot i_c + \frac{d}{dt}(L_{m3} \cdot i_A) + \frac{d}{dt}(L_{m2} \cdot i_B) + \frac{d}{dt}(L_{m1} \cdot i_C) - \frac{L_m}{2} \frac{di_a}{dt} - \frac{L_m}{2} \frac{di_b}{dt} + L_R \frac{di_c}{dt}.
\end{aligned} \tag{2.11}$$

Каждое уравнение системы (2.11) содержит производные статорных токов двигателя: i_A, i_B, i_C , роторных токов: i_a, i_b, i_c , а также 3 производных переменных индуктивностей: L_{m1}, L_{m2}, L_{m3} .

Данную систему дифференциальных уравнений 9-го порядка затруднительно решить и аналитически, и численными методами. Для упрощения системы можно перейти от естественной (вращающейся) к заторможенной системе координат α, β, γ . Данный переход аналогичен переводу АД в двухфазную систему координат α, β (модель в статорных осях). Данный переход позволит избавиться от периодических коэффициентов L_{m1}, L_{m2}, L_{m3} и понизить систему дифференциальных уравнений до 6-го порядка.

Модель трехфазной машины в заторможенной системе координат α, β, γ представлена на рисунок 7.

В системе трехфазной координат α, β, γ , в аналогии, как и в системе двухфазной координат α, β , в воздушном зазоре поле круговое в свою очередь его можно представить векторами результирующими токов ротора, потокоцеплений и напряжений, проецируют которые на оси статора α, β, γ находят выражения для преобразованных значений. Матрица преобразования для трехфазной системы [20]:

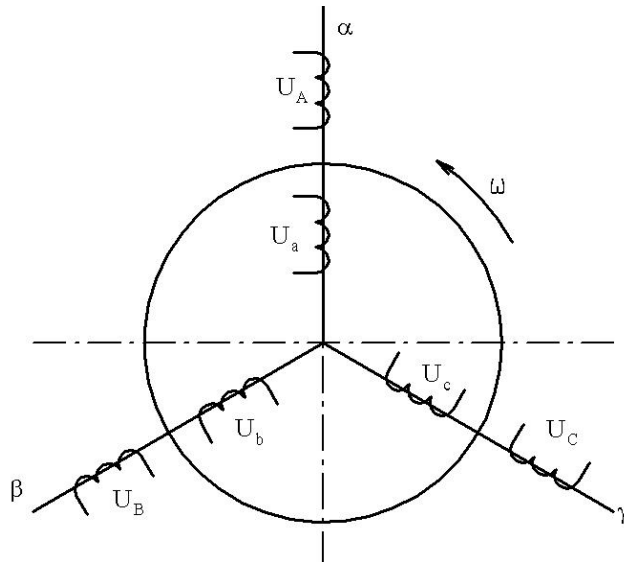


Рисунок 7 – Пространственная модель АД в трехфазной заторможенной системе координат

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2/3\cos\theta & 2/3\cos(\theta + \rho) & 2/3\cos(\theta - \rho) \\ 0 & 0 & 0 & 2/3\cos(\theta - \rho) & 2/3\cos\theta & 2/3\cos(\theta + \rho) \\ 0 & 0 & 0 & 2/3\cos(\theta + \rho) & 2/3\cos(\theta - \rho) & 2/3\cos\theta \end{bmatrix}, \quad (2.12)$$

где $\rho = 2\pi/3$.

Употребляя преобразовательную матрицу (2.12), при то с учетом, что напряжения фазные на роторе равны нулю, запишем уравнения системы(2.1), (2.2) в трехфазной преобразованной системе координат [22]:

$$U_A = R_s \cdot i_A + \frac{d\Psi_A}{dt} ;$$

$$U_B = R_s \cdot i_B + \frac{d\Psi_B}{dt} ;$$

$$U_C = R_s \cdot i_C + \frac{d\Psi_C}{dt} ;$$

$$0 = R_r \cdot i_a + \frac{d\Psi_a}{dt} + (\Psi_b - \Psi_c)\omega/\sqrt{3} ;$$

$$\begin{aligned}
0 &= R_r \cdot i_b + \frac{d\Psi_b}{dt} + (\Psi_c - \Psi_a)\omega/\sqrt{3}; \\
0 &= R_r \cdot i_c + \frac{d\Psi_c}{dt} + (\Psi_a - \Psi_b)\omega/\sqrt{3}.
\end{aligned} \tag{2.13}$$

Для всех фаз потокосцепления:

$$\begin{aligned}
\Psi_A &= L_S i_A - \frac{1}{2} L_m i_B - \frac{1}{2} L_m i_C + L_m i_a - \frac{1}{2} L_m i_b - \frac{1}{2} L_m i_c; \\
\Psi_B &= -\frac{1}{2} L_m i_A + L_S i_B - \frac{1}{2} L_m i_C - \frac{1}{2} L_m i_a + L_m i_b - \frac{1}{2} L_m i_c; \\
\Psi_C &= -\frac{1}{2} L_m i_A - \frac{1}{2} L_m i_B + L_S i_C - \frac{1}{2} L_m i_a - \frac{1}{2} L_m i_b + L_m i_c; \\
\Psi_a &= L_m i_A - \frac{1}{2} L_m i_B - \frac{1}{2} L_m i_C + L_R i_a - \frac{1}{2} L_m i_b - \frac{1}{2} L_m i_c; \\
\Psi_b &= -\frac{1}{2} L_m i_A + L_m i_B - \frac{1}{2} L_m i_C - \frac{1}{2} L_m i_a + L_R i_b - \frac{1}{2} L_m i_c; \\
\Psi_c &= -\frac{1}{2} L_m i_A - \frac{1}{2} L_m i_B + L_m i_C - \frac{1}{2} L_m i_a - \frac{1}{2} L_m i_b + L_R i_c.
\end{aligned} \tag{2.14}$$

При подставлении потокосцепления (2.14) в (2.15), систему получаем из 6 уравнений и 6 неизвестных: i_A , i_B , i_C , i_a , i_b , i_c . Для разрешения систем уравнений дифференциальных численными методами необходимо, данную систему привести к нормальной Коши форме. Алгебраическими преобразованиями систему (2.13) к нормальной Коши форме привести затруднительно. Необходимо перейти к матричной форме записи уравнений. Систему перепишем (2.13), разрешенную относительно потокосцеплений производных:

$$\begin{aligned}
\frac{d\Psi_A}{dt} &= U_A - R_s \cdot i_A; \\
\frac{d\Psi_B}{dt} &= U_B - R_s \cdot i_B; \\
\frac{d\Psi_C}{dt} &= U_C - R_s \cdot i_C; \\
\frac{d\Psi_a}{dt} &= -R_r \cdot i_a - (\Psi_b - \Psi_c)\omega/\sqrt{3};
\end{aligned} \tag{2.15}$$

$$\frac{d\Psi_b}{dt} = -R_r \cdot i_b - (\Psi_c - \Psi_a)\omega/\sqrt{3};$$

$$\frac{d\Psi_c}{dt} = -R_r \cdot i_c - (\Psi_a - \Psi_b)\omega/\sqrt{3}.$$

Вовремя рассмотрении режима двухфазного работы трехфазного двигателя асинхронного можно выделить два различных режима:

- работа с эллиптическим полем в аварийном режиме в нерегулируемом электроприводе;
- работа с алгоритмическим поддержанием кругового вращающегося поля в аварийном режиме в частотно-регулируемом электроприводе [6].

В случае аварийного двухфазного режима работы двигателя можно разложить эллиптическое поле в воздушном зазоре, используя метод симметричных составляющих, на поля прямой и обратной последовательности. Обобщенная

модель электрической машины учитывает лишь поле прямой последовательности.

Имеется два варианта двигателя представления модели асинхронного, работающего с эллиптическим полем - модель машины, обобщенной электрической с двумя роторами и двумя статорами, модель машины, обобщенной электрической с одним ротором и двумя статорами [20]. Вторая модель – в наибольшей степени в описании проста, тем не менее дает не точные результаты моделирования переходных процессах, первая же модель имеет в большей мере сложные выражения для результирующего момента электромагнитного, но дает более точные результаты в режимах динамических работы.

В связи с перечисленными выше особенностями описания математической машины, обобщенной электрической с эллиптическим полем, для формирования модели математической выбрана модель с двумя ротором и двумя статорами (рисунок 8).

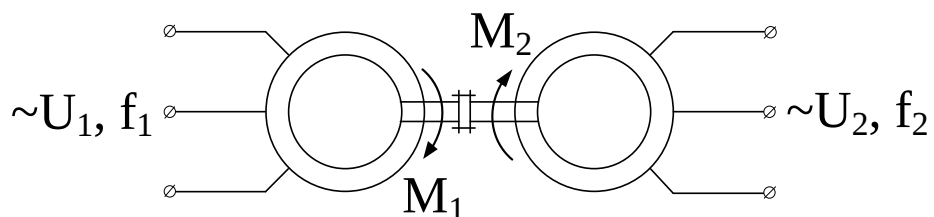


Рисунок 8 – Схема электрической машины с двумя статорами и двумя роторами

Исследования несимметричных машин с учетом пространственных гармоник или при наличии несинусоидальных питающих напряжений приводят машину к двухфазной неправомерно, так как поля в зазоре двухфазной и многофазной машин в этих условиях отличаются друг от друга [20]. Так как асинхронный двигатель при обрыве одной из фаз питающей сети является несимметричным – в качестве математической модели принята обобщенная электрическая машина в трехфазной системе координат.

В качестве основы были взяты уравнения модели асинхронного двигателя в заторможенной системе координат. Для упрощения расчетов уравнения для полей прямой и обратной последовательности представлены отдельными системами.

При определении напряжений, подаваемых на обмотки машин, отвечающих за поля прямой и обратной последовательности, учитывалось, что при постоянном питающем напряжении $U_1=U_A=U_B=U_C=\text{const}$ напряжения прямой и обратной последовательности зависят от скольжения [21].

Уравнения обобщенной электрической машины, имеющей два статора и один ротор для поля прямой последовательности имеют вид:

$$U_{1A} = R_s \cdot i_{1A} + \frac{d\Psi_{1A}}{dt} ;$$

$$U_{1B} = R_s \cdot i_{1B} + \frac{d\Psi_{1B}}{dt} ;$$

$$U_{1C} = R_s \cdot i_{1C} + \frac{d\Psi_{1C}}{dt} ;$$

$$0 = R_r \cdot i_{1a} + \frac{d\Psi_{1a}}{dt} + (\Psi_{1b} - \Psi_{1c})\omega / \sqrt{3} ;$$

$$0 = R_r \cdot i_{1b} + \frac{d\Psi_{1b}}{dt} + (\Psi_{1c} - \Psi_{1a})\omega / \sqrt{3} ;$$

$$0 = R_r \cdot i_{1c} + \frac{d\Psi_{1c}}{dt} + (\Psi_{1a} - \Psi_{1b})\omega / \sqrt{3} .$$

Потокосцепления для всех фаз:

$$\begin{aligned}
\Psi_{1A} &= L_S i_{1A} - \frac{1}{2} L_m i_{1B} - \frac{1}{2} L_m i_{1C} + L_m i_{1a} - \frac{1}{2} L_m i_{1b} - \frac{1}{2} L_m i_{1c}; \\
\Psi_{1B} &= -\frac{1}{2} L_m i_{1A} + L_S i_{1B} - \frac{1}{2} L_m i_{1C} - \frac{1}{2} L_m i_{1a} + L_m i_{1b} - \frac{1}{2} L_m i_{1c}; \\
\Psi_{1C} &= -\frac{1}{2} L_m i_{1A} - \frac{1}{2} L_m i_{1B} + L_S i_{1C} - \frac{1}{2} L_m i_{1a} - \frac{1}{2} L_m i_{1b} + L_m i_{1c}; \\
\Psi_{1a} &= L_m i_{1A} - \frac{1}{2} L_m i_{1B} - \frac{1}{2} L_m i_{1C} + L_R i_{1a} - \frac{1}{2} L_m i_{1b} - \frac{1}{2} L_m i_{1c}; \\
\Psi_{1b} &= -\frac{1}{2} L_m i_{1A} + L_m i_{1B} - \frac{1}{2} L_m i_{1C} - \frac{1}{2} L_m i_{1a} + L_R i_{1b} - \frac{1}{2} L_m i_{1c}; \\
\Psi_{1c} &= -\frac{1}{2} L_m i_{1A} - \frac{1}{2} L_m i_{1B} + L_m i_{1C} - \frac{1}{2} L_m i_{1a} - \frac{1}{2} L_m i_{1b} + L_R i_{1c}.
\end{aligned}$$

Уравнения для обратной последовательности:

$$\begin{aligned}
U_{2A} &= R_s \cdot i_{2A} + \frac{d\Psi_{2A}}{dt}; \\
U_{2B} &= R_s \cdot i_{2B} + \frac{d\Psi_{2B}}{dt}; \\
U_{2C} &= R_s \cdot i_{2C} + \frac{d\Psi_{2C}}{dt}; \\
0 &= R_r \cdot i_{2a} + \frac{d\Psi_{2a}}{dt} + (\Psi_{2b} - \Psi_{2c})\omega / \sqrt{3}; \\
0 &= R_r \cdot i_{2b} + \frac{d\Psi_{2b}}{dt} + (\Psi_{2c} - \Psi_{2a})\omega / \sqrt{3}; \\
0 &= R_r \cdot i_{2c} + \frac{d\Psi_{2c}}{dt} + (\Psi_{2a} - \Psi_{2b})\omega / \sqrt{3}.
\end{aligned}$$

Потокосцепления для всех фаз:

$$\begin{aligned}
\Psi_{2A} &= L_S i_{2A} - \frac{1}{2} L_m i_{2B} - \frac{1}{2} L_m i_{2C} + L_m i_{2a} - \frac{1}{2} L_m i_{2b} - \frac{1}{2} L_m i_{2c}; \\
\Psi_{2B} &= -\frac{1}{2} L_m i_{2A} + L_S i_{2B} - \frac{1}{2} L_m i_{2C} - \frac{1}{2} L_m i_{2a} + L_m i_{2b} - \frac{1}{2} L_m i_{2c}; \\
\Psi_{2C} &= -\frac{1}{2} L_m i_{2A} - \frac{1}{2} L_m i_{2B} + L_S i_{2C} - \frac{1}{2} L_m i_{2a} - \frac{1}{2} L_m i_{2b} + L_m i_{2c};
\end{aligned}$$

$$\Psi_{2a} = L_m i_{2A} - \frac{1}{2} L_m i_{2B} - \frac{1}{2} L_m i_{2C} + L_R i_{2a} - \frac{1}{2} L_m i_{2b} - \frac{1}{2} L_m i_{2c};$$

$$\Psi_{2b} = -\frac{1}{2} L_m i_{2A} + L_m i_{2B} - \frac{1}{2} L_m i_{2C} - \frac{1}{2} L_m i_{2a} + L_R i_{2b} - \frac{1}{2} L_m i_{2c};$$

$$\Psi_{2c} = -\frac{1}{2} L_m i_{2A} - \frac{1}{2} L_m i_{2B} + L_m i_{2C} - \frac{1}{2} L_m i_{2a} - \frac{1}{2} L_m i_{2b} + L_R i_{2c}.$$

Электромагнитные моменты M_1 и M_2 , создаваемые полями прямой и обратной последовательности, определяются по следующим выражениям:

$$M_1 = p \frac{\sqrt{3}}{2} L_m [(i_{1A} i_{1c} + i_{1B} i_{1a} + i_{1C} i_{1b}) - (i_{1A} i_{1b} + i_{1B} i_{1c} + i_{1C} i_{1a})]; \quad (2.16)$$

$$M_2 = p \frac{\sqrt{3}}{2} L_m [(i_{2A} i_{2c} + i_{2B} i_{2a} + i_{2C} i_{2b}) - (i_{2A} i_{2b} + i_{2B} i_{2c} + i_{2C} i_{2a})]; \quad (2.17)$$

Уравнение движения электропривода, учитывающее моменты прямой и обратной последовательности:

$$M_1 + M_2 - M_c = \frac{J_{\Sigma}}{p} \cdot \frac{d\omega}{dt}. \quad (2.18) \quad M_1 + M_2 + M_3 + M_4 - M_c = \frac{J_{\Sigma}}{p} \cdot \frac{d\omega}{dt} \quad (2.19)$$

1.3.3 Проверка адекватности асинхронного электропривода в аварийных и неполнофазных режимах

Расчет модели проводился в среде *SimulinkMatLab*. Для редложенной математической модели адекватность была проверена путем сравнения экспериментальных и расчетных данных.

Последствия сравнения процессов переходных, рассчитанных на модели и полученных экспериментально, приведены на рис. 9 и 10.

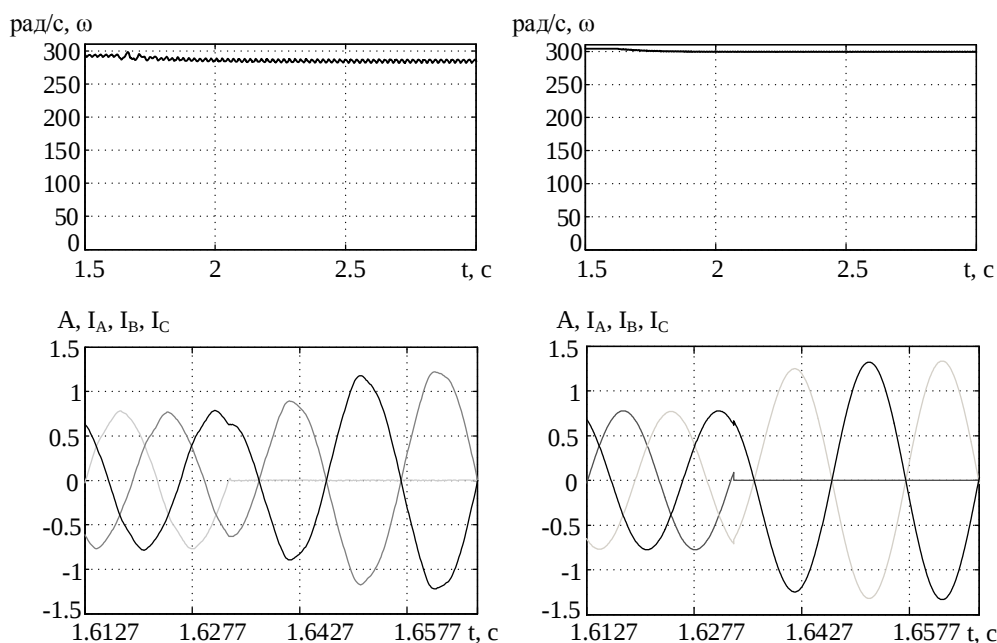


Рисунок 9 –Переходные процессы в двухфазном аварийном режиме работы для связанных фаз

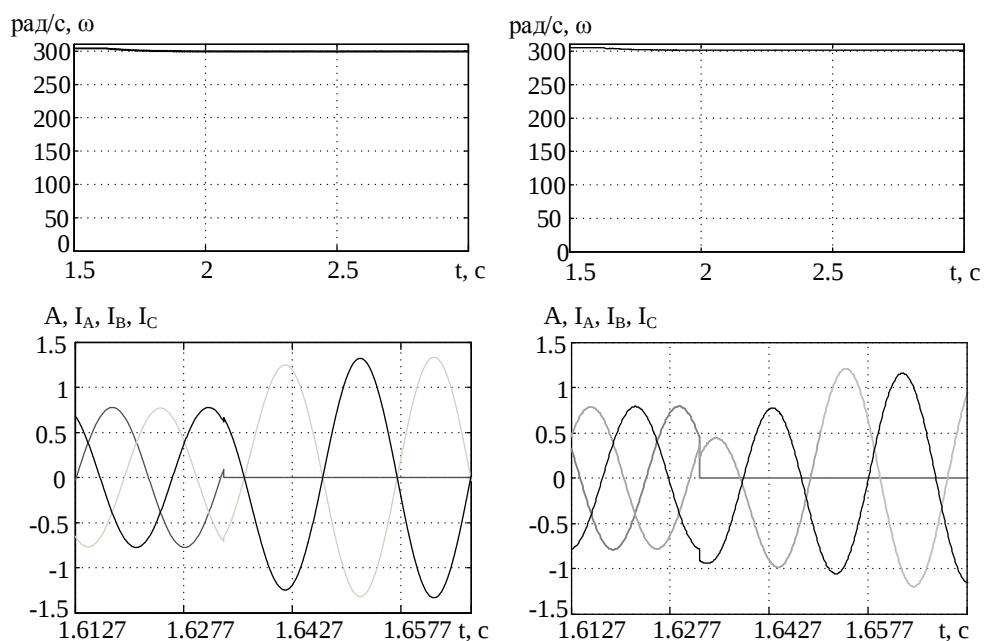


Рисунок 10 –Переходные процессы в двухфазном аварийном режиме работы для развязанных фаз

Данная модель математическая позволяет исследовать электродвигатель асинхронный в двухфазном аварийном режиме работы с учетом поля обратной последовательности, а также в режиме двухфазном работы с алгоритмическим поддержанием кругового вращающегося поля, когда поле обратной последовательности в воздушном зазоре отсутствует.

Амплитуда тока статора двигателя в опыте с подключением по схеме со связанными фазами при переводе из рабочего трехфазного в двухфазный аварийный режим больше в 1.1 раза по сравнению со случаем подключения по схеме с развязанными фазами. Падение частоты вращения относительно трехфазного режима составило 1,5% для двигателя с подключением по схеме со связанными фазами и 0.8% для двигателя с подключением по схеме с развязанными фазами.

Данная математическая модель разрешает исследовать электродвигатель асинхронный в двухфазном аварийном режиме работы с учетом обратной последовательности поля, а также в режиме двухфазной работы с алгоритмическим поддержанием кругового вращающегося поля, когда поле обратной последовательности в воздушном зазоре отсутствует.

1.3.4 Экспериментальные исследования асинхронного электропривода в аварийных и неполнофазных режимах

1.3.4.1 Автоматизированный испытательный стенд

Экспериментальные исследования были проведены при помощи автоматизированного испытательного стенда (рисунок 11). Эксперимент проводился для различных нагрузок двигателя и схем соединения средней точки двигателя и нейтрали сети.

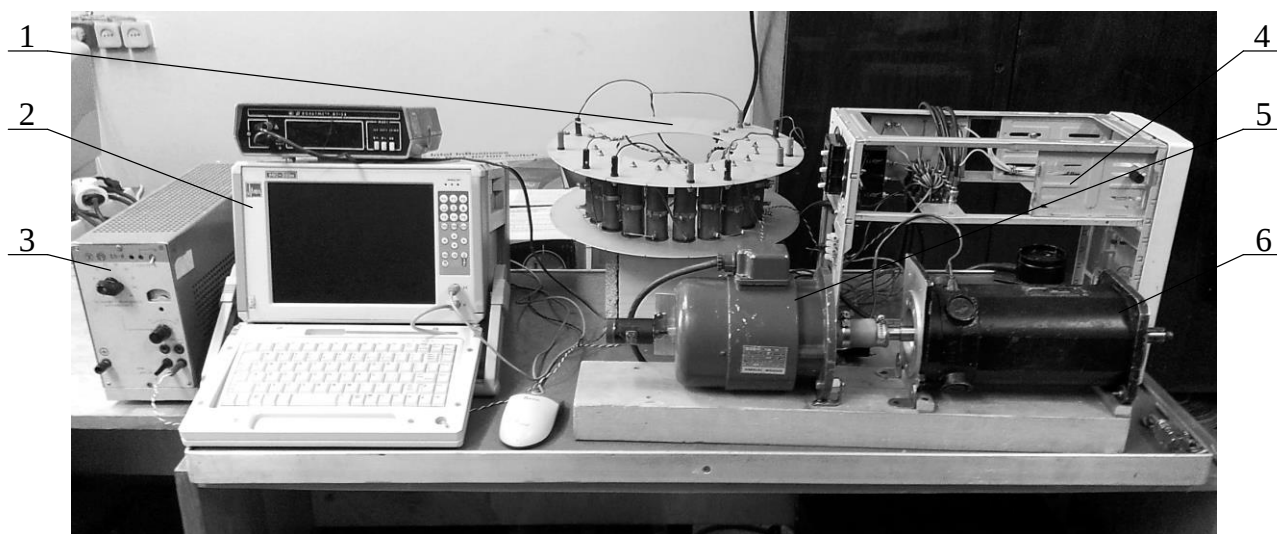


Рисунок 11 – Автоматизированный испытательный стенд для исследования аварийных и неполнофазных режимов работы асинхронного двигателя : 1-

резистивная нагрузка ; 2- компьютерная измерительная система MIC-300; 3- источник питания; 4-блок формирования аварийных режимов работы ; 5- асинхронный двигатель АИР63А2; 6- машина постоянного тока серии 1ПИ 12.11

Основной задачей представленного стенда является проведение испытаний аварийных и неполнофазных режимов работы электропривода переменного тока.

Поставленная задача решена за счет того, что испытательный стенд содержит переменного двигателя тока и машину тока постоянного, размещенные на монтажной раме, датчики тока, муфту и блок электрических управления и измерений. Машина тока постоянного через муфту соединена с переменного тока двигателем, один конец вала, которого соединен с датчиком скорости. К каждой фазе машины переменного тока подключен соответствующий датчик тока, соединенный с соответствующим управляемым ключом двухсторонней проводимостью, который подключен к соответствующему выводу источника переменного тока, который подключен к соответствующему выводу источника питания переменного тока. Точка соединения обмоток статора машины переменного тока соединена с четвертым датчиком тока, который подключен к четвертому управляемому ключу с двухсторонней проводимостью, связанному с нейтралью источника питания переменного тока. К якорной обмотке машины постоянного тока подключен пятый датчик тока, который соединен с блоком нагрузки, подключенным к машине постоянного тока. Датчик напряжения подключен параллельно блоку нагрузки. Все датчики тока, датчик напряжения и датчик скорости, управляющие выводы всех ключей с двухсторонней проводимостью подключены к блоку электрических измерений и управления.

Данный испытательный стенд позволяет проводить испытания как номинальных, так и аварийных и неполнофазных режимов работы электроприводов переменного тока.

1.3.6 Отказоустойчивое гибридное транспортное средство с асинхронным электроприводом

1.3.7 Постановка задачи

Разработка обеспечения живучести гибридного автомобиля при обрыве обмотки статора в одном из двигателей или отказе ключа в преобразователе частоты соответствующего колеса.

Транспортное средство содержит m -приводов колес, где $m \geq 2$, а нулевые провода асинхронных двигателей подключены с выходным напряжением бортового источника электрической энергии.

1.3.8 Функциональные возможности и работа отказоустойчивое гибридное транспортного средства

Функциональные возможности генератора достигаются следующим образом:

Асинхронный трехфазный двигатель подключен к преобразователю частоты выполненному по мостовой схеме на шести ключах и подключенному по цепям питания к накопителю электрической энергии. В этом случае в рабочем трехфазном режиме создается круговое вращающееся поле и в обмотках двигателя протекают трехфазные токи с фазовым сдвигом $2\pi/3$. При обрыве обмотки статора в приводном двигателе или отказе одного из ключа в преобразователе частоты приводного двигателя круговое вращающееся поле рабочего двигателя, после аварии становится пульсирующим с нулевым вращающим моментом, так как процесс формирования трехфазных токов зависит от протекающего тока в соседней фазе двигателя. В двух работоспособных фазах, токи будут иметь весьма похожую амплитуды с фазовым сдвигом π . При подключении нулевого провода асинхронных двигателей выходным напряжениям бортового источника электрической энергии в трехфазном рабочем режиме, также будут формироваться трехфазные токи, но протекание токов в каждой фазе теперь не будет зависеть от соседней фазы, а значит при потере работоспособности одной из фаз в двух оставшихся фазах будут формироваться двухфазные токи с фазовым сдвигом $2\pi/3$. Поле в зазоре электрической машины будет эллиптическим. Активная мощность двигателя упадет на 33% и эллиптическое поле не обеспечит равномерности вращения двигателя, но будет обеспечена ограниченная функциональность с формированием свойства живучести привода колеса. При соответствующем снижении на 33%

мощности в соседнем приводе колеса управляемость транспортного средства будет восстановлена. Функциональная схема в приложение № 3.

Работает отказоустойчивое гибридное транспортное средство следующим образом:

Водитель транспортного средства с пульта 9 (ПУ) съемным ключом зажигания подает на бортовой компьютер 9 (ПУ), сигнал включения бортового источника 1 (ИЭЭ) электропитания гибридного транспортного средства. Режим движения. При этом бортовой компьютер 9 (ПУ) подает управляющий сигнал на преобразователь 3 (ПЭЭ) для его подключения к силовым аккумуляторам накопителя 2 (НЭЭ) и преобразования постоянного напряжения указанных аккумуляторов в переменное трехфазное напряжение. Далее водитель включает направление движения транспортного средства рычагом «вперед-назад». При этом бортовой компьютер 9 (ПУ) выдает сигнал на электронный преобразователь 3 (ПЭЭ) для переключения статорных обмоток двигателей 5 в выбранное направление вращения привода колес 4. Затем водитель педалью скорости движения транспортного средства задает через бортовой компьютер 9 (ПУ) на электронный преобразователь 3 (ПЭЭ) частоту трехфазного напряжения, пропорциональную скорости вращения привода колес 4. При этом трехфазное напряжение заданной частоты электронного преобразователя 3 (ПЭЭ) подается одновременно на статорные обмотки двигателей 5, передних и/или задних колес 4 в зависимости от выбранного водителем режима движения исходя из качества дороги и скоростных ограничений. Нажатие водителем на педаль тормоза обеспечивает выдачу бортовым компьютером 9 команд на электронный преобразователь 3 (ПЭЭ) для переключения обмоток статора двигателей 5 на обратное движение и для изменения частоты напряжения, пропорциональной силе нажатия на педаль тормоза. При этом двигатели 5 переходят на режим генерации электроэнергии, а именно преобразования при торможении колес энергии инерции транспортного средства в электрическую энергию.

При возникновении аварии: обрыве одной из фазы обмотки статора двигателя 5 происходит падение мощности, падает скорость движения. По управляющему

входу 7 в бортовой компьютер 8 (БК) поступает информация о снижении потребления тока электронным преобразователем 3 (ПЭЭ) и на пульте управления 9 (ПУ) появляется информация об аварии и о доступном остаточном ресурсе по мощности приводного двигателя 5. Скорость движения уменьшается. В случае пуска транспортного средства после не устраненной аварии процесс начала движения транспортного средства не отличается от нормальной эксплуатации, с учетом ограничений по сниженной мощности привода колеса 4, которая сохраняется в бортовом компьютере 9(ПУ) и выводится на пульт управления 9 (ПУ). В схему заложена решение проблемы по отказоустойчивости асинхронного электропривода. (Приложение №4)

1.3.8 Выводы по разделу

Описание разработки обеспечения живучести гибридного автомобиля при обрыве обмотки статора в одном из двигателей или отказе ключа в преобразователе частоты соответствующего колеса.

Список литературы

1. Электрические машины: в 2-х ч. Ч. 1: Учеб. для электротехн. спец. вузов. – 2-е изд. перераб. и доп. / Д.Э. Брускин, А.Е. Зорохович, В.С. Хвостов. – М.: Высш. шк., 1987. – 319 с.: ил.
2. Копылов И. П. Электрические машины: Учебник для вузов. – 2-е изд., перераб. – М.: Высшая школа; Логос; 2000. – 607 стр.
3. Петров Г.Н. Электрические машины, ч.2, Асинхронные и синхронные машины, М.-Л., Госэнергоиздат, 1963, 416 с. с черг.
4. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей / Под ред. Л.Г. Мамиконянца. – 4-е изд., переработ. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 240 с., нл.
5. Герман – Галкин С. Г., Кардонов Г. А. Электрические машины: Лабораторные работы на ПК. – СПб.: КОРОНА принт, 2003. – 256 стр., ил.
6. Однокопылов Г.И., Однокопылов И.Г. Обеспечение живучести электродвигателей переменного тока: Монография. – Томск: Изд-во ТПУ, 2005. – 187 с.
7. Однокопылов Г.И., Образцов К.В., Однокопылов И.Г. Принципы обеспечения «живучести» электроприводов переменного тока. // Электричество. – 2009. – №12. – с. 51-57.
8. Однокопылов Г.И., Однокопылов И.Г. Повышение живучести частотно – регулируемого асинхронного электропривода // Известия ТПУ, Изд-во ТПУ, 2005, №7, с. 143-148.
9. Однокопылов Г.И., Брагин А.Д. Исследование в среде Matlab Simulink трехфазного асинхронного электропривода в аварийном двухфазном режиме работы // «Технические науки — от теории к практике»: материалы XVI международной заочной научно – практической конференции. — Новосибирск, 2012. — с. 125-130.

10. Однокопылов Г. И. , Брагин А. Д. , Однокопылов И. Г. , Столяров Д. П. Исследования асинхронного электропривода в аварийном двухфазном режиме // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. - 2012 - №. 2 - С. 290-293.
11. Chia-Chou Yeh «Induction Motor-Drive Systems with Fault Tolerant Inverter-Motor Capabilities». - Electric Machines & Drives Conference, 2007. Dept. of Electr. & Comput. Eng., Marquette Univ., Milwaukee, WI Demerdash, N.A.O. V.: 2 P.: 1451 – 1458.
12. Патент РФ на изобретение № 2326480, МПК H02H7/09, H02H7/12, Способ управления и обеспечения живучести трёхфазного асинхронного двигателя / Г.И. Однокопылов, И.Г. Однокопылов, - № 2007112527; заявлено 04.04.2007 г.; опубл. 10.06.2008 г. Бюл. №16.
13. Патент РФ на полезную модель № 128421, МПК H02P25/08, H02H 7/09, H02H 7/10, Асинхронный электропривод со свойством живучести / Г.И. Однокопылов, В.Г. Букреев, А.Д. Брагин – № 2012153525/07; заявлено 11.12.2012 г.; опубл. 20.05.2013 г. Бюл. №14.
14. Принципы обеспечения живучести асинхронного электропривода на основе резервных элементов [Электронный ресурс] / Г. И. Однокопылов, В. Г. Букреев, А. Д. Брагин // Известия Томского политехнического университета [Известия ТПУ] / Томский политехнический университет (ТПУ) . — 2013 . — Т. 322, № 4 : Энергетика . — [С. 133-137] . — Заглавие с титульного листа. — Электронная версия печатной публикации
15. Брагин А.Д. Исследование отказоустойчивого электропривода на основе резервных элементов // Технология и автоматизация атомной энергетики и промышленности: Материалы Отраслевой научно – технической конференции, 27 – 31 мая 2013г., г. Северск: Изд. СТИ НИЯУ МИФИ, 2013. – с. 57.

16. Мальцева О.П., Удут Л.С., Кояин Н.В. Системы управления асинхронных частотно – регулируемых электроприводов : учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2001. – 476 с.
17. Терехов В.М., Осипов О.И. Системы управления электроприводов : Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 2005. – 304 с.: ил.
18. Воронин, П.А. Системы управления частотно – регулируемого асинхронного электропривода : методические указания по курсу «Системы управления электроприводов» / П.А. Воронин; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург: ИПК ГОУ ОГУ, 2011. – 51 с.
19. Панкратов В.В. Автоматическое управление электроприводами. Часть I. Регулирование координат электроприводов постоянного тока: учеб. пособие / В.В. Панкратов. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2013. – 215 с.
20. Копылов И. П. Математическое моделирование электрических машин: Учеб. для вузов. – 3-е изд. перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 2001. – 327 с.
21. Иванов-Смоленский А. В. Электрические машины: Учебник для вузов. – М.: Энергия, 1980. – 928 с.
22. Однокопылов И. Г., Орлов Д. Ю. Математическая модель асинхронного двигателя с электромагнитным тормозным устройством // Наука. Технологии. Инновации // Материалы всероссийской научной конференции молодых ученых в 6-ти частях. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. – Ч. 1. – 233 с.
23. Мальцева О.П. Системы управления электроприводов.: учебное пособие / О.П. Мальцева, Л.С. Удут, Н.В. Кояин. – Томск: Издательство Томского Политехнического университета, 2007. – 152 с.
24. А.с. № 1746482 (СССР), МКИЗ Н 02 Р 7 / 42. Вентильный электропривод / Г.И. Однокопылов, А.П. Зайцев, Г.В. Обрусник, А.В. Петров, В.Н. Софронов. – Оpubл. в Б.И., 1992, № 25.
25. Pat. 5323093 (США), Int.Cl. Н 02 К 23 / 00. Brushless motor driving device / Kikuchi Atsushi. – Оpubл. 21.6.94.

26. Rechnergestützte Prüf – und Diagno – severfahren für Vorschubsantriebe / Weselow O., Chrapko P. // 11. Int. Fachtag. «Ind Autom.- Autom. Antriebe» Chemnitz, 12–14 Febr., 1991. – Chemnitz, 1991. – С. Р 15/1 – Р 15/4.
27. Pat. 5446354 (США), Int.Cl. H 01 R 39/46. Drive apparatus for brushless dc motor and failure diagnosing method for the same / Hiruma Atsuyuki. – Опубл. 29.8.95.
28. Чернышев А.Ю. Электропривод переменного тока : учебное пособие / А.Ю. Чернышев, Ю.Н. Дементьев, И.А. Чернышев; Томский политехнический университет. – Томск : Изд – во ТПУ, 2011. – 213 с.
29. Онищенко Г.Б. Электрический привод : учебник для студ. высш. учеб. заведений / Г.Б. Онищенко. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 288 с.
30. Интернет-ресурс–<http://www.elp.ru/digest/Vypriamiteli-regulatory-preobrazovateli-poluprovodnikovye/>



НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ИРКУТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

ДИПЛОМ

II СТЕПЕНИ

награждается

Участник Всероссийской научно-практической конференции
с международным участием «Повышение эффективности
производства и использования энергии в условиях Сибири»

Сенькив Елена Петровна,

студентка гр. 5Г2А

**ФГАОУ ВО Национальный исследовательский Томский
политехнический университет**

за высокий научный уровень представленного доклада

*Научные руководители: к.т.н., доцент Однокопылов Г.И., к.т.н.,
асс. Толпаров Д.В.*

Директор института
Энергетики



В.В. Федчишин

**Иркутск,
21-25 апреля 2015 г.**



ДИПЛОМ

I СТЕПЕНИ

Награждается

СЕНЬКИВ ЕЛЕНА ПЕТРОВНА

студент группы 5Г2А Энергетического института
Томского политехнического университета
за доклад **"Исследование на математической модели
трехфазного асинхронного двигателя в
неполнофазном режиме работы"**, представленный
на III Международном молодежном форуме
"Интеллектуальные энергосистемы"

28 сентября-2 октября 2015г.



ЧУБИК
Петр Савельевич
Ректор

Министерство транспорта Российской Федерации
Федеральное агентство железнодорожного транспорта

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
"Дальневосточный государственный университет путей сообщения"



ДИПЛОМ

I СТЕПЕНИ

НАГРАЖДАЕТСЯ УЧАСТНИК

Сенькив Елена Петровна

студентка гр. 5Г2А ФГАОУ ВО Национальный
исследовательский Томский политехнический университет

за высокий уровень представленного доклада,

*Научные руководители: к.т.н. доцент Однокопылов Г.И.,
ассистент Толпаров Д.В.*

представленного на Всероссийской научно-технической
конференции

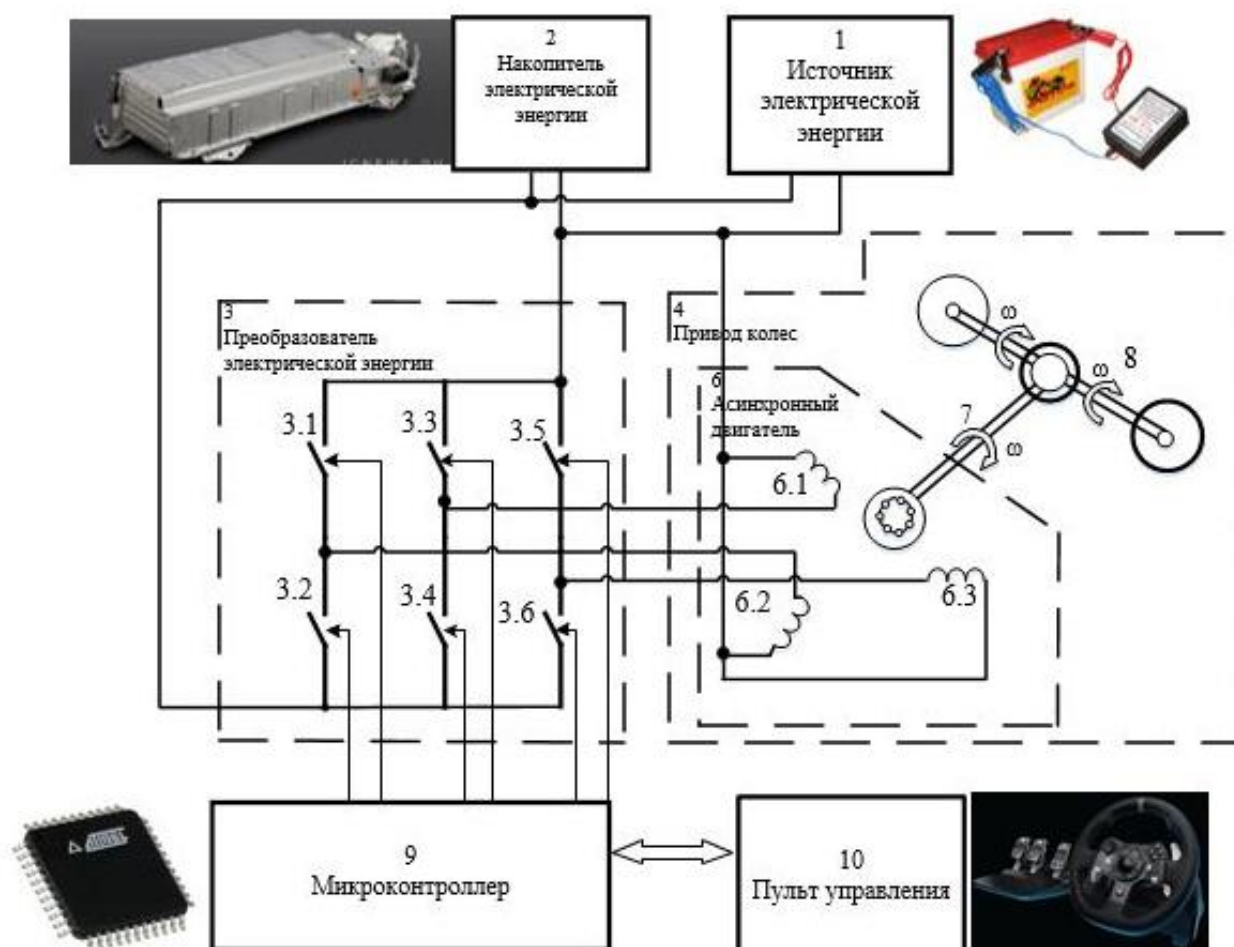
«Наука, творчество и образование в области электро-
энергетики и электротехники – достижения и перспективы»,

*посвященной 50-летию Электроэнергетического института ДВГУПС и
55-летию кафедры «Системы электроснабжения»*

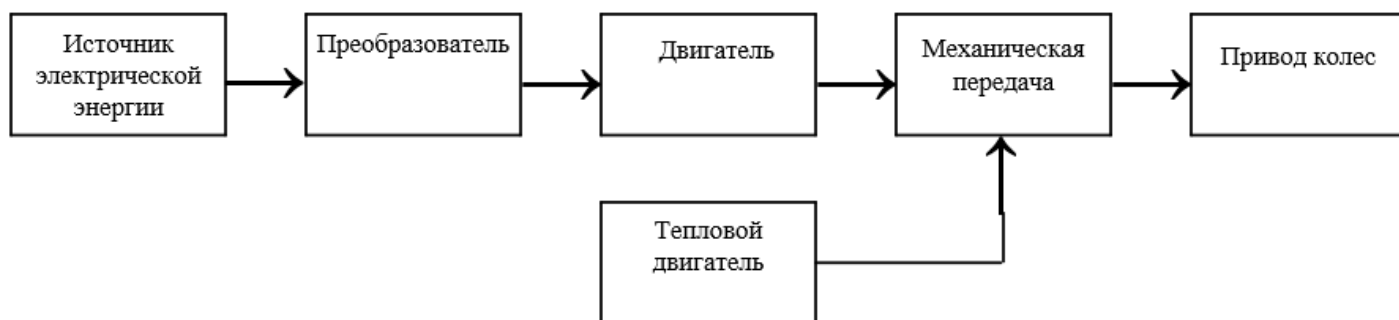
Проректор
по научной работе

С.А. Кудрявцев

19 – 20 ноября 2015 год
г. Хабаровск



Функциональная схема отказоустойчивого гибридного транспортного средства с одним приводом и дифференциальной передачей на два ведущих колеса



Структурная схема гибридного автомобиля