

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 Насибовой Людмиле Ягубовне

1. Тема выпускной квалификационной работы

«Отказоустойчивый вентильно-индукторный электропривод для гибридного транспортного средства»

утверждена приказом ректора (распоряжением директора
ЭНИН) от _____ № _____

2. Срок сдачи студентом готовой работы _____

3. Исходные данные к работе для привода гибридного транспортного средства:

Напряжение питающей сети: 230 В

Момент инерции $J_{\theta} = 0,05 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$

Максимальный ток $I_{\text{max}} = 450 \text{ А}$

Максимальное потокосцепление $\psi_{\text{max}} = 0,486 \text{ В} \cdot$

с Сопротивление обмотки статора $R_{oc} = 0,05 \text{ Ом}$

Требования к обеспечению отказоустойчивости электропривода:

- предусмотреть типы отказов работы электропривода;
- исследовать алгоритмы обеспечения отказоустойчивости электропривода;
- исследовать математическую модель отказоустойчивого вентильно-индукторного электропривода в неполнофазных и аварийных режимах.

4. Содержание текстового документа (перечень подлежащих разработке вопросов)

4.1 Введение

4.2 Обзор текущих исследований в области применения вентильно-индукторных электроприводов

4.3 Математическое моделирование вентильно-индукторного электропривода

4.4 Имитационное моделирование вентильно-индукторного электропривода

4.5 Выбор и обоснование электродвигателя, расчет элементов схемы

4.6 Алгоритмическое восстановление работоспособности вентильно-индукторного электродвигателя в аварийном режиме работы
Социальная ответственность Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

4.7 Заключение

5. Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей)

5.2 Функциональная схема гибридного транспортного средства

6. Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы

Руководитель _____
(подпись, дата)

Задание принял к исполнению

(подпись, дата)

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа содержит:

страниц	72
рисунков	58
таблиц	12
источников	46
графический материал	1

Ключевые слова: гибридное транспортное средство, односекционный вентильно-индукторный электропривод, обрыв фазы электродвигателя, алгоритм отказоустойчивого управления, математическая модель вентильно-индукторного электропривода, имитационная модель вентильно-индукторного электропривода.

Объектом исследования является отказоустойчивый вентильно-индукторный электропривод в составе гибридного транспортного средства.

Целью работы является анализ методов и принципов отказоустойчивого управления вентильно-индукторным электроприводом, построение математической и имитационной модели односекционного вентильно-индукторного электропривода для исследования аварийных и неполнофазных режимов работы, исследование алгоритмов отказоустойчивого управления для односекционного вентильно-индукторного электропривода.

Выпускная квалификационная работа выполнена с использованием пакета прикладных программ: Microsoft WordOffice 2013, Mathcad 14, MathType 6.0, MatLab 7.11 (R2010b), AbbyLingvo 10.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
ГЛАВА 1. ВЕНТИЛЬНО ИНДУКТОРНЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД	5
1.1. Общие сведения о гибридном транспортном средстве.....	5
1.2. Общие сведения о вентильно-индукторном двигателе.....	7
2. Обзор текущих исследований в области применения вентильно-индукторных электроприводов.....	10
2.1. Системы экскаваторного электропривода на базе вентильно-индукторных двигателей с независимым возбуждением.	11
2.2. Вентильно-индукторный электродвигатель в системе ЖКХ с двумя независимыми источниками питания.	14
ГЛАВА 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА	18
2.1. Математическое моделирование вентильно-индукторного электропривода.....	18
2.2. Имитационное моделирование односекционного вентильно - индукторного электропривода в MathLabSimulink.	22
ГЛАВА 3. ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ПО ПОСТРОЕНИЮ ОТКАЗОУСТОЙЧИВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА И АЛГОРИТМЫ ОТКАЗОУСТОЙЧИВОГО УПРАВЛЕНИЯ.....	27
3.1. Функциональная схема вентильно-индукторного электропривода для гибридного транспортного средства	27
3.2. Выбор и обоснование электродвигателя.....	29
3.3. Исследование преобразователя для коммутации обмоток ВИД.....	32
3.4. Расчет оптронов.	36
3.5. Расчет силовых ключей.	38
3.6. Алгоритмическое восстановление работоспособности вентильно-индукторного электродвигателя в аварийном режиме работы.....	42
ГЛАВА 4. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ.....	45

4.1. Потенциальные потребители результатов исследования.....	45
4.2. Технология QuaD.....	48
4.3. SWOT-анализ.....	51
4.4. Планирование научно-исследовательских работ.....	52
4.5. Определение трудоемкости работ.....	54
4.6. Разработка графиков проведения научных исследований.....	56
4.7. Бюджет научно-технического исследования (НТИ).....	58
4.8. Расчет затрат.....	59
4.9. Определение ресурсоэффективности работ.....	60
ГЛАВА 5. СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ.....	60
5.1. Описание технологического процесса.....	60
5.2. Анализ опасных производственных факторов и обоснование мероприятий по их устранению.....	62
5.3 Анализ вредных производственных факторов и обоснование мероприятий по их устранению.....	66
5.4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности.....	69
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	70
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ	71
ПРИЛОЖЕНИЕ	72

ВВЕДЕНИЕ

Одним из относительно новых типов электрических машин является вентильно-индукторный двигатель (ВИД). ВИД представляет собой работающий в режиме постоянного вращения шаговый двигатель. По этой причине его относят к классу синхронных реактивных машин. В мировой технической литературе приводится множество других названий ВИД: управляемый вентильный реактивный двигатель, коммутируемый реактивный двигатель с переменным магнитным сопротивлением, электронно-коммутируемый двигатель, бесконтактный реактивный двигатель, двигатель с электромагнитной редукцией. Разнообразие терминов для обозначения одного объекта отражает относительно малый возраст данного двигателя. Из-за сложности ВИД отразить специфику этого процесса в нескольких словах названия практически невозможно. Разработка и исследования этого типа электроприводов является сейчас перспективным направлением. Вентильно-индукторные электропривода могут найти свое применение в автомобилестроении, а именно, в гибридном транспортном средстве, где предъявляются высокие требования к отказоустойчивости работы такого автомобиля.

ГЛАВА 1. ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД

1.1. Общие сведения о гибридном транспортном средстве

Гибридное транспортное средство или автомобиль — автомобиль, использующий для привода ведущих колёс более одного источника энергии.

В настоящее время в автопроизводстве часто применяется совместное использование двигателя внутреннего сгорания (ДВС) и электродвигателя, для исключения работы ДВС в режиме малых нагрузок и реализации рекуперации кинетической энергии, тем самым повышая топливную эффективность силовой установки. [2]

Транспортные средства с электромеханической трансмиссией необходимо отличать, и яркими примерами таких транспортных средств можно назвать тепловозы, некоторые карьерные самосвалы (за исключением последних моделей, где внедрен последовательный гибридный привод), тракторы типа ДЭТ-250 и танки.[1]

По методу подключения двигателей и накопителя к приводу различают последовательную параллельную и последовательно-параллельную схемы. Последовательной схемой можно назвать схему с электромеханической трансмиссией и промежуточным накопителем. Двигатель внутреннего сгорания механически соединяется с электрогенератором, а тяговый электродвигатель — с колёсами. Для параллельной схемы соединение представляет собой механически соединённые с колёсами двигатель внутреннего сгорания и электродвигатель посредством дифференциала, обеспечивающий возможность их работы по отдельности и совместно. Последовательно-параллельная представляет собой двигатель внутреннего сгорания, генератор и электродвигатель механически связанные колёсами

посредством планетарного редуктора, что позволяет произвольное изменение потоков мощностей между этими узлами.

В качестве накопителя энергии могут выступать аккумуляторные батареи, батареи конденсаторов и ионисторы (суперконденсаторы).

Применяя накопитель энергии значительной ёмкости гибридный автомобиль имеет возможность двигаться без включения двигателя внутреннего сгорания — в «режиме электромобиля». В случае применения питания транспортного средства от электрической сети говорят о «подключаемом гибриде» (англ. Plug-inHybrid).[4]

Основным преимуществом гибридного автомобиля является снижение расхода топлива и вредных выхлопов, что достигается при помощи автоматизации управления работой двигателей посредством бортового компьютера. Управление осуществляется начиная от своевременного отключения двигателя во время остановки, с возможностью немедленного возобновления движения без его запуска, исключительно на запасённой в накопителе энергии, и заканчивая более сложным механизмом рекуперации — использование кинетической энергии движущегося автомобиля при торможении для зарядки накопителя при работе электродвигателя в режиме электрогенератора. Как и в случае с электромеханической трансмиссией, двигатель внутреннего сгорания, как правило, работает на оптимальных режимах.[4]

1.2 Общие сведения о вентильно-индукторном двигателе

Вентильно – индукторный двигатель (ВИД) – это относительно новый тип электрического двигателя, который и как любой электродвигатель, обеспечивающий преобразование электроэнергии, которая поступает от питающей сети, в механическую энергию, передаваемую в нагрузку. Как система регулируемого электропривода, ВИД дает возможность осуществлять управление этим процессом в соответствии с особенностями

конкретной нагрузки: регулировать частоту вращения, момент, мощность и т. д. [1]

Вентильно-индукторный двигатель представляет собой достаточно сложную электромехатронную систему, структурная схема которой приведена на рисунке 1.1.

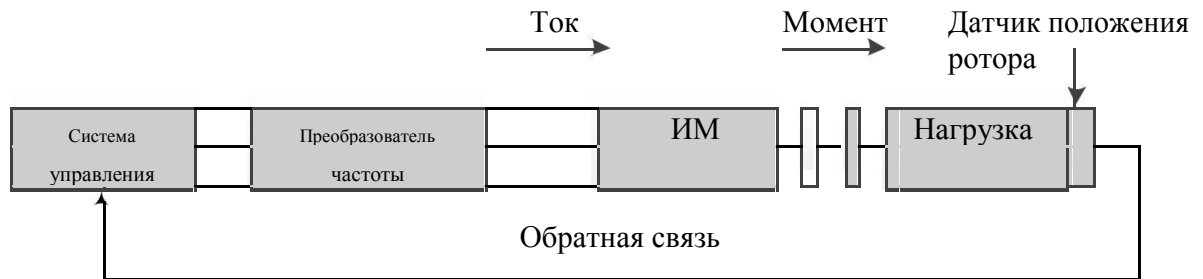


Рисунок 1.1. Структурная схема вентильно-индукторного двигателя

В ее состав входят: индукторная машина (ИМ), преобразователь частоты, система управления и датчик положения ротора (ДПР). Эти элементы ВИД обеспечивают конкретные функции. Преобразователь частоты обеспечивает питание фаз ИМ однополярными импульсами напряжения прямоугольной формы; ИМ осуществляет электромеханическое преобразование энергии; система управления в соответствии с заложенным в нее алгоритмом и сигналами обратной связи, поступающими от датчика положения ротора, управляет данным процессом. [2]

Структура ВИД по своей структуре схожа с классической системой регулируемого электропривода и поэтому обладает ее свойствами. Однако в отличие от регулируемого электропривода, индукторная машина в ВИД не является самодостаточной. Она принципиально неспособна работать без преобразователя частоты и системы управления. Преобразователь частоты и система управления являются неотъемлемыми частями индукторной машины, которые необходимы для осуществления электромеханического преобразования энергии. Это дает право утверждать, что совокупность структурных элементов, представленных на рисунке 1.1, является не только

системой регулируемого электропривода, но и электромеханическим преобразователем энергии [1].

2. Обзор текущих исследований в области применения вентильно-индукторных электроприводов

Бурное развитие ВИД началось примерно 20 лет назад. Вместе с тем следует отметить, что сама концепция этой электрической машины была сформулирована еще в конце тридцатых годов XIX века. Первый двигатель был создан Дэвидсоном и использовался на железной дороге Глазго-Эдинбург для приведения в движение локомотива массой несколько тонн. В силу несовершенства элементной базы (в первом ВИД использовался механический коммутатор) массового применения эти электрические машины в то время не нашли и о них забыли более чем на сто лет. Вторая половина XX века характеризовалась, с одной стороны, стремительным развитием силовой и информационной электроники, а с другой - все возрастающими требованиями, предъявляемыми к электрическим машинам, которым традиционным типам электромеханических преобразователей энергии становилось все труднее и труднее удовлетворять. Это создало предпосылки и обеспечило техническую базу для разработки и производства ВИД. В настоящее время многие крупнейшие электротехнические компании мира либо уже серийно производят эти электрические машины, либо готовятся к этому. Несмотря на свою более чем вековую историю, ВИД представляет собой относительно новый тип электромеханического преобразователя энергии, в теории и практике которого еще много белых пятен. В частности, практически нет отечественной методической литературы по этим электрическим машинам. [1]

В последние годы заметен бурный рост зарубежных и отечественных исследований в области создания простых по конструкции и надежных электрических машин для электроприводов, где технологичность, простота, низкая цена и отказоустойчивость исполнительного двигателя имеют решающее значение, а требуемые показатели качества достигаются за счет применения высокоинтеллектуальных преобразователей частоты. Подобные исследования имеют решающее значение в особенности для промышленного

оборудования опасных производственных объектов: ядерных, военных, химических, строительных, металлургических и транспортных, где возникает проблема организации отказоустойчивого управления исполнительными электроприводами (ЭП) с обеспечением свойства живучести. Несколько примеров отечественных исследований и применений ВИП приведены в данном разделе.

2.1. Системы экскаваторного электропривода на базевентильно-индукторных двигателях с независимым возбуждением.

До настоящего времени в регулируемых приводах основных механизмов экскаваторов и буровых станков находили применение только коллекторные двигатели постоянного тока и асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором. Традиционно применяемая на экскаваторах система Г-Д в течение последних 15 лет активно заменяется системой Тиристорный преобразователь-Двигатель постоянного тока (ТП-Д), а также системой Преобразователь частоты с непосредственной связью – асинхронный двигатель (НПЧ-АД). Для обеих систем электропривода до сих пор не найдено удовлетворительное решение проблемы повышенного потребления реактивной мощности и значительных искажений напряжения питающей сети. Сейчас наиболее перспективны ВИД с независимой обмоткой возбуждения. Поток возбуждения при вращении ротора модулируется его зубчатой структурой и с якорной обмотки можно снять обычную трехфазную систему синусоидальных напряжений - машина может работать в качестве индукторного генератора. Напротив, при питании обмотки статора от инвертора напряжения машина переходит в двигательный режим. Допускается как разнополярная шеститактная коммутация по датчику положения ротора (режим вентильного двигателя), так и синусно-косинусное управление напряжениями или токами статора в системах векторного управления. В обоих случаях используется такой же

мостовой инвертор напряжения, как и в частотно-регулируемых асинхронных приводах.

Для вентильно-индукторных приводов необходим датчик положения ротора, однако принципиально возможно создание систем бездатчикового управления, базирующихся на измерении ЭДС статорных обмоток и цифровом выделении сигнала текущего электрического положения ротора.

Методы выделения сигнала положения, разработанные применительно к синхронным двигателям с активным ротором, оказываются эффективными и работоспособными для вентильно-индукторных двигателей с независимым возбуждением. Наиболее перспективна и реалистична структура экскаваторного электропривода, реализованная на уже отработанных в серийных преобразователях частоты «Универсал» и функционально законченных силовых и управляющих модулях – рисунок 1.2.

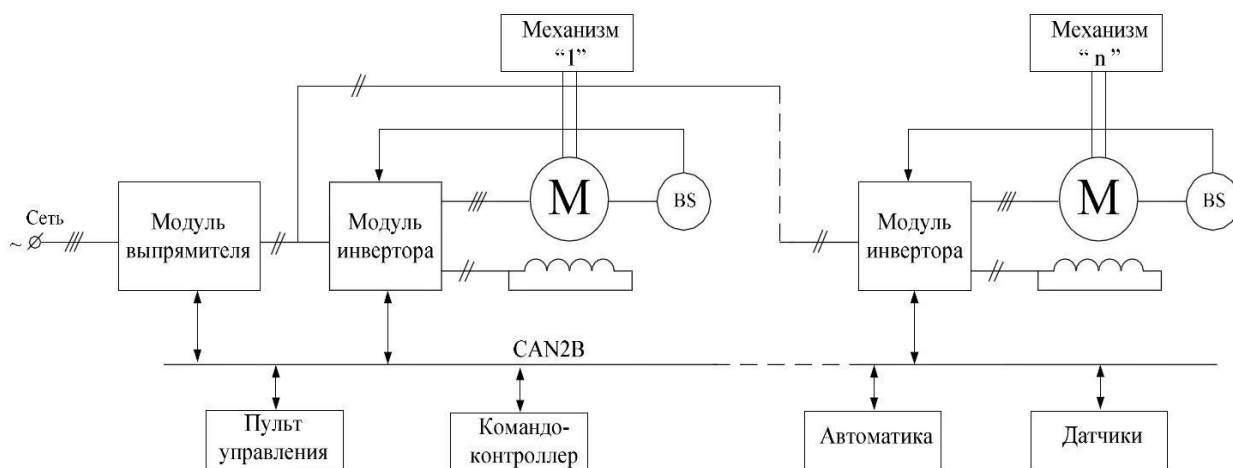


Рисунок 1.2. Структура многоосевого экскаваторного электропривода на базе вентильно-индукторных двигателей с независимым возбуждением.

В составе силовой части имеется модуль выпрямителя. Для рассматриваемых машин предпочтительно иметь один выпрямитель на все электроприводы, что позволяет обеспечить частично прямой обмен энергией между механизмами, уменьшив рекуперацию в сеть и увеличив КПД системы в целом. Для каждого двигателя устанавливается модуль трехфазного инвертора (возможно несколько модулей инверторов при

дроблении мощности по секциям статора двигателя). Модуль инвертора имеет в своем составе дополнительный ключ для управления контуром возбуждения двигателя. Каждый инвертор имеет высокопроизводительный встроенный контроллер привода, обеспечивающий прием сигналов с датчика положения и прямое цифровое управление силовыми ключами. Все контроллеры приводов объединены надежной локальной промышленной сетью CAN, к которой подключены также дополнительные

«интеллектуальные» модули со встроенным CAN-интерфейсом:

- модуль пульта оперативного управления с дисплеем и клавиатурой для управления процессом тестирования, настройки приводов и отображения текущего состояния и значений наблюдаемых переменных;
- модуль командоконтроллера для приема и обработки сигналов от командоконтроллера машиниста;
- модули дискретного и аналогового ввода/вывода для сопряжения с дополнительными датчиками и технологической автоматикой;
- модули сопряжения с системами верхнего уровня для решения задач диспетчеризации, в том числе с радиомодемами для сопряжения с удаленными компьютерами. Модуль инвертора типовой и состоит из трех «стоек» силовых ключей на IGBT транзисторах с обратными диодами, собранными в «интеллектуальный» модуль или несколько модулей (Intelligent Power Module - IPM). Для питания обмотки возбуждения двигателя используется седьмой ключ с встречно включенным диодом.

На рисунке 1.3. представлена структура системы управления трехсекционным вентильно-индукторным двигателем

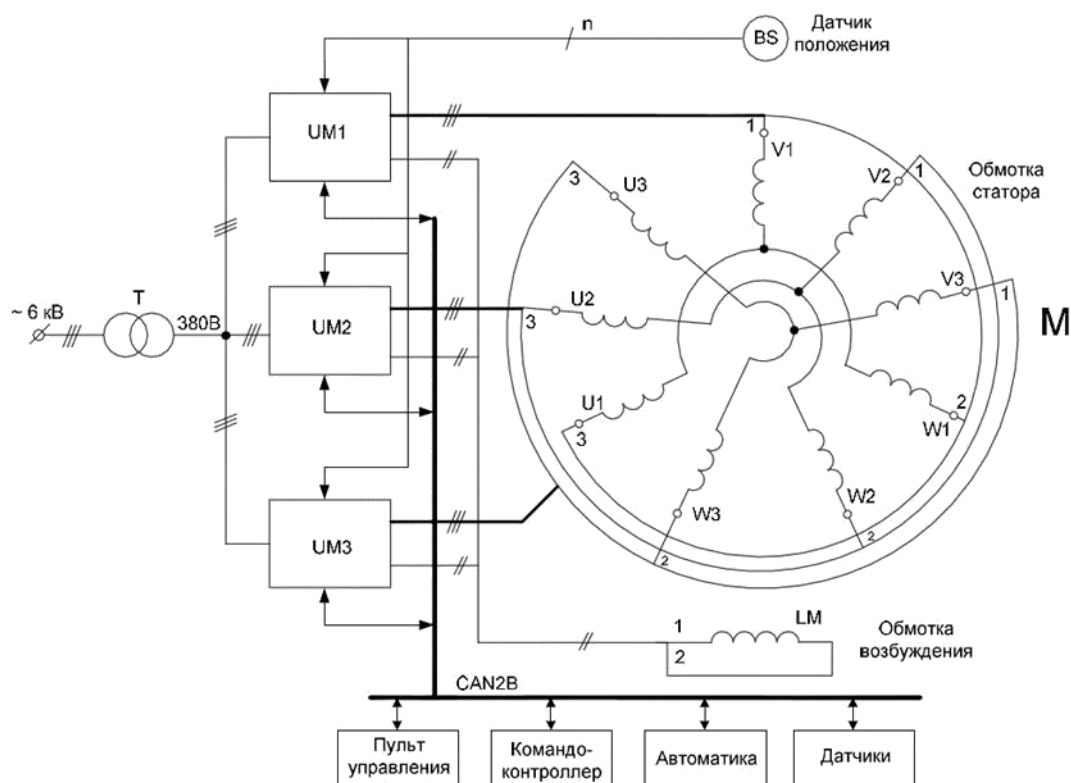


Рисунок 1.3. Функциональная схема электропривода подъема экскаватора на базе вентильно-индукторного двигателя.

Силовая часть привода состоит из двигателя М, трех преобразователей UM1-UM3 и согласующего трансформатора Т. ВИД девятифазный, обмотка статора разбита на три трехфазные группы. Имеется одна общая обмотка возбуждения LM и общий датчик положения ротора BS. Каждый из трех преобразователей подключен по силовому входу к сети через согласующий понижающий трансформатор, по силовому выходу к своей трехфазной группе обмоток статора. Все три преобразователя имеют выход для питания обмотки возбуждения двигателя и подключены к ней параллельно. По информационным входам каждый из трех преобразователей подключен к своей группе выходов импульсного датчика положения ротора.

2.2. Вентильно-индукторный электродвигатель в системе ЖКХ с двумя независимыми источниками питания.

Свойством электропривода, относящимся к повышению надёжности тепловодоснабжения, является его безостановочная работа при

кратковременном нарушении электропитания. Это обеспечивается электропитанием секций электропривода от двух или более независимых вводов, одновременное нарушение по которым маловероятно.

Известно устройство питания вентильно-индукторного электродвигателя с многофазной независимой обмоткой статора, разделенной на независимые каналы. В составе электропривода имеется датчик положения ротора, два преобразователя частоты и блока управления. Дополнительно используется автоматическая система управления технологическим процессом (АСУ ТП). Включены два взаиморезервированных контроллера, соединенных между собой в единую сеть, периферийные модули ввода-вывода сигналов с различных периферийных устройств соединенных с контроллерами промышленной сетью. Имеются устройства распределения силового питания с независимыми вводами, коммутационной и защитной аппаратурой, расположенной в силовом щите. Преобразователи частоты соединены с независимыми между собой выводами устройств распределения силового питания. На информационные входы через блок транслятора сигналов поступают сигналы от датчика положения ротора, датчиков температуры, встроенных в электродвигатель и сигналы АСУ ТП, при этом все преобразователи связаны между собой промышленной сетью CAN (Controllerareanetwork), а контроллеры преобразователей, контроллеры АСУ ТП и модули ввода-вывода запитаны от источника бесперебойного питания (ИБП).

Такие приемы регулирования трехфазного напряжения питания электропривода, как независимость и запас по мощности преобразователей частоты, специальные алгоритмы управления многосекционным вентильно-индукторным электродвигателем при перерывах в электропитании, резервированность контроллеров АСУ ТП, применение ИБП (источника бесперебойного питания) для питания системы управления, позволяют повысить надежность электропривода и расширить область его применения за счет возможности использования в ответственных производствах с требованиями по непрерывности технологического процесса.[15]

На рисунке 1.4 представлена схема регулирования трехфазного напряжения питания четырехсекционного вентильно-индукторного электродвигателя с двумя вводами питания системы непрерывного действия на основе вентильно-индукторного электропривода.

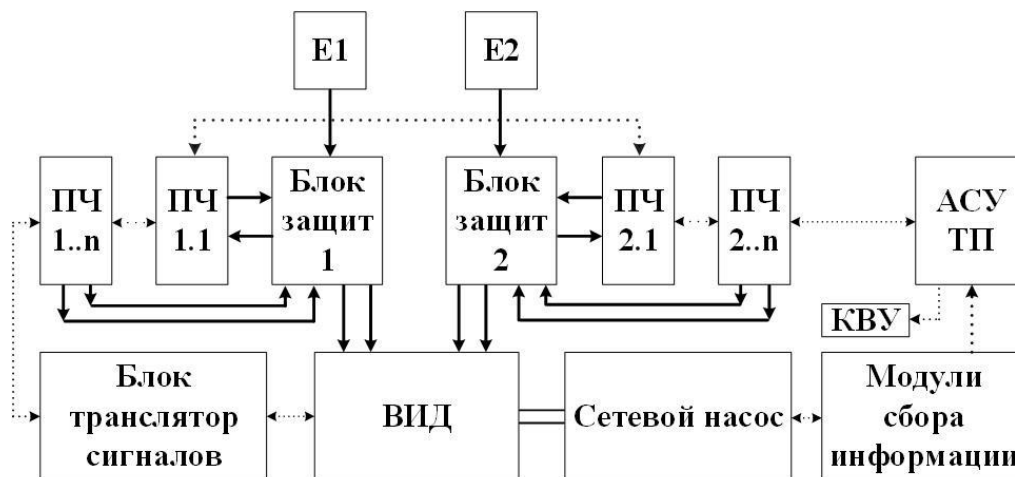


Рисунок 1.4. Схема регулирования трехфазного напряжения питания четырехсекционного вентильно-индукторного электродвигателя с двумя вводами питания Регулирование трехфазного напряжения для питания и обеспечения

оптимальной работы электропривода осуществляется следующим образом:

Переменное трехфазное напряжение с вводов питания E1, E2 одновременно поступает на независимые входы устройства распределения сетевого питания. Происходит включение встроенной в устройство коммутационной и защитной аппаратуры 1, 2, вследствие чего появляется напряжение на независимых выходах этого устройства, а соответственно и на входах преобразователей частоты 1..n, 2..n. Получив питание, преобразователи частоты подают на свои соответствующие выходы напряжение для питания обмоток возбуждения электродвигателя (ВИД), с выхода датчика положения ротора (не показан), пройдя через блок транслятор сигналов, начинают поступать сигналы в систему управления каждого преобразователя по информационным входам, после подачи сигнала на запуск от системы АСУ ТП, подключенной по интерфейсу RS-485, происходит срабатывание коммутационной аппаратуры в силовых щитах (1, 2). Электропривод готов к работе. Все преобразователи частоты (1..n, 2..n) соединены между собой

промышленной сетью CAN (Controllerareanetwork), поэтому по команде пуск с пульта оператора любого преобразователя частоты или от контроллера АСУ ТП формируется напряжение одновременно на силовых выводах каждого преобразователя частоты, которое поступает на независимые входы силового щита (1, 2) и через встроенную коммутационную аппаратуру передается на независимые выходы, подключенные к статорным обмоткам (не показан) электродвигателя (ВИД). Электродвигатель, получив питание, начинает вращаться. К промышленной сети подключена автоматизированная система управления технологическим процессом, состоящая из непосредственно шкафа АСУ ТП с двумя взаиморезервированными контроллерами, модулей сбора информации и персональных компьютеров, которые осуществляют управление приводом, сбор и архивирование параметров работы электропривода. Во время этого переключения задается необходимый режим работы электропривода с кратковременным использованием заложенного резерва по мощности электродвигателя и преобразователей частоты, вследствие чего электропривод продолжает работать без остановки и потери мощности на валу.

Выводы по главе 1:

1. Из проведенного обзора следует, что основные исследования были направлены на разработку конструктивных и схемных решений направленных на повышение энергоэффективности, снижение пульсаций МДС, и упрощение структуры электропривода.

2. Для аварийных и неполнофазных режимов работы вентильно-индукторного электропривода систематических исследований проведено не было, но очевидно, что данный тип двигателя и электропривод на его основе перспективен для применения в технических системах с обеспечением свойства живучести.

3. Для исследования вентильно-индукторного электропривода в аварийных и неполнофазных режимах работы необходимо разработать математическую модель электропривода позволяющую исследовать процесс

исчерпания живучести электропривода и разрабатывать эффективные алгоритмы отказоустойчивого управления в аварийной ситуации.

ГЛАВА 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

1.1 Математическое моделирование вентильно-индукторного электропривода

В основу математической модели вентильно-индукторного двигателя положены уравнения электрических контуров, составленные для каждой из фаз. Приняты допущения, что магнитные системы каждой фазы идентичны друг другу, гистерезис и вихревые токи в магнитопроводе не учитываются, а активные сопротивления фаз равны [3, 4].

На рисунке 2.1 приведена схема замещения фазы.

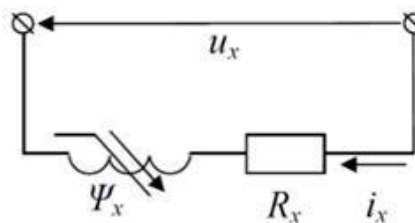


Рисунок 2.1. Схема замещения фазы ВИД

U_x – напряжение; i_x – ток; R_x – омическое сопротивление; Ψ_x – потокосцепление.

В этом случае каждая фаза ВИД описывается уравнением электромагнитного равновесия, согласно второму закону Кирхгофа. Уравнение электрического равновесия двигателя:

$$U_x = R_x i_x + \frac{d\Psi_x}{dt}$$

где U_x – напряжение, приложенное к обмотке фазы с индексом x ; i_x – фазный ток; R_x – электрическое сопротивление фазы; $\Psi(i_x, \omega) = L_x(i_x, \omega) i_x$ – потокосцепление фазы.

Известно, что индуктивность обмоток в вентильно-индукторном электродвигателе представляется нелинейной зависимостью текущего

положения ротора и значения фазного тока, которая может быть представлена как:

$$L(\alpha, \theta) = L_0(i) + L_1(i) \cos(2\alpha - 2\theta) + L_2(i) \cos(4\alpha - 4\theta),$$

где α – механический угол положения ротора в радианах;

p – число полюсов ротора; θ – электрический угол ротора в радианах;

$L_0(i)$, $L_1(i)$, $L_2(i)$ – функции зависимостей индуктивности от тока основанные на трех основных положениях ротора в пространстве магнитного поля исходя из принципов закона Фарадея об ориентации ферромагнитных материалов в пространстве магнитного поля [3, 4].

$$L_0(i) = \frac{1}{2} \left[L_{\alpha=0} + L_{\alpha=\pi/2} + L_{\alpha=\pi} + L_{\alpha=3\pi/2} \right],$$

$$L_1(i) = \frac{1}{2} \left[L_{\alpha=0} - L_{\alpha=\pi/2} + L_{\alpha=\pi} - L_{\alpha=3\pi/2} \right],$$

(1)

$$L_2(i) = \frac{1}{2} \left[L_{\alpha=0} - L_{\alpha=\pi/2} - L_{\alpha=\pi} + L_{\alpha=3\pi/2} \right],$$

здесь $L_{\alpha=0}$, $L_{\alpha=\pi/2}$, $L_{\alpha=\pi}$, $L_{\alpha=3\pi/2}$ – индуктивность при согласованном положении

ротора и статора;

$$L_{\alpha=\pi/2} = L_{\alpha=3\pi/2} = L_{\alpha=\pi/2} - L_{\alpha=3\pi/2} \quad \text{– индуктивность при промежуточном положении.}$$

$L_{\alpha=0} = L_{\alpha=\pi} = L_{\alpha=0} - L_{\alpha=\pi}$ – индуктивность при несогласованном

положении ротора и статора [3,5].

Преобразуем уравнения электрического равновесия двигателя (1):

$$U = R i + \frac{d\Phi}{dt} = R i + \frac{d}{dt} \left(L(\alpha, \theta) i \right) = R i + \frac{dL(\alpha, \theta)}{dt} i + L(\alpha, \theta) \frac{di}{dt} =$$

где: $\frac{dL(\alpha, \theta)}{dt} = \frac{dL(\alpha, \theta)}{d\alpha} \frac{d\alpha}{dt} + \frac{dL(\alpha, \theta)}{d\theta} \frac{d\theta}{dt}$ – дифференциальная индуктивность;

$\frac{d\alpha}{dt} = \omega$ – угловая частота вращения ротора;

противо-ЭДС – $e = \frac{d\Phi}{dt}$;

ω – угловая частота вращения ротора.

Для случая вращающейся электрической машины, зависимость механической энергии от электромеханического момента при изменении положения ротора записывается как:

$$\Delta = M \cdot \Delta \alpha,$$

где M_χ – электромагнитный момент двигателя формируемый одной фазой;

W_χ – механическая энергия [3].

Отсюда: $M = \Delta \alpha$, с учетом приведенных допущений принимаем момент

на валу двигателя равным электромагнитному моменту, тогда изменение механической энергии равно изменению магнитной коэнергии ΔW [5].

$$\Delta W = \frac{1}{2} \cdot (M^2 \cdot \Delta \alpha^2),$$

отсюда:

$$M = \frac{\Delta W}{\Delta \alpha} = \frac{\Delta W}{\Delta \alpha} = \frac{M^2 \cdot \Delta \alpha}{2} \Rightarrow M = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta W}{\Delta \alpha}}$$

Момент двигателя представляет собой сумму моментов, формируемых фазами, учитывая, что фазы не зависимы и не связаны электрическими и магнитными взаимодействиями получим:

$$M_{\text{дв}} = \sum_{k=1}^m M_k(\alpha_k),$$

где $M_k(\alpha_k)$ – момент, развиваемый фазой с индексом k ;

m – число фаз двигателя. Для описания вращательного движения ротора представим механическую часть в виде одномассовой системы [3],

где J – приведенный момент инерции ротора;

[illegible]

Зависимость электромагнитного момента от числа работающих фаз приведены на рисунке 2.2.

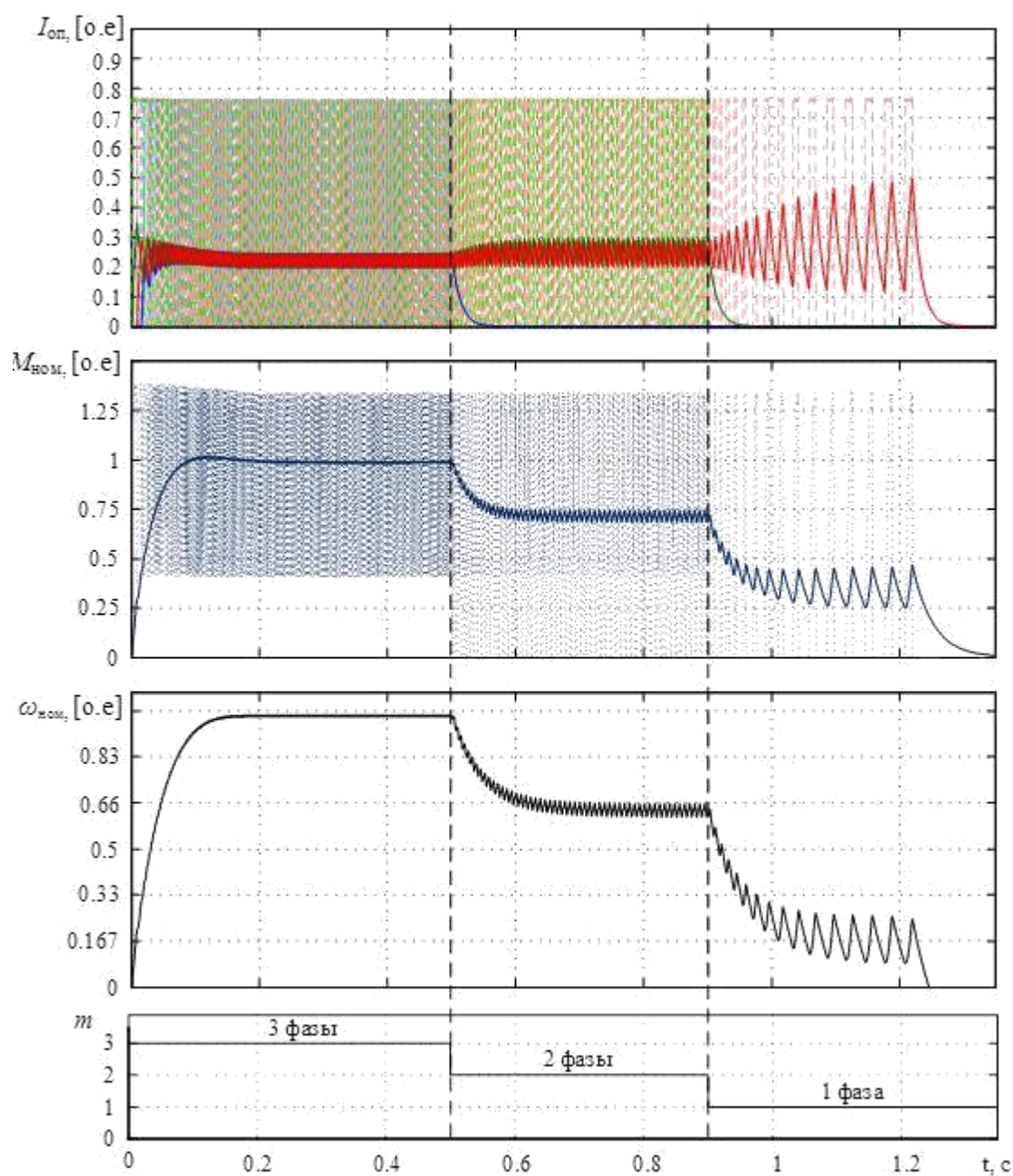


Рис 2.2. Зависимость электромагнитного момента от числа работающих фаз

Как видно из рисунка 2.2, обеспечивая поочередное отключение фаз вентильно-индукторного двигателя обеспечивается постепенное истощение резерва работы электродвигателя, по 1/3 мощности на каждую фазу.

2.2 Имитационное моделирование односекционного вентильно - индукторного электропривода в MathLabSimulink

Для создания имитационной модели 3-х фазного односекционного вентильно-индукторного электропривода воспользуемся [17, 18, 19, 20].

Для питания ВИД была выбрана наиболее часто используемая схема полумостового инвертора напряжения [21]. Инвертор напряжения (ИН) состоит из m включенных параллельно фазных полумостов (m - количество фаз электрической машины). Каждый полумост содержит два несимметричных плеча, состоящих из управляемого силового ключа – IGBT – транзистора и обратного диода, соединенных последовательно (рисунок 2.3).

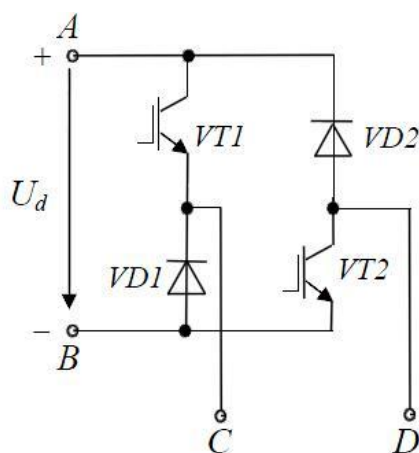


Рисунок 2.3. Электрическая схема фазы полумостового ИН: VT1, VT2 – IGBT – транзисторы; VD1, VD2 – диоды; U_d – напряжение звена постоянного тока.

К точке соединения транзистора и диода подключен один из выводов фазной обмотки ВИД (вывода C и D). В первом плече «верхний» ключ VT1 соединяет вывод фазной обмотки с положительной клеммой звена постоянного тока (ЗПТ) (вывод A), а «нижний» обратный диод VD1 – с отрицательным (вывод B). Второе плечо содержит, соответственно, «нижний» ключ VT2 и «верхний» обратный диод VD2.

Математическая модель ИН «собрана» путём использования элементов встроенных библиотек пакета SimPowerSystems, входящих в состав MatlabSimulink. Математические модели, положенные в основу описания элементов (IGBT, и диодов), и их реализации представлены в руководстве

пакета SimPowerSystems (например, на сайте разработчика[17]) или специализированной литературе, посвящённой моделированию средств силовой электроники [17, 20].

На рисунке 2.4 приведена Simulink–модель фазного полумоста ИН:

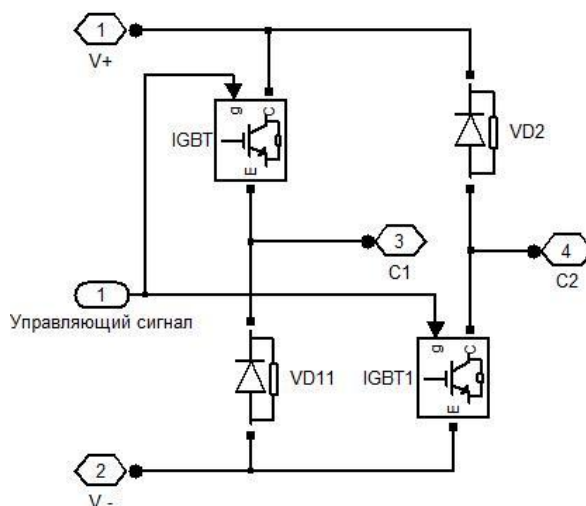


Рисунок 2.4. Simulink–модель фазного полумоста ИН

Плечи полумоста образованы IGBT-транзисторами VT1, VT2 и диодами VD1, VD2. Портами $+U_d$ и $-U_d$ полумост подключается к звену постоянного тока. К портам $+U$ и $-U$ подключается фазная обмотка ВИД.

Через порт (1) подаются сигналы (g) на открытие/закрытие верхнего и нижнего транзисторов IGBT, IGBT1.

Входной сигнал с порта Angle с помощью блока mod приводится к диапазону $(0...360)$ град. Далее обработанный сигнал сравнивается с сигналами с портов alpha и beta. В случае, если угол больше угла включения, на выходе блока сравнения появляется логическая единица; если угол меньше угла выключения, на выходе блока сравнения появляется логическая единица; иначе – ноль. Далее сигналы поступают на блок логического И, единица на выходе которого (порт sig) появляется только в случае одновременного поступления единичных сигналов на вход. Этот сигнал является управляющим для включения/выключения транзисторов ИН.

Simulink-модель подсистемы Position_Sensor показана на рисунк 2.6.

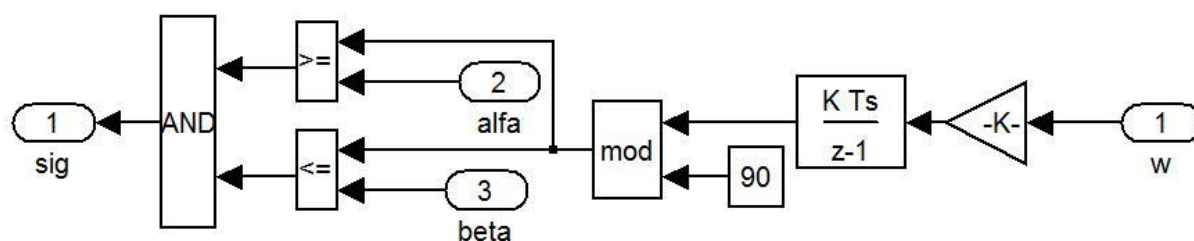


Рисунок 2.6. Simulink-модель подсистемы Position_Sensor

Подсистема Current_Control вырабатывает сигналы на включение/выключение транзисторов ИИ, сравнивая текущее значение фазного тока с токов уставки. Сравнение происходит в релейном элементе Relay. Ток уставки вводится с порта Ustavka. Если фазный ток превышает верхнее значение тока уставки, то на выходе элемента Relay всегда вырабатывается логический ноль. Если фазный ток меньше нижнего значения тока уставки, то на выходе элемента Relay всегда вырабатывается логическая единица. Simulink-модель подсистемы Current_Control показана на рисунок 2.7.

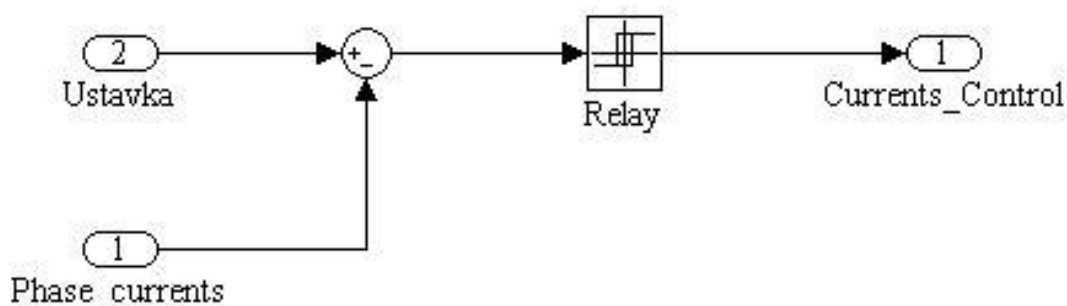


Рисунок 2.7. Simulink-модель подсистемы Current_Control

Для упрощения модели СУ принято, что режим токоограничения обеспечивается только за счёт коммутации «нижних» транзисторов, т.е. токовый канал воздействует только на «нижние» транзисторы фазных полумостов ИИ. Для включения/выключения транзисторов по углу поворота сигналы с подсистем Angel_Control и Current_Control перемножаются, что

обеспечивает закрытые «нижних» транзисторов даже при разрешающем сигнале с токового канала. Таким образом, для питания АИД выбрана полумостовая схема инвертора напряжения, рассмотрено построение системы управления приводом и разработаны Simulink-модели инвертора напряжения и системы управления. [17]

Моделирование электродвигателя не проводилось, т.к в библиотеке SimPowerSystems/ Machines имеется элемент Switched_Reluctance_Motor, который соответствует модели вентильно индукторного электродвигателя.

За исходную модель была принята модель односекционного 3-х фазного вентильно-индукторного электропривода с 6 полюсами на статоре и 4-мя на роторе разработанная в техническом университете Яссе – Румыния.

Данную модель можно скомпилировать командой Power_SwitchedReluctanceMotor в корневом окне MathLab любой версии позднее 2008b. Внешний вид модели приведен на рис. XX. Основные параметры модели односекционного вентильно-индукторного электропривода приведены в таблице 2.1.

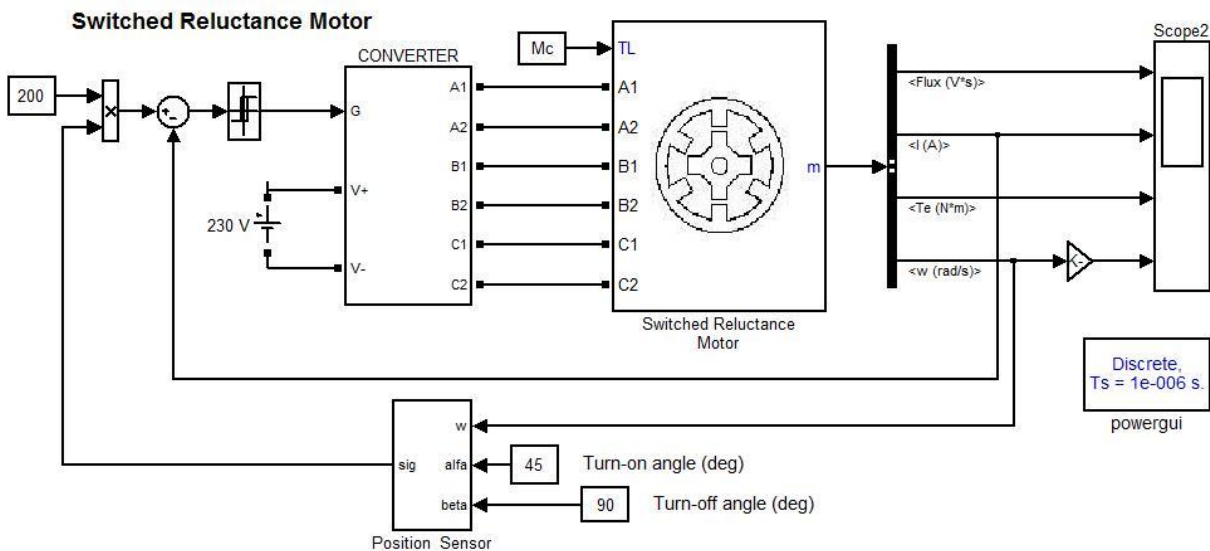


Рисунок 2.8. Имитационная модель односекционного ВИД.

Таблица 2.1. Параметры модели односекционного вентильно-индукторного электропривода.

Параметр	Величина
Сопротивление обмотки статора, [Ом]	0.05

Момент инерции, [кг·м ²]	0.05
Момент трения, [Н·м·с]	0.02
Начальная скорость ω_0 , [рад/с]	0
Начальное положение ротора Θ_0 , [рад]	0
Индуктивность при рассогласованном положении, [Гн]	$0.67 \cdot 10^{-3}$
Индуктивность в согласованном положении, [Гн]	$23.6 \cdot 10^{-3}$
Индуктивность насыщения согласованного положения, [Гн]	$0.15 \cdot 10^{-3}$
Максимальный ток, [А]	450
Максимальное потокосцепление, [В·с]	0.486
Напряжение питания, [В]	230

Собранная модель практически полностью соответствует прототипу [19]. Для проверки адекватности было проведено ряд экспериментов для проверки адекватности модели. На рисунке 2.9 приведены характеристики намагничивания собранной модели и прототипа.

Проведем проверку адекватности. Сравним характеристики полученные в [19] с полученными на собранной модели: Для классического инвертора напряжения собранного по схеме рисунки 2.2 и 2.3, характеристики имеют вид показанный на рисунках 2.9.

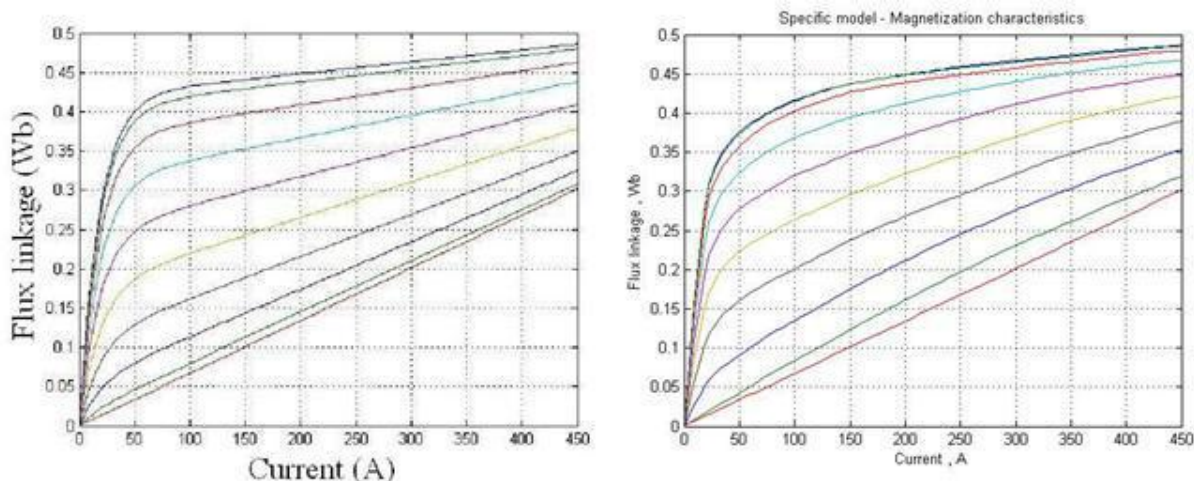


Рисунок 2.9. Характеристики намагничивания прототипа (слева) и собранной модели (справа)

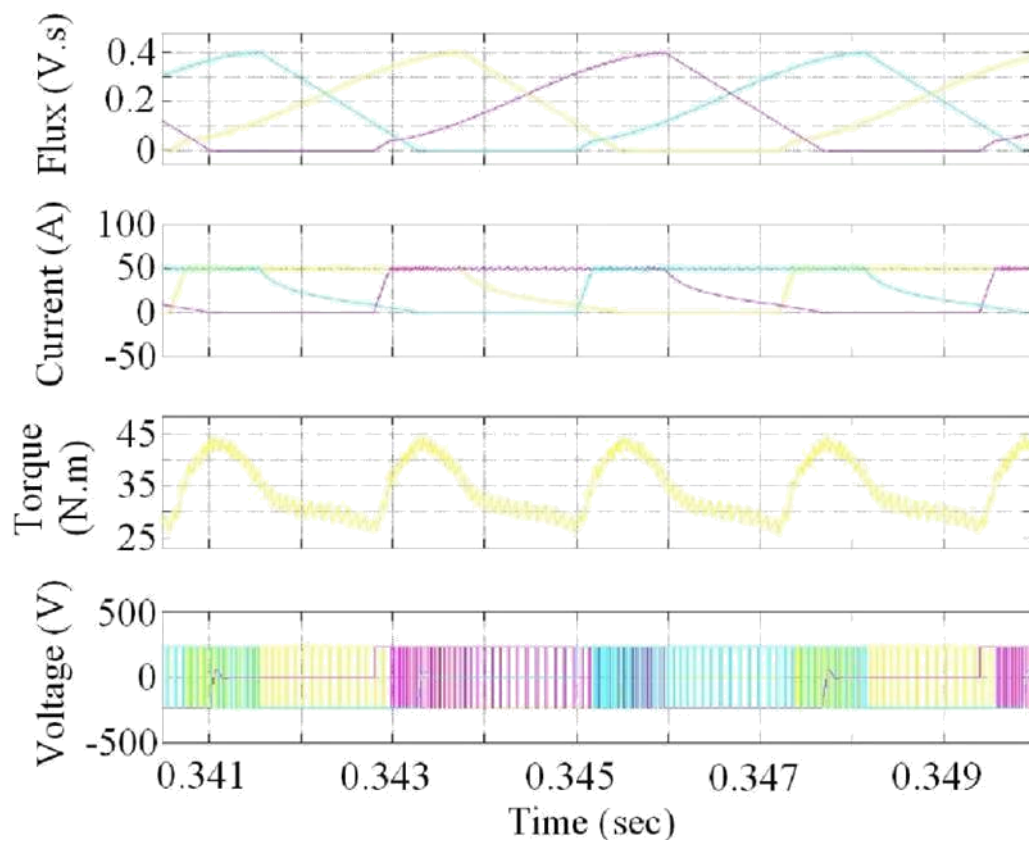


Рисунок 2.10. Характеристики для классического инвертора напряжения модели прототипа сверху вниз: потокосцепление ($\text{В}\cdot\text{с}$), ток статорных обмоток (A), Вращательный момент ($\text{Н}\cdot\text{м}$), Напряжение питания (В)

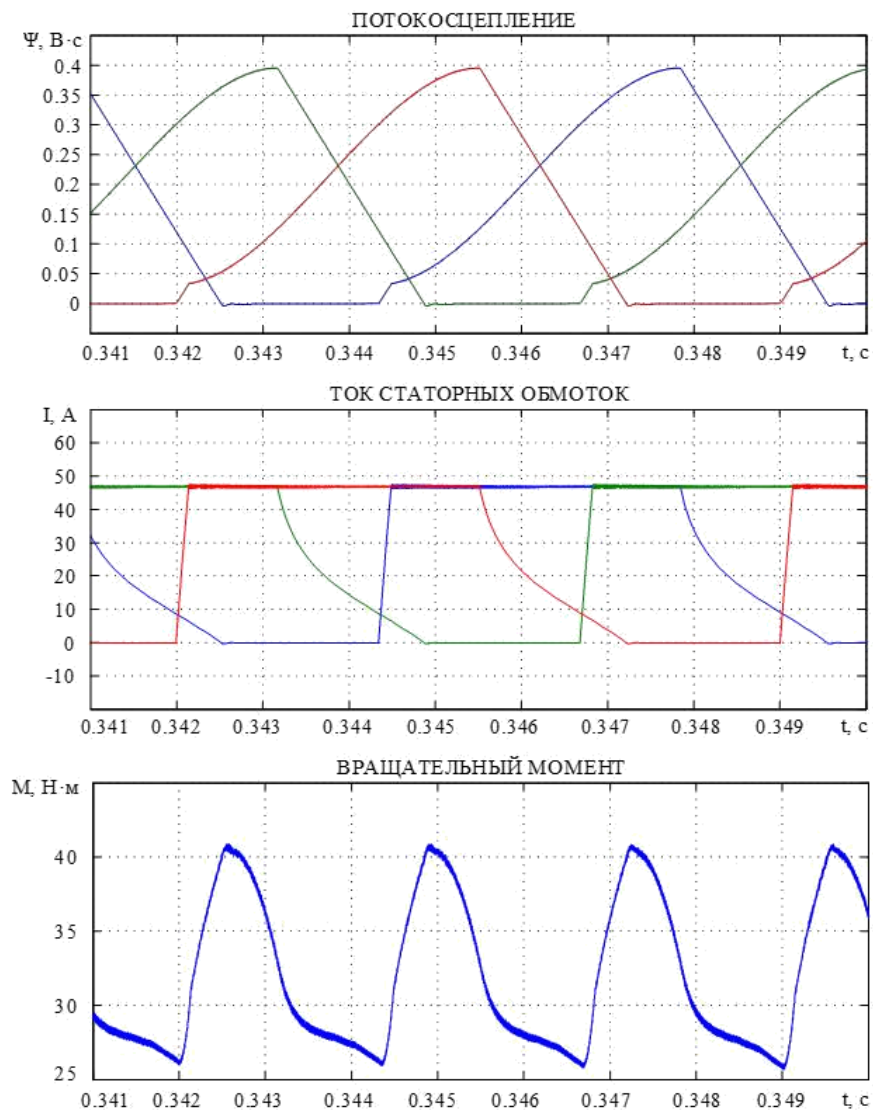


Рисунок 2.11. Характеристики для классического инвертора напряжения для собранной модели, сверху вниз: потокосцепление ($\text{В}\cdot\text{с}$), ток статорных обмоток (А), Вращательный момент ($\text{Н}\cdot\text{м}$).

Полученные диаграммы рисунок 2.11 полностью идентичны с диаграммами из рисунка 2.10, из чего можно сделать вывод что модель адекватна и пригодна для дальнейших исследований.

Выводы по главе 2:

1. Получена адекватная математическая модель позволяющая исследовать аварийные режимы в односекционном вентильно-индукторном электроприводе.

2. Разработана имитационная модель отказоустойчивого односекционного вентильно-индукторного электропривода для исследования неполнофазных и аварийных режимов работы

ГЛАВА 3. ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ПО ПОСТРОЕНИЮ ОТКАЗОУСТОЙЧИВОГО ЭЛЕКТРОПРИВДА И АЛГОРИТМЫ ОТКАЗОУСТОЙЧИВОГО УПРАВЛЕНИЯ

Прежде чем переходить к вопросам отказоустойчивости системы, необходимо определить узлы системы где отказы наиболее вероятны. Причем отказы электрической части электропривода в данной работе более интересны. Таковыми отказами являются: отказ датчика положения ротора, отказ источника питания многосекционного ВИД, обрыв одной или нескольких фаз односекционного ВИД до исчерпания ресурса, обрыв одной или нескольких фаз двухсекционного ВИД. Это позволяет определить какие же методы обеспечения отказоустойчивого управления ВИП можно применить. Основные методы приведены на рисунок 3.1.

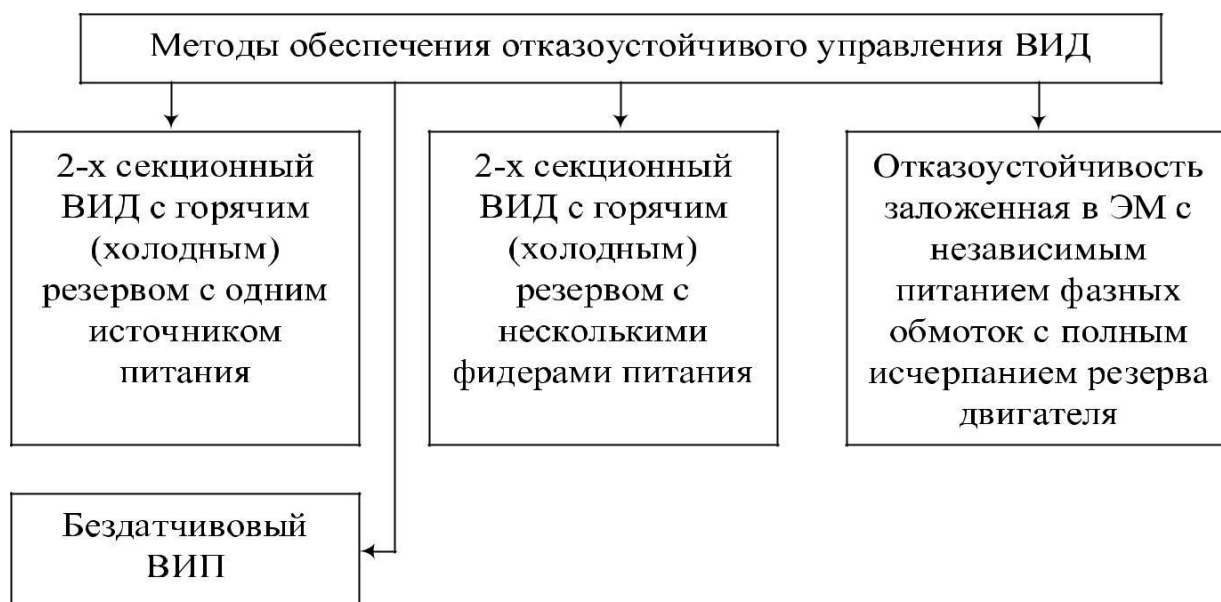


Рисунок 3.1. Методы обеспечения отказоустойчивого управления ВИП

Функциональная схема односекционного ВИП для гибридного транспортного средства с заложенной в ЭМ отказоустойчивостью изображена в приложении А. Бездатчиковое управление на данный момент

слабо изучено и в данной работе рассматриваться не будет, известные наработки по данной тематике можно посмотреть в [22].

3.1 Функциональная схема вентильно-индукторного электропривода для гибридного транспортного средства

В данной работе в качестве прототипа взята схема электропривода гибридного автомобиля ToyotaPrius, в отличии от которой электрические двигатели выполнены вентильно-индукторными и при выявлении отказа в фазе блокируется ее дальнейшая работа, а в работоспособных фазах увеличивается амплитуда токов в 1,5 раза.

Отказоустойчивое гибридное транспортное средство с вентильно-индукторным электроприводом (приложение А) содержит последовательно соединенные бортовой источник электрической энергии (БИЭЭ 5), накопитель электрической энергии (НЭЭ6) , электронный преобразователь электрической энергии накопителя в трехфазное переменное напряжение (ПЧ 1) и электрический привод колес содержащий блок электрических двигателей, статорные обмотки которых по питающему трехфазному напряжению соединены с выходом электронного преобразователя, управляющий вход которого через бортовой компьютер соединен с пультом управления гибридного транспортного средства по сигнальным и управляющим входам/выходам, электрические двигатели для вращения колес транспортного средства выполнены с возможностью соединения их валов с валами вращения колес транспортного средства через дифференциальную передачу.

3.2 Выбор и обоснование электродвигателя

Отказоустойчивая работа транспортного средства является основным требованием к выбираемому двигателю. Однако, из-за особенностей конструкции машин, не всегда верным является подбор того или иного типа двигателя. В данной работе используется вентильно-индукторный двигатель, который благодаря заложенному свойству отказоустойчивости с

независимым питанием фазных обмоток и алгоритму восстановления сможет обеспечить непрерывную работу гибридного транспортного средства.[32]

Не менее важным требованием, предъявляемым к выбираемому двигателю является мощность. Поскольку в качестве прототипа взята схема электропривода гибридного автомобиля ToyotaPrius, в которой мощность составляет 75 кВт, для переднеприводного гибридного транспортного средства целесообразно использовать двигатель с мощностью 60 кВт.

За исходную модель была принята модель односекционного 3-х фазного вентильно-индукторного электропривода с 6 полюсами на статоре и 4-мя на роторе, разработанная в техническом университете Яссе – Румыния.

3.3 Исследование преобразователя для коммутации обмоток ВИД

В настоящее время для коммутации обмоток ВИД разработано и применяется большое количество преобразователей. Многообразие решений по топологии схем питания обмоток ВИД объясняется двумя факторами:

- 1) стремлением улучшить электромагнитные процессы с целью получения требуемых электромеханических характеристик;
- 2) минимизацией затрат на компоненты схем (в основном транзисторы, диоды и конденсаторы) [7].

Исходя из второго фактора, была исследована схема преобразователя частоты, преобразовательная ячейка которого изображена на рисунке 3.3.

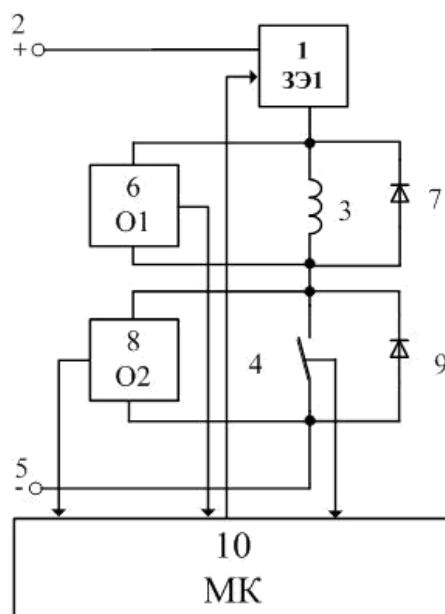


Рисунок 3.3. Однотактная схема импульсного регулятора
напряжения вентильно-индукторного электродвигател

Однотактная схема импульсного регулятора напряжения вентильно-индукторного электродвигателя содержит защитный элемент 1 (ЗЭ1), подключенный к положительному выводу 2 источника питания и первому выводу фазы обмотки статора 3. Силовой ключ 4 соединен со вторым выводом фазы обмотки статора 3 и отрицательным выводом 5 источника питания. Параллельно фазе обмотки статора 3 подключены оптрон 6 (О1) и диод 7. Анод диода 7 подключен к точке соединения второго вывода фазы обмотки статора 3 и силового ключа 4, а катод – к точке соединения первого вывода фазы обмотки статора 3 и защитного элемента 1 (ЗЭ1). Параллельно силовому ключу 4 подключены оптрон 8 (О2) и диод 9. Анод диода 9 подключен к отрицательному выводу 5 источника питания, а катод – к точке соединения второго вывода фазы обмотки статора 3 и силового ключа 4. Защитный элемент 1 (ЗЭ1), силовой ключ 4 и выходы оптронов 6 (О1) и 8 (О2) подключены к микроконтроллеру 10. В роли силового ключа 4 может выступать IGBT транзистор.

Каждый оптрон выполнен по схеме приведенной на рисунке 3.4.

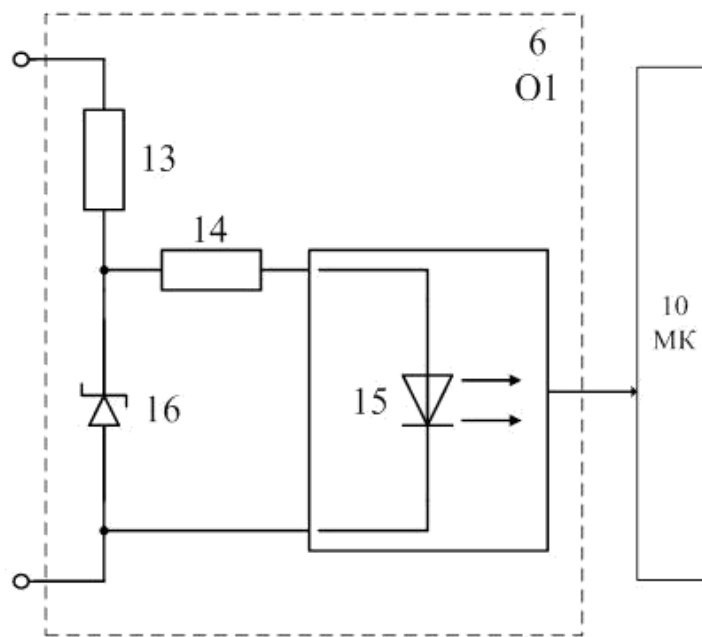


Рисунок 3.4. Исполнение оптронного элемента

Оптроны 6 (O1), 8 (O2) выполнены одинаково, состоят каждый из двух последовательно соединенных ограничительных резисторов 13, 14, оптрона 15, анод диода которого подключен к резистору 14, и стабилитрона 16, катод которого подключен к точке соединения резисторов 13, 14, а анод к катоду диода оптрона 15. Вывод оптрона 15 подключен к микроконтроллеру 10.

3.4 Расчет оптронов

Расчет проводится для схемы изображенной на рисунке 3.4.

Напряжение подводимое к обмотке статора равно:

$$U_{ист} = 220 \text{ В,}$$

Где $U_{ист}$ – напряжение питания Падение на резисторе 13:

$$U_{ст} = 220 - 5,1 = 214,9 \text{ В,}$$

Где U_{CT} – напряжение стабилизации стабилитрона. Для обеспечения требуемого входного напряжения оптрона. Выберем стабилитрон 2С151Т1 со следующими параметрами:

$$U_{CT,ном} = 5.1 \text{ В}, \quad I_{CT,ном} = 3 \text{ мА},$$

Тогда ограничительное сопротивление R_1 :

$$R_1 = \frac{U_{CT,ном}}{I_{CT,ном}} = \frac{5.1}{3 \cdot 10^{-3}} = 1.7 \cdot 10^3 \text{ Ом}.$$

Из ряда E24 выбираем $R_1 = 75 \text{ кОм}$.

В качестве оптопары выбираем диодно-транзисторную оптопару КОЛ201А со следующими параметрами:

$$U_{ВХ} = 1.5 \text{ В}, \quad I_{Н} = 10 \text{ мА},$$

Согласно закону Кирхгофа:

$$U_{CT} = U_2 + U_{ВХ} = I_2 R_2 + U_{ВХ}$$

Исходя из этого сопротивление ограничительного резистора R_2 равно:

$$R_2 = \frac{U_{CT} - U_{ВХ}}{I_2} = \frac{5.1 - 1.5}{10 \cdot 10^{-3}} = 360 \text{ Ом}.$$

В транзисторную цепь оптопары установим токоограничительный резистор R_3 номиналом 2.7 кОм .

Элементы для остальных оптронов выбираются аналогично.

3.5 Расчет силовых ключей

Необходимо произвести расчет силового ключа, в качестве которого выбран IGBT-транзистор.

Мощность, приходящаяся на одну фазу двигателя:

$$P_{\phi} = \frac{P_n}{m_{\phi}} = \frac{60}{3} = 20 \text{ кВт, где } m_{\phi} \text{ – число фаз и равно 3.}$$

Так как на борту транспортного средства находится источник энергии, то исходя из полученной мощности можно определить тип батареи.

Таблица 3.1 – Виды источников энергии и их параметры

Источник ток	Энергетическая мощность Вт*час/кг	Срок службы (циклов заряда-разряда)
Свинцово-кислотные аккумуляторы	30	300
Никель-кадмиевые аккумуляторы	40 - 60	1500
Никель-металлогидридные аккумуляторы	75	500
Ионно-литиевые аккумуляторы	100	500
Полимерно-литиевые аккумуляторы	175	150
Литий-фосфатные аккумуляторы	65	2000
Никель-марганцевые аккумуляторы	60-120	500
Никель-хлоридные аккумуляторы	85	Более 1000
Суперконденсаторы	10	неограничено
Цинк-воздушные топливные батареи	220	неограничено

Поскольку полученная мощность, приходящаяся на одну фазу, составила 20 кВт, то в соответствии с таблицей 3 целесообразно будет использовать никель-кадмиевые аккумуляторы со сроком службы 1500 циклов заряда-разряда.

Далее для расчета IGBT-транзистора необходимо вычислить значение действительного тока:

$$I_o = \frac{P_{\phi}}{U} = \frac{20 \cdot 10^3}{230} = 86.957 \text{ A}$$

Импульсный ток находится по формуле:

$$I_u = \sqrt{2} \cdot I_o \sqrt{2} \cdot 86,957 = 122,976 \text{ A}$$

Значение пускового тока находится:

$$I_n = K_{nt} \cdot I_u = 3 \cdot 122,976 = 368,928 \text{ A, где } K_{nt} \text{ – коэффициент преобразователя, равен 3.}$$

Коэффициент нагрузки выбран 67%, откуда следует расчет тока IGBT-транзистора:

$$I_{mp} = I_n \cdot 0,167 = 368,928 \cdot 0,167 = 550,639 \text{ A.}$$

При выборе IGBT-транзистора необходимо учитывать не только значение тока I_{mp} , но и условия максимального напряжения, которое он сможет выдержать:

$$U_{\max} = 230 \cdot 2 = 460 \text{ В}$$

На основании условий $I_{mp} = 550,639 \text{ А}$ и $U_{\max} = 230 \cdot 2 = 460 \text{ В}$ выбираем IGBT-транзистор марки IRGB4063D с параметрами, приведенными в таблице 3.2

Таблица 3.2 – Основные параметры IRGB4063D

$I_{\max} (25^{\circ} \text{ C}), \text{ А}$	$I_{\max} (100^{\circ} \text{ C}), \text{ А}$	$U_{ce} (125^{\circ} \text{ C}), \text{ В}$	$P, \text{ кВт}$
96	48	2,10	4

К преимуществам данной марки можно отнести:

- меньшее рассеяние на кристалле и нагрев, что приводит к повышению эффективности преобразования энергии;
- быстроедействие и управление транзистором;
- низкий уровень динамических потерь.
- Возможность работы на высоких частотах

К недостаткам:

- Большая стоимость;
- Усложненная архитектура.

3.9 Алгоритмическое восстановление работоспособности вентильно-индукторного электродвигателя в аварийном режиме работы

Для обеспечения отказоустойчивости электропривода необходимо своевременно производить диагностику системы на основе анализа фазных

токов. Основываясь на результатах мониторинга следует применять специальный алгоритм управления в случае выявления отказа [1, 2]. Ниже приведен алгоритм управления односекционным 3-фазным вентильно-индукторным электродвигателем с компенсацией момента за счет применения угла перекрытия фаз.

Формируются мгновенные значения фазных токов ВИД для векторов токов фаз по выражениям:

$$I_A = I_{\omega a} \left[1 + \text{sign} (\varphi(i_A, \alpha) - \varphi(t) + d\alpha_k) \right];$$

$$I_B = I_{\omega b} \left[1 + \text{sign} (\varphi(i_B, \alpha) - \varphi(t) + d\alpha_k) \right];$$

$$I_C = I_{\omega c} \left[1 + \text{sign} (\varphi(i_C, \alpha) - \varphi(t) + d\alpha_k) \right];$$

где I_{ω} – значение амплитуды формируемых фазных токов; $\varphi(\alpha)$ – электрический угол ротора в радианах; $\varphi(\alpha)$ – значения формируемого угла для каждой фазы; $\varphi(t)$ – мгновенное значение угла датчика положения ротора, α_k – угол коммутации (перекрытия). На рисунке 3.9 и 3.10 показаны варианты работы электропривода в случае множественных отказов с применением углов перекрытия 0 и 15 градусов соответственно.

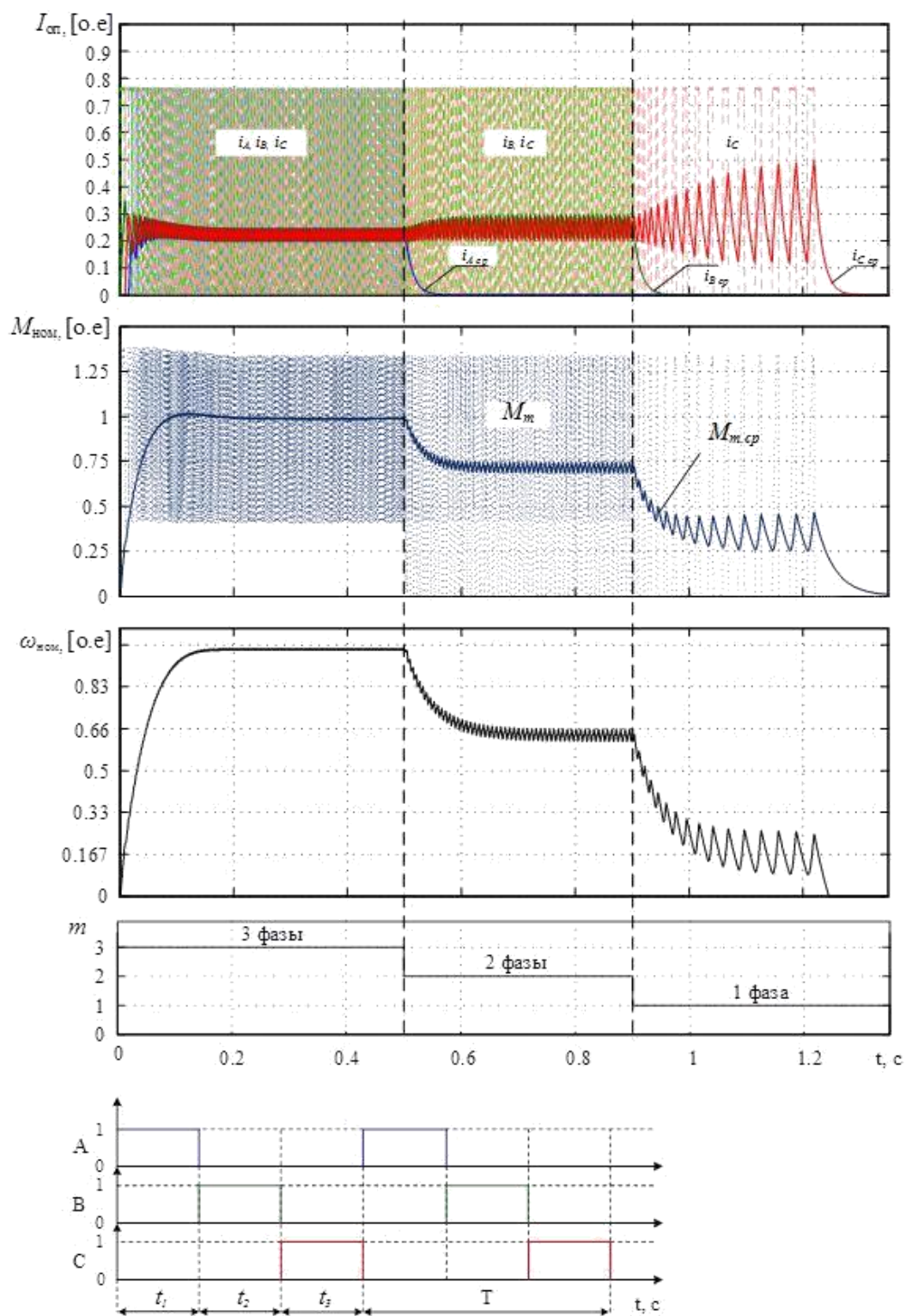


Рисунок 3.9. Временная диаграмма постепенного истощения резерва трехфазного вентильно-индукторного электропривода при угле перекрытия 0°

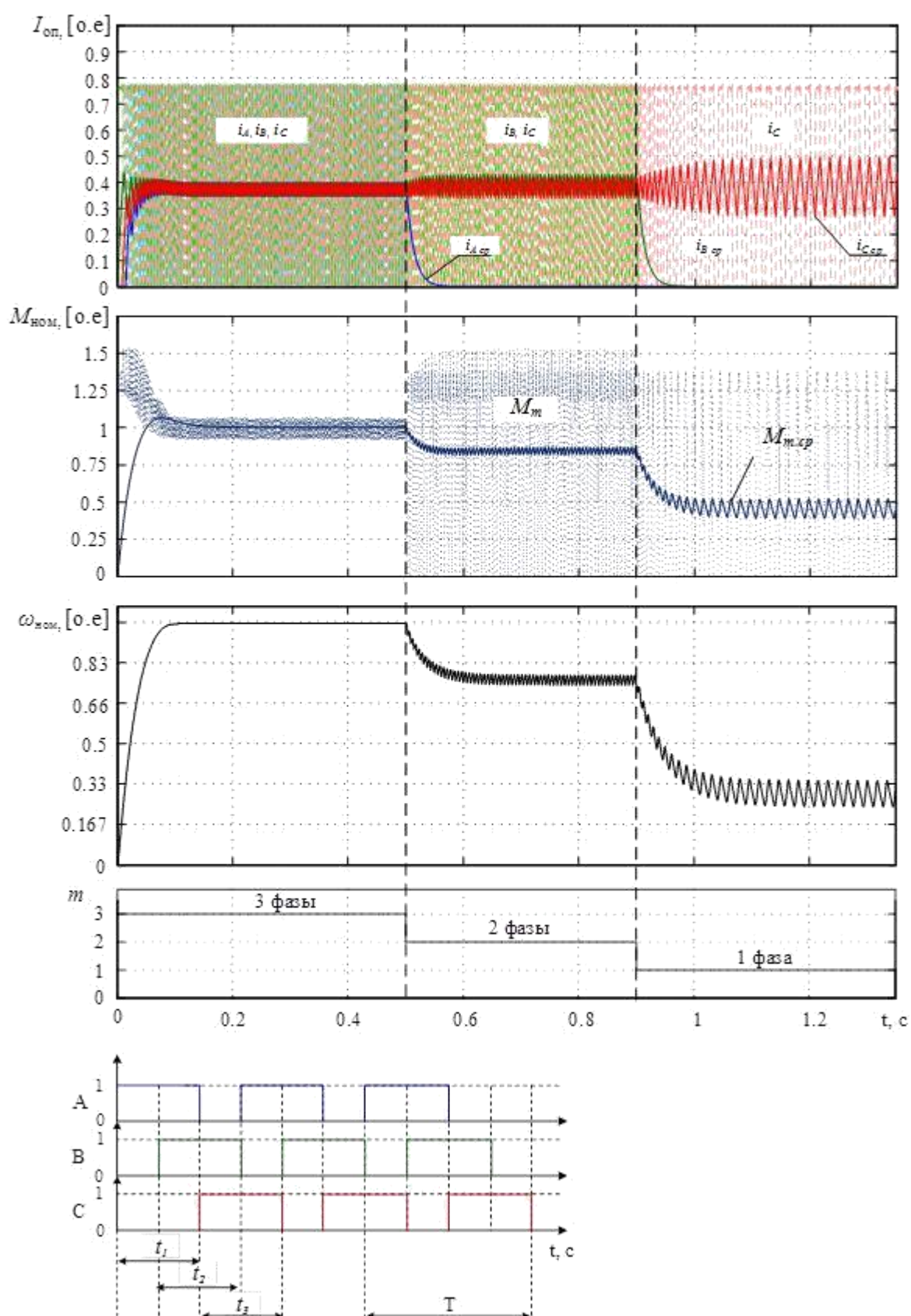


Рисунок 3.10. Временная диаграмма постепенного истощения резерва трехфазного вентильно-индукторного электропривода при угле перекрытия 15°

Здесь i_A, i_B, i_C – мгновенные значения амплитуды токов фаз, $i_{A\text{ ср}}, i_{B\text{ ср}}, i_{C\text{ ср}}$ – средние значения амплитуд фазных токов, M_m – мгновенное значение электромеханического момента, $M_{m\text{ ср}}$ – среднее значение момента. T – период коммутации.

По рисунку 3.9 можно сказать, что при использовании угла управления 30 электрических градусов (угол перекрытия 0) при обрыве фаз значительно увеличивается амплитуда пульсаций токов оставшихся в работе фаз, а также величина провала момента и частоты вращения составляет более 30% на каждую отказавшую фазу. При этом при отказе двух фаз, двигатель не может длительное время продолжать функционирование на одной рабочей фазе и постепенно останавливается. Если же изменить угол открытия на 45 электрических градусов (перекрытие 15 градусов) как показано на рисунке 2, то при обрыве фазы амплитуда пульсаций тока значительно меньше, а провал момента и частоты вращения около 20 % на каждую отказавшую фазу. При этом угле коммутации значительно ухудшается энергоэффективность системы, но повышается ее отказоустойчивость. При условии остаточной инерции механизма он сможет продолжить функционирование на одной оставшейся в работе фазе (если имеется минимум по 2 полюса на фазу). Результаты получены на разработанной ранее модели отказоустойчивого вентильно-индукторного электропривода [2,3,4].

Тем самым можно сказать, что, используя алгоритмическое управление углом перекрытия возможно в случае отказа фазы переключать систему с одного угла перекрытия на другой при этом повышая ее отказоустойчивость.

Вывод по главе 3:

Исследован вентильно-индукторный электропривод для гибридного транспортного средства, что может являться перспективным направлением в автомобилестроении, несмотря на его сложность.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы основные исследования были направлены на повышение энергоэффективности, и упрощение структуры электропривода. Для исследования вентильно-индукторного электропривода в аварийных и неполнофазных режимах работы была разработана имитационная модель электропривода позволяющая исследовать процесс истощения живучести электропривода и разрабатывать эффективные алгоритмы отказоустойчивого управления в аварийной ситуации. Получена адекватная модель позволяющая исследовать аварийные режимы в односекционном вентильно-индукторном электроприводе. Произведен расчет и выбор элементов системы управления вентильно-индукторным электроприводом. На основе разработанной имитационной модели в среде MatLabSimulink для случая отключения одной фазы односекционного вентильно-индукторного электропривода приводит к пропорциональному снижению выходной мощности с сохранением электропривода в ограниченно рабочем состоянии, при отказе одной фазы падение частоты вращения составляет 33% от номинальной частоты вращения, при номинальной нагрузке.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Кузнецов В.А., Кузьмичев В.А. Вентильно-индукторные двигатели - М.: Издательство МЭИ, 2003 - 70 с.
2. Виноградов А.Б. Векторное управление электроприводами переменного тока / ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический

университет имени В.И. Ленина».— Иваново, 2008.— 298 с.

3. Алямкин Д.И. Разработка и исследование двухфазного вентильно – индукторного электропривода насосов горячего водоснабжения: автореф. канд. физ.-мат. наук. – Москва, 2012. – 20 с.

4. Гибридный автомобиль/ Википедия. URL:

https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%93%D0%B8%D0%B1%D1%80%D0%B8%D0%B4%D0%BD%D1%8B%D0%B9_%D0%B0%D0%B2%D1%82%D0%BE%D0%BC%D0%BE%D0%B1%D0%B8%D0%BB%D1%8C

5. Козаченко В., Анучин А., Дроздов А., Жарков А. Цифровое векторное управление вентильно-индукторными двигателями с независимым возбуждением // Электронные компоненты. № 8'2004.

6. Gao Yuan. Speed control of switched reluctance motors: Masters degree work, The Hong Kong University of Science and Technology, Aug. 2000.

7. Бычков М.Г. Элементы теории вентильно-индукторного электропривода. // Электричество-1997.-№8- С.35-44;

8. Александровский С.В, Петренко Ю.Н. Анализ схем питания вентильно-индукторных двигателей. – Минск.: Белорусский национальный технический университет, 2010. – 31 с.

9. Остриров В.Н, Сравнительный анализ схем силовых преобразователей для вентильно-индукторного электропривода массового применения/ В.Н. Остриров, С. Ю. Уткин// Прикладная механика. – 2000. - №4. – С. 44-55.

10. А л е к с а н д р о в с к и й , С. В. Формирование электромагнитных

процессов в вентильно-индукторном электроприводе / С. В. Александровский, Ю. Н. Петренко // Современные методы проектирования машин: в 7 т. - Т. 6: Автоматизация проектирования и информационные технологии. - Минск, 2004. - Вып. 2. - С. 145-148.

11. А л е к с а н д р о в с к и й , С. В. Математическое моделирование вентильно-индукторного привода / С. В. Александровский, Ю. Н. Петренко // Информационные технологии в промышленности: тез. докл. 5-й междунар. науч.-техн. конф., Минск, 22-24 окт. 2008 г.: ОИПИ НАН Беларуси; редкол.:

Е. В. Владимиров [и др.]. - Минск, 2008. - С. 93-94.

12. Miller, T. J. E., Switched Reluctance Motors and Their Control, Oxford: Clarendon Press (1993).

13. Королев В.В. Вентильно-индукторные электромеханические преобразователи в современном автомобиле // Автомобиле- и тракторостроение в России: приоритеты развития и подготовка кадров: Междунар. научно-техн. Конф. ААИ. посв. 145-летию МГТУ «МАМИ». – Тольяти, 2010. – С. 3. – 54 с.

14. SiavashSadeghi, MojtabaMirsalim. Dynamic Modeling and Simulation of a Switched Reluctance Motor in a Series Hybrid Electric Vehicle/ ActaPolytechnicaHungarica. №1, 2010.

15. Остриров В.Н., Козаченко В.Ф., Русаков А.М. Перспективные системы экскаваторного электропривода на базе вентильно-индукторных двигателей с независимым возбуждением // Доклады научно-практического семинара «Электропривод экскаваторов». М.: Издательство МЭИ. 2004.

16. Патент РФ на изобретение № 2368059, МПК H02M5/40, H02K29/06, Устройство для питания вентильно-индукторного электродвигателя/ А.В. Сорокин, А.Н. Ремезов, Ю.И. Кочанов, Ю.А. Крылов, А.Л. Докукин - № 2007115180; заявлено 24.04.2007 г.; опубл. 10.06.2008 г

17. А.Н. Ремезов. Опыт внедрения вентильно-индукторных электроприводов на объектах ОАО «МОЭК» с целью повышения надежности и эффективности эксплуатации электрических станций и энергетических систем», 2010 г., МЭИ

18. Любарский Б. Г., Рябов Е.С. Моделирование электроприводов на основе реактивных индукторных двигателей в среде MatLabSimulink. Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков.

19. Martin MAÑA. Mathematical model switched reluctance motor.:Doctoral Degree Programme Dept. Of Power Electrical and Electronic Engineering, FEEC, BUT

20. Irimia N.D., Simon A., Livadaru L., Vlasceanu S., Dabija O., Mihai A.M., Study of a 3 phase (6/4) switched reluctance motor control, Gheorghe Asachi Technical University of Iasi, 2011.
21. Krishnan R., Switched reluctance motor drives: modeling, simulation, analysis, design, and applications, The Bradley Department of Electrical and Computer Engineering Fellow, Center for Organizational and Technological Advancement (COTA) Virginia Tech, Blacksburg, Virginia, TK2787 .R35 2001, ISBN 0-8493-0838-0.
22. Патент РФ на полезную модель № 128409, МПК, H02H 7/09, H02H 7/12, H02P 6/12, H02P 6/16, Вентильно-индукторный электропривод со свойством живучести/ Г.И. Однокопылов, И.А. Розаев, В.Г. Букреев - № 2012153519/07; заявлено 11.12.2012 г.; опубл. 20.05.2013 г. Бюл. №14.
23. Однокопылов Г.И., Образцов К.В., Однокопылов И.Г. Принципы обеспечения «живучести» электроприводов переменного тока. //Электричество. – 2009. – №12. – с. 51-57.
24. Официальный сайт компании LEM/ URL: <http://www.lem.com/hq/en/content/view/13/86/> (дата обращения: 14.05.2016).
25. IGBT транзисторы International Rectifier шестого поколения/ URL: http://www.power-e.ru/2009_4_27.php (дата обращения: 18.05.2016)
26. Рынок микроэлектроники/ Микроконтроллеры. URL: http://www.gaw.ru/html.cgi/txt/ic/Atmel/micros/mcs51/AT89S2051_4051.htm (дата обращения: 14.05.2016).
27. Датчики в электротехнике/ Датчик углового перемещения BE178A. <http://www.stanok.html> (дата обращения: 20.05.2016).
28. Отказоустойчивое управление вентильно-индукторным электроприводом, Розаев И.А., Однокопылов Г. И., Соснин С.К. Электронные и электромеханические системы и устройства: тез. Докл. Науч.-техн. Конф. Молодых специалистов (Томск, 14-15 февр. 2013 г.) / ОАО «НПЦ «Полус»». – Томск, 2013. – 268 с

29. P. BalaKoteswararao, J. Hema Sunder. A Closed Loop Speed Control of a Switched Reluctance Motor with a New Converter Topology, GudlavallyEnggcollege, ISSN 2250-2459, ISO 9001:2008.
30. Кузьмина Е.А, Кузьмин А.М. Методы поиска новых идей и решений "Методы менеджмента качества" №1 2003 г.
31. Попова С.Н. Управление проектами. Часть I: учебное пособие / С.Н. Попова; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 121 с.
32. Кузьмина Е.А, Кузьмин А.М. Функционально-стоимостный анализ. Экскурс в историю. "Методы менеджмента качества" №7 2002 г.
33. Основы функционально-стоимостного анализа: Учебное пособие / Под ред. М.Г. Карпунина и Б.И. Майданчика. - М.: Энергия, 1980. - 175 с.
34. ГОСТ 12.0.003–74. ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация.
35. ГОСТ 12.1.019–79 (с изм. №1) ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты.
36. ГОСТ 12.0.004–90 ССБТ. Обучение работающих безопасности труда.
37. ГОСТ 12.1.030-81 ССБТ. Защитное заземление, зануление.
38. ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов.
39. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03 Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещенному освещению жилых и общественных зданий.
40. СНиП 2.04. 05-91. Отопление, вентиляция и кондиционирование.
41. ГОСТ 12.1.004–91 ССБТ. Пожарная безопасность. Общие требования.
42. ППБ 01-03. Правила пожарной безопасности в Российской Федерации. – М.: Министерство Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, 2003.
43. Регулирующий стандарт по электромагнитным полям MPR II.

44. ГОСТ 12.1.045-84. Электростатические поля.
45. СанПиН 1757-77. Допустимая напряженность электростатического поля.
46. Федеральная служба по утилизации компьютеров и оргтехники [Электронный ресурс]. URL: <http://rusutilit.ru>. (Дата обращения: 23.05.2016г).

ПРИЛОЖЕНИЕ А

