ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

УЛЬЯНОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

МИШИН НИКОЛАЙ ВЛАДИМИРОВИЧ

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ АВТОНОМНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА С НИЗКОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬЮ К ПАРАМЕТРИЧЕСКИМ ИЗМЕНЕНИЯМ

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

05.09.03. – Электротехнические комплексы и системы

Научный руководитель: Кандидат тех. наук, доцент Доманов Виктор Иванович

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1. ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ ЭПВД	. 13
1.1 Особенности работы ЭПВД автономных объектов	. 13
1.2 Типовые структуры ЭПВД	. 16
1.3 Основные элементы входящие в состав ЭПВД	. 20
1.3.1 Датчик положения ротора	. 20
Устройство ДПР состоит из двух элементов:	. 20
1.3.2 Преобразователи координат	. 24
1.3.3 Инвертор-коммутатор	. 24
1.4 Анализ электроприводов с вентильным двигателем	. 26
Выводы по главе 1	. 27
ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА И СИНТЕЗ УЗЛОВ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ЭПВД	. 27
2.1 Синтез структуры и модели ЭПВД с векторным управлением	. 27
2.2 Уменьшение потерь в автономном инверторе напряжения	. 31
2.3. Выбор и расчет силовых элементов схемы	. 33
2.4 Синтез структуры и модель ЭПВД	. 39
2.5 Синтез вычислителей координат	. 45
вентильного двигателя на основе первичных датчиков	. 45
2.6 Анализ влияния угла установки ДПР на характеристики ВД	. 47
Выводы по главе 2	. 54
ГЛАВА 3. СИНТЕЗ ЭПВД С НИЗКОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬЮ К	
ПАРАМЕТРИЧЕСКИМ ИЗМЕНЕНИЯМ.	. 54
3.1 Анализ ЭПВД к параметрическим изменениям и электропривода с низк	ой
чувствительностью	. 54
3.2 Динамика ЭПВД при изменении момента инерции объекта	. 60
3.3 Изменение уровня заряда аккумулятора	. 64
3.4 Схемотехническая реализация и энергосберегающие режимы ЭПВД	.71
3.5 Управление и диагностика вентильного двигателя	. 78
Выводы по главе 3	. 88

ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ	88
4.1 Описание экспериментальной установки	88
4.2 Моделирование исследуемого двигателя	95
4.2.1 Исследование влияния угла установки ДПР	95
4.2.2 Исследование режимов рекуперации	105
4.2.3 Исследование влияния параметрических изменений электропривод	да на
его характеристики	112
Выводы по главе 4:	121
ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ	122
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	124
Приложения	139

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время электромеханические системы, которые в зависимости от области применения называют «электроприводами, электромеханизмами, электромеханическими устройствами, широко внедряются в новые объекты или области применения, в частности используются в автономных транспортных средствах, таких как электропогрузчики, электротележки, гольфкары и электромобили» [10,13].

На данный момент во всех перечисленных выше автономных транспортных средствах в основном используются двигатели постоянного тока (ДПТ), которые обладают низкими технико-экономическими показателями, малым КПД и устаревшей системой управления. При использовании ДПТ с последовательным возбуждением невозможна рекуперация энергии, что немаловажно в автономном транспортном средстве, т.к. этот режим позволяет повысить эффективность электропривода в целом, т.к. обеспечивает более длительное перемещение на одной зарядке аккумулятора [53, 106, 126-128].

В диссертационной работе исследуется электропривод автономного транспортного средства на основе вентильного двигателя. Поставленную задачу можно решить с помощью синтеза и подробного анализа математических моделей вентильного электропривода, объекта исследований, системы управления и ее элементов с низкой чувствительностью к параметрическим изменениям.

В области теории и разработки электроприводов на основе вентильного двигателя основное место занимают работы учёных: А.Ю. Афанасьева, А.П. Балкового, Ю.А. Борцова, В.Е. Высоцкого, С.В. Демидова, Н.Ф. Ильинского, С.А. Ковчина, Н.И. Лебедева, А.Г. Микерова, Б.В.Новосёлова, А.Д. Поздеева, В.В. Рудакова, Ю.А. Сабинина, А.А.Сиротина, Г.Г. Соколовского, В.М. Терехова, М.Г. Чиликина и др. [4, 7, 21, 22, 37, 40, 52, 56-59, 90, 91, 94, 95, 103].

Большое влияние на динамические возможности электропривода с вентильным двигателем оказывают его основные узлы, а именно усилительнопреобразовательное устройство, приводящее к запаздыванию выходных сигналов

вентильного двигателя и всего электропривода относительно входных. Для устранения этого влияния нужно использовать различные схемы динамической и статической коррекции [16, 18, 25, 36].

Одним из возможных способов обеспечения режима рекуперации энергии при торможении является использование специальных схем управления вентильного электропривода. Управление сигналами датчика положения ротора позволяет электроприводу сохранить высокое быстродействие при изменяющихся параметрах и повысит эффективность электропривода в целом [50, 51].

Вышесказанное позволяет утверждать, что тема диссертации, связанная с разработкой и исследованием автономного электропривода с низкой чувствительностью к параметрическим изменениям, является актуальной.

Для построения системы управления ЭПВД требуется создания модели и синтеза структуры, которая будет удовлетворять поставленным требованиям, а именно это разработка датчиков и их математических моделей, обеспечивающих работу электропривода.

Объектом исследования является вентильный электропривод автономного объекта.

Предметом исследования являются методы построения ЭПВД и его составных узлов и математические модели, соответствующие алгоритмы и программы.

Целью диссертационной работы является разработка и исследование электропривода автономных объектов с низкой чувствительностью к параметрическим изменениям, моделей ЭПВД, а также разработка новых схемных решений направленных на повышение технико-экономических показателей электропривода.

Для достижения поставленной цели в диссертационном исследовании решаются следующие задачи:

- 1. Разработка и исследование электропривода с вентильным двигателем с низкой чувствительностью к изменяющимся параметрам.
- 2. Синтез математических моделей ЭПВД с низкой чувствительностью к параметрическим изменениям.

- 3. Разработка и исследование вычислителей координат на основе первичных датчиков.
- 4. Разработка и моделирование системы управления ВД с вычислителями координат электропривода.

Научная новизна. В диссертационной работе выполнены комплексные научно-технические исследования по разработке электропривода автономных объектов с низкой чувствительностью к параметрическим изменениям, модель ЭПВД, в результате разработаны новые схемные решения, направленные повышение технико-экономических показателей электропривода.

- 1. Разработан электропривод с вентильным двигателем отличающийся пониженной чувствительностью к параметрическим изменениям.
- 2. Разработаны узлы электронного управления углом установки датчика положения ротора.
- 3. Разработанная модель ЭПВД и результаты моделирования позволяют определить оптимальные режимы работы электропривода с вентильным двигателем.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту

- 1. Электропривод автономных объектов с низкой чувствительностью к параметрическим изменениям.
- 2. ЭПВД с системой управления по углу положения ротора.
- 3. Результаты моделирования ЭПВД при использовании режима рекуперации энергии.
- 4. Результаты моделирования вентильного электропривода с низкой чувствительностью к нагрузке.
- 5. Результаты экспериментальных исследований, подтверждающие эффективность предлагаемых решений

Теоретическая и практическая значимость работы

1. Разработан электропривод с вентильным двигателем, позволяющий продлить время работы от одной подзарядки за счет рекуперативного торможения.

- 2. Разработан электропривод автономного транспортного средства на основе вентильного двигателя с элементами управления по датчику положения ротора.
- 3. Разработанная система управления ВД позволяет снизить чувствительность к параметрическим изменениям за счет применения упреждающей коррекции.

Методы исследования. Теоретические исследования проведены с использованием методов математического моделирования, численного эксперимента на ЭВМ, теории дифференциальных уравнений, операционного исчисления, основных положений теории электрических цепей, теории автоматического управления, теоретических основ электропривода. Анализ системы выполнен при помощи натурного эксперимента на реальном объекте и на ЭВМ с применением программного комплекса МВТУ, Matlab Simulink и др.

Достоверность. Достоверность разработанных научных положений и выводов обеспечивается корректным применением законов электротехники, электромеханики, строгими математическими выкладками при решении операторных и дифференциальных уравнений. Адекватность разработанной математической модели подтверждается результатами математического моделирования и экспериментов на реальном объекте.

Апробация работы Основные положения и результаты диссертационного исследования обсуждались и получили позитивную оценку на ряде научнопрактических конференций:

- региональных: Молодежный инновационный форум приволжского федерального округа, Ульяновск, 2010-2011 г., Внутривузовские научно-технические конференции УлГТУ, г. Ульяновск, 2011-2013 г.;
- всероссийских: Всероссийская выставка научно-технического творчества HTTM-2014, Москва, 2014 г.;
- международных: VII Международная (XVIII Всероссийская) конференция по автоматизированному электроприводу «АЭП-2012», г. Иваново, 2012 г., IV международная научно-техническая конференция «Проблемы электротехники, электроэнергетики и электротехнологии.», г.Тольятти, 2012 г., Международ-

ная научно-техническая конференция «Проблемы повышения эффективности электромеханических преобразователей в электротехнических системах», г. Севастополь, 2012 г., Международная научно-техническая конференция «Проблемы повышения эффективности электромеханических преобразователей в электротехнических системах», г. Севастополь, 2013 г., 18, 19 Всеукрачнские студенческие научно-технические конференции, г. Севастополь, 2012, 2013 г., I Крымская студенческая научно-техническая конференция. г. Севастополь, 2014 г.

Публикации. Практически значимые результаты, полученные в ходе диссертационного исследования опубликованы в виде 19 научных работ, включая 6 статей из перечня ВАК, 2 патента на изобретение.

Личный вклад автора. Содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора в опубликованных работах. Подготовка к публикации полученных результатов проводилась совместно с соавторами, причем вклад диссертанта был определяющим. Все представленные в диссертации результаты получены лично автором.

Научная квалификационная работа на соискание степени кандидата технических наук выполнена в соответствии с паспортом специальности 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы» и соответствует формуле специальности «... принципы и средства управления объектами, определяющие функциональные свойства действующих или создаваемых электротехнических комплексов и систем промышленного, транспортного, ... и специального назначения».

Объектом изучения «...являются электротехнические комплексы и системы ... электропривода, ... транспортных средств, ...специальной техники».

Область исследования соответствует пунктам: 1 «Развитие общей теории электротехнических комплексов и систем, ...и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем». 3 «Разработка, структурный и параметрический синтез электротехнических комплексов и систем, их оптимизация, а также разработка алгоритмов эффективного управления». 4 «Исследование работоспособности и качества функционирования электротехниче-

ских комплексов и систем в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях».

Структура и объем работы. Диссертация объемом 140 страниц состоит из введения, 4 глав, заключения, библиографического списка литературы (всего 135 наименований) и 1 приложения.

Во введении сформулированы цели и задачи диссертационной работы, обоснована актуальность темы, определён круг рассматриваемых вопросов, дана краткая характеристика работы в целом.

В первой главе представлено краткое описание электроприводов автономных объектов и их моделей. Рассмотрены режимы работы используемых электроприводов автономных объектов и их технико-экономическая эффективность. Приводится анализ существующих схем электроприводов автономных объектов.

Отмечается, что применение ДПТ в электроприводах автономного транспортного средства характеризуется интенсивным снижением параметров аккумулятора в процессе движения и низкой энергетической эффективностью электропривода в целом.

Между тем, можно отметить что вентильный двигатель конструктивно похож на многофазный синхронный двигатель, в котором электромагнитные процессы намного сложнее. Развитие электроники привело к созданию компактных импульсных датчиков угла и энкодеров с высокой разрешающей способностью в сочетании с микропроцессорными устройствами управления, что позволило с помощью ШИМ-управления формировать на фазных обмотках вентильного двигателя синусоидальное напряжение поступающего с сигнала ДПР. С конструктивной точки зрения ВД оказался аналогичным синхронному двигателю, если его подключить от полупроводникового коммутатора с синусоидальным напряжением. Отличие только в том, что в ВД угол нагрузки (θ) не зависит от момента на валу, а устанавливается ДПР, остается неизменным и называется углом коммутации. Электромагнитные процессы цепи статора ВД можно описать подобными уравнениями, что и у синхронного двигателя, но с фиксированным θ . Для описания статических характеристик ВД используется именно такой подход. Механи-

ческая характеристика ВД может быть получена из уравнения угловой моментной характеристики синхронного двигателя с неявно выраженными полюсами. Динамические модели ВД в некоторых случаях рассматриваются с позиции теории синхронной машины. При этом получаются громоздкие нелинейные модели, неудобные для решения в общем виде задач анализа и синтеза систем управления. По существу динамическая модель исполнительного двигателя при описании его в виде синхронного двигателя оказывается гораздо сложнее и имеет более высокий порядок. Можно отметить, что при синтезе систем управления во многих случаях можно обойтись более простой моделью ВД.

Одним из перспективных направлений в развитии электропривода является повышение экономичности и надежности, производительности, основанное на применении новейших достижениях преобразовательной техники и автоматики, материаловедения, а также создание новых систем управления с новыми эксплуатационными свойствами, максимально адаптированные к внешним возмущениям. Среди таких систем особое место занимают системы управления ВД. В существующих электроприводах автономных объектов с двигателем постоянного тока в которых щеточно-коллекторный узел накладывает ограничения на предельные значения мощности, напряжения и частоты вращения. В связи с этим исследование вентильного двигателя, который имеет равноценные с ДПТ технические характеристики, но более надежный при меньших эксплуатационных расходах, является актуальной задачей. Среди разнообразных методов анализа процессов в машиновентильных системах большая часть базируется на существенных допущениях и построены для той или иной конкретной модификации схем, поэтому определяют лишь качественную картину явлений и не позволяют получить сравнительные характеристики. Одной из трудностей создания регулируемого электропривода автономных объектов на базе вентильного двигателя является многообразие возможных модификаций отдельных элементов системы и их возможных комбинаций.

Разработку электропривода с вентильным двигателем можно разделить на два этапа:

1) выбор структуры построения;

2) оптимизация параметров всех элементов схемы.

Во второй главе представлен синтез схемы вентильного электропривода, разработка отдельных узлов ЭПВД и их модели, синтез датчиков координат, анализ чувствительности к параметрическим изменениям и особенностям управления по достигнутым координатам. Отмечается, что для качественной работы вентильного двигателя в электроприводе автономного объекта необходим датчик положения ротора и векторное управление. Проанализированы методы управления ВД:

- 1. Управление частотой вращения;
- 2. Управление током;
- 3. Управление мощностью;
- 4. Управление моментом.

Выше перечисленные методы имеют свои достоинства и недостатки, что позволяет сделать выбор в пользу управления по углу установки.

Так же построена структурная схема вентильного двигателя с учетом значения угла установки θ [61], которая позволила проанализировать и построить структурную схему вычислителя $\theta_{\rm SKC}$ и структурную схему узла координатного преобразования [61].

Анализ влияния угла установки ДПР показал нам на угловых диаграммах ВД различные режимы работы электропривода, что позволяет определить наилучшие режимы работы вентильного электропривода автономного объекта.

Третья глава посвящена синтезу ЭПВД с низкой чувствительностью к параметрическим возмущениям. В ней была произведена настройка электропривода на технический оптимум по структуре подчиненного регулирования и проведен анализ чувствительности исследуемого ЭПВД к параметрическим возмущениям. Отмечается, что увеличение числа контуров значительно снижает быстродействие системы. Таким образом, применение упреждающей коррекции позволяет повысить быстродействие разработанного электропривода. Было произведено компьютерное моделирование, результаты которого представлены в виде графиков. Их анализ позволяет утверждать, что применение упреждающей коррекции положительно влияет на электропривод в целом. Были так же определены энергосберегающие режимы рабо-

ты ЭПВД, которые позволяют эффективно управлять электроприводом автономного транспортного средства, тем самым повышая время его автономной работы. Была построена функциональная схема рассматриваемого электропривода с возможностью многофункционального использования ДПР.

Четвертая глава. Эксперимент (моделирование). В процессе эксперимента исследовался регулируемый ЭПВД с возможностью рекуперативного торможения. Приведены переходные процессы при различных режимах работы ЭПВД, исследуются результаты экспериментов.

Дано описание экспериментальной установки, на которой производилось исследование, и приведены графики этого исследования.

Проведенное моделирование позволило исследовать влияние угла установки ДПР на работу ВД и проанализировать различные режимы работы в особенности режима рекуперации.

Влияние параметрических изменений электропривода на его характеристики, позволяет утверждать, что применение упреждающей коррекции положительно сказывается на работу электропривода в целом.

В приложении представлены акты об использовании результатов диссертационной работы в учебном процессе.

Результаты диссертационной работы применены в опытном образце автономной грузоподъемной тележке в ОАО «УНИПТИМАШ» и в учебном исследовательском лабораторном стенде для студентов энергетического факультета очной, заочной и заочно-ускоренной форм обучения в Ульяновском государственном техническом университете, при выполнении проекта по программе «У.М.Н.И.К.» Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере.

Научная работа отмечена дипломом Молодежного инновационного форума Приволжского федерального округа, 2009 г.; дипломом и медалью Всероссийской выставки научно-технического творчества молодежи «НТТМ-2014», г. Москва, ВВЦ, 2014 г.; грантом по Федеральной программе УМНИК-2012; дипломом участника Зворыкинского проекта «Инновации и техническое творчество» форума Селигер-2011, 2012 гг.

ГЛАВА 1. ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ ЭПВД

1.1 Особенности работы ЭПВД автономных объектов

При анализе работы электроприводов автономных транспортных средств с двигателями постоянного тока можно выделить основной недостаток — в щеточно-коллекторном узле имеется механический контакт.

Сравнение различных вариантов электроприводов автономных объектов по КПД в зависимости от массы является одним из важнейших факторов. Аккумуляторные батареи, применяемые на автономном транспортном средстве, имеют ограниченный запас энергии и значительную массу [30, 31, 78, 130-133].

Электроприводы с синхронным электродвигателем выполняются по схеме вентильного двигателя, в котором достаточно просто обеспечивается работа с $\cos \varphi = 1$, но при необходимости $\cos \varphi < 1$. Главным недостатком конструкции ротора коллекторного типа является сложность обеспечения достаточной механической прочности, в особенности на высоких частотах вращения.

В связи с этим возникают две важные взаимосвязанные задачи: исследование процессов и научное обоснование параметров вентильного электропривода с автономным инвертором напряжения для автономного электротранспорта, а также обоснование структуры электропривода с системой автоматического управления.

Одним из перспективных вариантов построения электропривода для автономных объектов является применение высокомоментного вентильного электропривода (ЭПВД) — магнитоэлектрической синхронной машины с электрической редукцией с использованием ДПР и полупроводникового инвертора напряжения. В этом случае на выходе инвертора и на обмотках синхронной машины формируется прямоугольное напряжение.

Система управления на базе автономного инвертора, построенного на IGBT-транзисторах может быть использована не только для переключения фаз, но и для широтно-импульсной модуляции напряжения, поданного на статор. Учиты-

вая высокие требования к системе управления вентильным двигателем, можно реализовывать ее на базе микропроцессорной и аналоговой техники. Таким образом, вентильный двигатель становится реальной альтернативой ДПТ. Сама система управления ВД похожа на систему управления ДПТ.

К основным достоинствам вентильных двигателей относится следующее:

- отсутствуют электрические потери в роторе;
- отсутствуют узлы, требующие обслуживания;
- в вентильных двигателях, возможно изменить жесткость механической характеристики, что позволяет использовать этот тип привода не только в двигательном режиме, но и в режиме эффективного рекуперативного торможения;
 - большая перегрузочная способность;
 - высокое быстродействие;
 - высокий КПД и коэффициент мощности соsф;

К недостаткам вентильного двигателя относится следующее:

- необходимость наличия датчика положения ротора на валу двигателя;
- стоимость редкоземельных магнитов;
- хрупкость постоянных магнитов [6].

Индукция распределяется в зазоре синусоидально, а значит, ЭДС вращения каждой фазы будет изменяться так же синусоидально в зависимости от угла поворота ротора: $E_1 = E_m \sin(9 + \omega t)$.

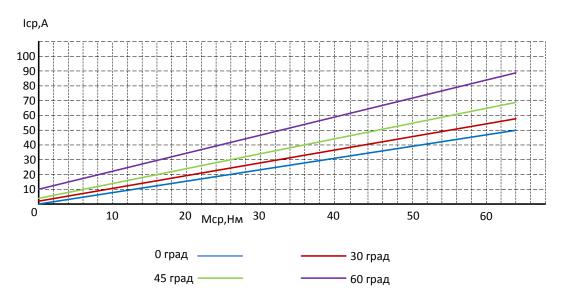


Рис.1.1 Зависимость среднего потребляемого тока от средней величины момента

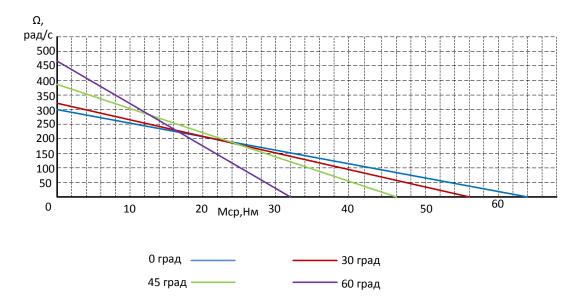


Рис.1.2 Механическая характеристика вентильного электродвигателя при различных углах

В зависимости от начального угла θ_0 , при котором начинается очередной период работы и происходит коммутация, ЭДС вращения может иметь различную форму. В первом случае датчик положения ротора установлен таким образом, что ЭДС E_{Σ} на краях интервала одинакова. При опережающей коммутации обойма с чувствительными элементами датчика положения ротора повернута навстречу направлению вращения на угол θ_0 .

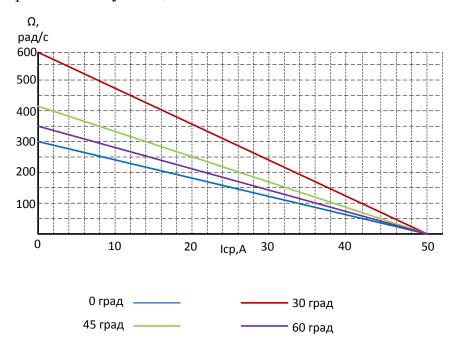


Рис.1.3 Электромеханическая характеристика вентильного электродвигателя при различных углах.

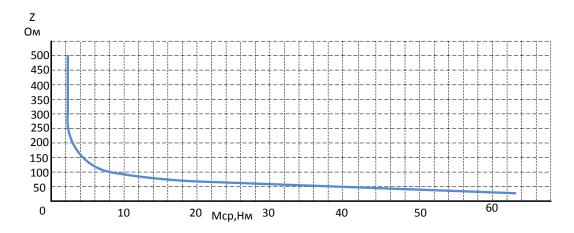


Рис. 1.4 Зависимость $Z_{_{ЭКВ}}$ от средней величины момента.

Чтобы уменьшить средний пусковой момент необходимо учесть опережение коммутации за счет угла поворота ДПР:

$$M_n = KI\cos\theta_0$$
 (1.1)

При введении угла θ_0 скорость идеального холостого хода увеличивается. Характеристики двигателя, которые приведены, получены без учета индуктивностей фаз.

Потенциал в области энергоэффективности позволяет получить положительные результаты использования ВД и другие преимущества ЭПВД свидетельствует о возможности его широкого применения в электроприводе автономных объектов.

Непрерывность и гладкость характеристик дают нам возможность построить достаточно простую электромеханическую модель ЭПВД.[29]

1.2 Типовые структуры ЭПВД

При использовании широтно-импульсной модуляции (ШИМ), управляя средним током на автономном инверторе, осуществляется регулирование частоты вращения и вращающегося момента двигателя. На рис.1.5 показана функциональная модель ЭПВД, где ВД – вентильный двигатель, ДПР – датчик положения ротора, ИП – источник питания, АИ – автономный инвертор напряжения [23, 134, 135].

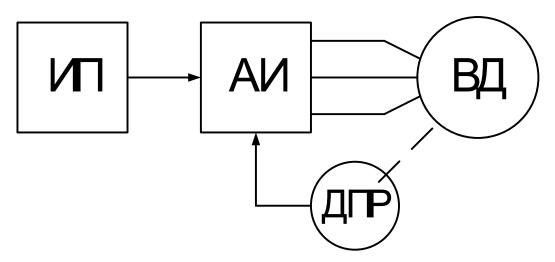


Рис. 1.5 – Функциональная модель ЭПВД.

В системе управления применяется инвертор (UZ), который построен на IGBT-транзисторах, посредством которого переключаются не только фазы, но и осуществляется широтно-импульсная модуляция напряжения. Данная схема работает в режиме АИН и имеет обратные диоды (рис.1.6).

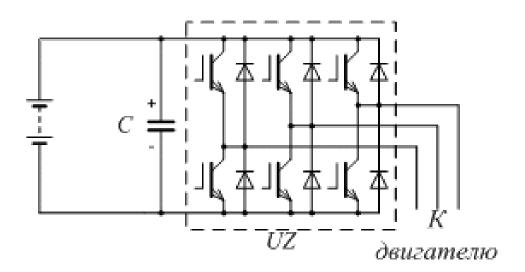


Рис. 1.6 – Принципиальная схема автономного инвертора напряжения тягового электропривода.

Чтобы обеспечить необходимые динамические и статические характеристики электропривод должен быть построен по принципу системы подчиненного регулирования [1], по аналогии с двигателем постоянного тока. Необходимые характеристики обеспечиваются путем введения в систему управления блока ограничения тока, отрабатывающего определенный алгоритм.

Выполняя требования, предъявляемые к системе управления [30-32, 80], можно реализовать систему управления на базе микропроцессорной техники. Структурная схема системы управления вентильным приводом для автономного транспортного средства приведена на рис. 1.7. В схеме присутствует ШИМ – микроконтроллер с функциями (АТ90РWМЗ). Сигналы управления поступают с пульта управления (ПУЭМ) на порты микроконтроллера. На микроконтроллер с датчика тока (ДТ) и датчика положения ротора (ДПР) поступают сигналы, которые в контроллере обрабатываются указанному алгоритму и в соответствии со схемой происходит формирование механической характеристики системы для управления силовыми ключами инвертора. На схеме АБ – аккумуляторная батарея, СМ – синхронная машина, АИН – автономный инвертор напряжения.

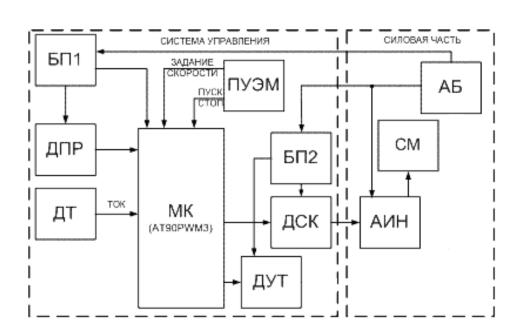


Рис. 1.7 – Структурная схема системы управления ЭПВД.

Система управления вентильным двигателем похожа на систему управления ДПТ. Рассмотренная структура ЭПВД является перспективной, и в ней отсутствуют недостатки исходного электропривода, в связи с этим уменьшается момент инерции ротора, отсутствует сложная система охлаждения, так как нет нагреваемых током роторных обмоток.

Узлы, из которых состоит обобщенный управляемый вентильный двигатель, показаны на рис. 1.8 [56], где СЭМП — синхронный электромеханический преобразователь, ТГ — тахогенератор, ПК — преобразователь координат, УМ — усилитель мощности, СК — схема статической коррекции, формирующая корректирующее напряжение U_d . Входным управляющим напряжением является напряжение U_q , а выходной величиной — угол поворота вала ВД.

На рисунке не показан важнейший узел ВД – датчик положения ротора, который может быть как электромеханическим, так и электронным, например, в виде датчиков Холла, размещенных на статоре СЭМП. Отсутствуют узлы контроля, защиты, диагностики и вторичного питания ВД.

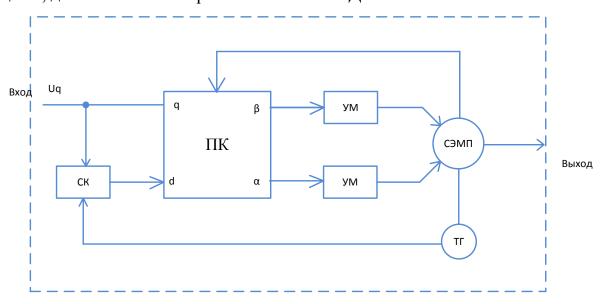


Рис.1.8 Основные узлы обобщенного управляемого вентильного двигателя.

Чтобы упростить схему ВД, нужно выбрать число полюсов ДПР, это число выбирают равным числу полюсов СЭМП, или же ДПР можно присоединить к СЭМП при помощи согласующего механического редуктора. При различном числе фаз используют схемы преобразования числа фаз.

Датчики положения ротора можно разделить на:

- импульсные и кодовые (цифровые);
- аналоговые;

Аналоговые ДПР применяются преимущественно при непрерывном способе управления МДС якоря СЭМП, а более простые импульсные — при дискретном. Кодовые ДПР, формирующие код угла, могут применяться при любом из этих способов.

Существует много принципов измерения углового положения ротора, но в ВД широко применяются ДПР следующих типов:

- идуктивные;
- оптические;
- датчики с элементами Холла.

1.3 Основные элементы входящие в состав ЭПВД

1.3.1 Датчик положения ротора

Датчик положения ротора позволяет нам определить взаимное угловое положение ротора и статора и выдает команды для управления схемой коммутации обмоток. Датчики разделяются на дискретные и аналоговые. Датчики дискретного типа выдают сигналы постоянной амплитуды. Аналоговый датчик выдает непрерывный сигнал с периодом 2π град.

Широко используются датчики дискретного типа, к которым относятся гальваномагнитные, индукционные и оптические.

Для позиционной обратной связи используется ДПР, который предназначен для формирования сигналов, об относительном положении осей полюсов ротора и осей фаз статорных обмоток двигателя. Для трехфазной обмотки эти углы равны θ , θ -120, θ -240, где угол θ определяется текущим положением ротора [59].

Фазами, которые создадут максимальный момент при взаимодействии с полюсами ротора, можно управлять сигналом с ДПР. Датчик располагается в корпусе электромеханической части двигателя.

Устройство ДПР состоит из двух элементов:

- 1) Сигнального элемента (СЭ), который связан с ротором двигателя.
- 2) Чувствительного элемента (ЧЭ).

На неподвижной части машины устанавливаются чувствительные элементы, количество которых в датчике положения ротора должно быть равным числу фаз обмотки якоря двигателя. При этом к чувствительным элементам подводится питающее напряжение.

Магниточувствительный элемент – ь это электронное устройство, реагирующее на изменение магнитного потока. Наиболее распространенными являются элементы Холла и магниторезисторы [7, 65].

Эффект Холла состоит в том, что если к двум углам полупроводникового кристалла рис. 1.9, помещенного в магнитный поток, приложена разность потенциалов и течет опорный ток I_{on} , то с двух других углов кристалла снимается ЭДС или напряжение Холла:

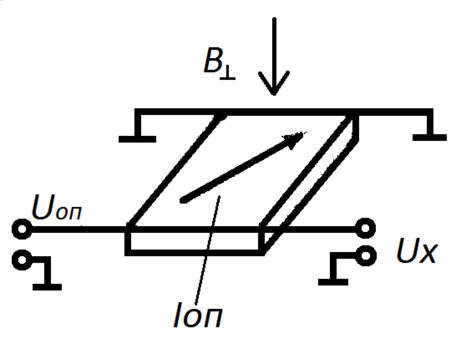


Рис 1.9

 $Ux=k_x*I_{on}B_L$, где k_x — коэффициент Холла, B_L — составляющая индукции магнитного поля перпендикулярная плоскости кристалла. В случае вращающегося магнитного поля то выходной сигнал гармонический $Ux=k_x*I_{on}B_m sin\phi$

Следовательно, эффект Холла может быть использован для измерения не только величины, но и направления магнитного потока. Так же элемент Холла

может дополнительно выполнять операцию умножения, т.к. ток $I_{\text{оп}}$ пропорционален напряжению $U_{\text{оп}}$.

Электронные компоненты, входящие в состав самого ВД, образуют усилительно-преобразовательное устройство, центральным узлом которого является преобразователь координат, построение структуры которого значительно зависит от вида поступающей в него информации об электрическом угле. В схеме, приведенной на рис. 1.8, эта информация передается в виде механического угла поворота ротора СЭМП. В данном случае преобразователь координат содержит ДПР, в виде синусно-косинусного вращающегося трансформатора.

Вторым важным узлом преобразовательного устройства является усилитель мощности, который немаловажен для ВД [5].

Для управления вентильным двигателем нужна информация о положении его подвижной части. Источником этой информации является датчик положения ротора или преобразователь механических перемещений. В регулируемом электроприводе (ЭП) датчик положения ротора также используется для отрицательной обратной связи и для вычисления скорости и ускорения ЭП. На рис.1.10 показаны составные части датчика положения ротора [8].

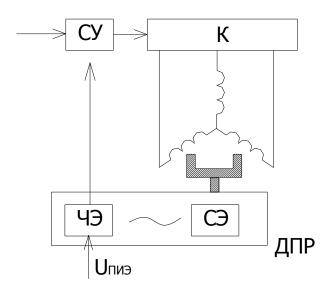


Рис. 1.10. Составные части датчика положения ротора

Когда сигнальным элементом достигается определенное угловое положение, сигнальный элемент взаимодействует с чувствительным элементом и бескон-

тактно оказывает воздействие на него энергией своего физического поля (магнитного, светового, электрического — в зависимости от типа сигнального и чувствительного элемента). Чувствительный элемент преобразовывает эту энергию в электрический сигнал. Этот электрический сигнал используется системой управления инвертором для управления.

В качестве датчика положения ротора и преобразователя координат (ДПР-ПК) в системах управления с ВД широкое применение нашли вращающиеся трансформаторы, в которых число полюсов согласовано с числом полюсов вентильного двигателя. Вращающийся трансформатор может быть использован в режиме фазовой модуляции, так и в режиме амплитудной модуляции [23].

Некоторые вентильные двигатели выпускаются с датчиками положения, имеющими с двигателем одинаковые число пар полюсов. Широкое распространение получили датчики Холла, которые взаимодействуют с постоянными магнитами возбуждения машины. Применение датчиков Холла для коммутации двигателя, и их точность обычно не удовлетворяет требованиям, предъявляемым к главной обратной связи прецизионного ЭП. Таким образом в прецизионном ЭП лучше использовать один высокоточный датчик для обратной связи по положению и для коммутации.

В состав датчика положения входит первичный преобразователь, который связан с измерительным элементом и представляет информацию о положении в виде электрических сигналов, а также вторичного преобразователя, который обрабатывает эту информацию и переводит ее в аналоговую или цифровую форму. Первичный преобразователь состоит из задающего элемента и чувствительного элемента, которые имеют на выходе электрические сигналы.

Таким образом, главными критериями для выбора датчика положения для ВД являются: погрешности, быстродействие, устойчивость к эксплуатационным факторам, надежность, невысокая стоимость, методы обработки сигналов. Исходя из вышеперечисленного наиболее распространены энкодеры и синусно-косинусный вращающийся трансформатор [65].

1.3.2 Преобразователи координат

Структура, реализующая алгоритм полного векторного управления ВД, показана на рис.1.11 [56]. Структура содержит три основных блока: формирователь тригонометрических функций угла ФТФ, блок умножителей БУ и блок сумматоров БС. В зависимости от того, в каком виде выполняется обработка информации, ПК делятся на аналоговые, цифроаналоговые и цифровые.

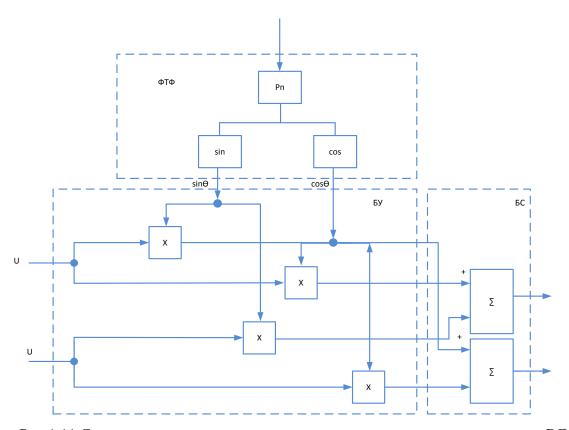


Рис.1.11 Структура, реализующая алгоритм полного векторного управления ВД.

При микропроцессорном управлении ВД применяются цифровые преобразователи координат.

При упрощенном векторном управлении, когда $U_a=0$. блок умножителей будет содержать только два умножителя.

1.3.3 Инвертор-коммутатор

Коммутаторы подразделяются на однополупериодные и двухполупериодные. Двухполупериодные коммутаторы выполняются по мостовой схеме и представляют собой инвертор. Однополупериодные схемы применяются в маломощных ВД и в вентильных двигателях на базе СРД [9, 46, 48].

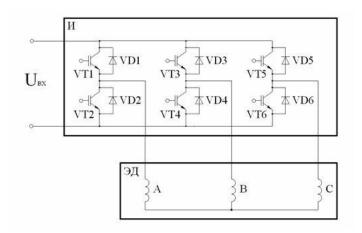


Рис. 1.12. Мостовая схема трехфазного инвертора

Большое распространение получила мостовая схема трехфазного инвертора рис. 1.12. При достаточно простом коммутаторе обеспечивается нужное значение пульсаций электромагнитного момента и экономичность. Для различных случаев применения данный вариант является универсальным [60].

Силовую часть инвертора выполняют на полупроводниковых приборах:

- на транзисторах;
- на тиристорах;
- на базе транзисторов с изолированным затвором IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) или MOSFET.

Распространенными вариантами работы ключей инвертора трехфазного ВД является два:

- 1) 120 градусная коммутация, то есть в пределах периода (360 градусов) каждый ключ работает 120 градусов.
 - 2) 180-градусная (синусная коммутация).

Время открытого состояния ключа не остается неизменным в течение полупериода выходной частоты, а изменяется по синусоидальному закону рис. 1.13а.

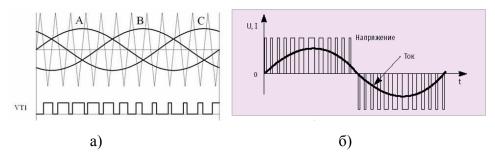


Рис.1.13 Формирование синусоидального напряжения при ШИМе

На вход компаратора подается сигнал несущей синусоиды и сигнал пилообразного напряжения. Транзистор будет включен, когда значение напряжения несущей синусоиды будет превышать значение пилообразного напряжения рис. 1.13а.

1.4 Анализ электроприводов с вентильным двигателем

Регулируемый электропривод с СМ и преобразователями частоты [3, 84, 86, 96, 107, 110] строится по принципу внешнего либо внутреннего управления. Принцип частотного регулирования при изменяющейся частоте сети, аналогично частотно-регулируемому приводу (ЧРП) с асинхронной машиной. В вентильном двигателе управление инвертором преобразователя частоты осуществляется функцией углового положения ротора двигателя, т.е. осуществляется принцип внутреннего управления. В любом установившемся режиме выходная частота инвертора совпадает с частотой ЭДС вращения СМ. Таков принцип действия электромеханического преобразователя энергии в ВД.

Самоуправляемый синхронный двигатель обладает свойствами двигателя постоянного тока и поэтому называется вентильным (бесколлекторным) двигателем.

Полупроводниковый инвертор, управляемый расположенным на валу СМ датчиком положения ротора (ДПР), выполняет функции механического коллектора, а вентили инвертора тока — функции скользящего щеточного контакта машины постоянного тока.

Принцип работы ВД существенно отличается от частотнорегулируемой синхронной машины, питающейся от сети. По сравнению с СМ, питаемой от преобразователя частоты с внешним управлением, в котором частота инвертора тока (напряжения) задается принудительно, привод с ВД имеет следующие преимущества:

- 1. Обладает свойством автокоммутации, благодаря чему в вентильном двигателе невозможен асинхронный режим;
- 2. Перегрузочная способность ВД не зависит от опрокидывающего момента СМ, а определяется установленной мощностью преобразователя. При перегрузке ВД снижает скорость, но не выходит из синхронизма;
- 3. ВД имеет высокий пусковой момент [34-35, 38, 68, 87-89, 97-101, 108, 109, 111-121].

Выводы по главе 1

Литературный обзор и патентный поиск показывают, что решение вопроса создания высокоэффективных электроприводов на базе вентильных двигателей является актуальной задачей. Среди вопросов, которые требуют дополнительных исследований являются:

- 1. Электроприводы с низкой чувствительностью к параметрическим изменениям.
- 2. Синтез схем управления вентильного двигателя по углу установки ДПР.

ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА И СИНТЕЗ УЗЛОВ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ЭПВД

2.1 Синтез структуры и модели ЭПВД с векторным управлением.

Поле возбуждения, создаваемое постоянными магнитами, не регулируется – это основной недостаток ВД. Преобразователь для такого двигателя нужно проектиро-

вать с максимально завышенной установленной мощностью — одновременно и на большой ток, и на высокое напряжение. При помощи ослабления поля машины, прилагая размагничивающий ток статора, направленный по оси d, можно решить данную проблему. Если внезапно отключить силовой преобразователь при работе в зоне ослабления поля, то ЭДС двигателя может вывести из строя его автономный инвертор напряжения. Существуют методы, которые уменьшают недостаток данной регулировки потока возбуждения. Одним из методов является использование реактивного момента явнополюсной синхронной машины с постоянными магнитами. Магнитное поле, создаваемое магнитами, выбирается сравнительно слабым, в результате чего машина может разогнаться до большой частоты вращения без ослабления поля. А малость активного момента компенсируется наличием реактивного, который может составлять до 60% от суммарного.

Для качественной работы вентильного двигателя в качестве тягового привода нужно использовать датчик положения ротора и векторное управление [23].

Важно определить, какой координатой должен управляться привод. Известны четыре основных метода управления ВД, каждый из представленых обладает своими преимуществами и недостатками:

- 1) Управление частотой вращения привода;
- 2) Управление уровнем тока;
- 3) Управление мощностью;
- 4) Управление моментом.

Каждый из этих способов имеет свои плюсы и минусы.

Управление частотой вращения привода:

Преимущества:

- 1. Для скалярной системы управления единственный возможный способ управления.
- 2. Серийные преобразователи частоты имеют штатный регулятор частоты вращения, и некоторые из них позволяют задавать только частоту вращения. При использовании серийных преобразователей управление частой вращения может оказаться единственным возможным вариантом.

Недостатки:

- 1. Управление частотой вращения менее удобно и привычно для водителя автономного транспортного средства.
- 2. Возможны автоколебания в некоторых режимах движения, при начале движения и остановке.

Управление уровнем тока оси Iq:

Преимущества:

- 1. Простой и естественный способ. Широко используется для приводов постоянного тока, вентильного привода.
- 2. Можно реализовать функции электрического дифференциала. При повороте автономного объекта двигатели вращаются с различной частотой.

Недостатки:

1. В системе управления нельзя точно задать уровень тока из-за того, что между током и моментом существует нелинейная зависимость.

Управление мощностью

Преимущества:

1. При управлении мощностью каждого двигателя положение педали газа можно сразу передавать на все двигатели в качестве задания скорости движения. Такое управление похоже на классическое управление машиной с двигателем внутреннего сгорания.

Недостатки:

1. При одинаковом задании мощности на все двигатели функция автоматического дифференциала работает, но не совсем качественно.

Управление моментом

Преимущества:

1. Автоматически реализуется функция электрического дифференциала при индивидуальном приводе каждого колеса.

Недостатки:

1. Большой диапазон изменения момента тягового в зависимости от скорости, требуется внимательно отнестись к выбору типа цифровых данных для задания момента.

Рассматривая все приведенные варианты, для вновь создаваемой системы управления перспективным и простым является вариант управления по углу установки.

В формулу момента не входит ток в проекции на ось d, и не влияет на момент, поэтому этот ток можно задать равным нулю. Создание отрицательного тока по оси d приводит к улучшению характеристик привода. Недостаточное напряжения инвертора не сможет создать требуемый тока статора, то тогда фактический ток статора окажется существенно меньше заданного, а приведет к невозможности реализовать заданный момент. Составляющие, на которые «тратится» напряжение инвертора из линеаризованной модели ВД в координатах d, q:

$$\begin{cases} u_{d} = R_{s}i_{d} + \frac{d\Psi_{d}}{dt} - \omega\Psi_{q} \\ \\ u_{q} = R_{s}i_{q} + \frac{d\Psi_{q}}{dt} + \omega\Psi_{d} \end{cases},$$

где потоки машин
$$\psi_{\text{d}} = L_{\text{s}} i_{\text{d}} + \psi_{\text{b}} \\ \psi_{\text{d}} = L_{\text{s}} i_{\text{q}} ,$$

 U_d , U_q , проекции вектора напряжения на оси d и q, R_S - сопротивления обмотки статора, ω – электрическая частота вращения, ψ – потокосцепления по осям d и q, L_S – индуктивность обмотки статора.

Рассматриваем каждую составляющую напряжения оси d и q. Для электродвигателя, рассчитанного на низкое напряжение, сопротивление статорных обмоток мало, поэтому составляющими R_si_d и R_si_q можно пренебречь. В статическом режиме напряжения на выходах регуляторов можно принять следующими:

$$\begin{cases} u_{d} = -\omega L_{s} i_{q} \\ u_{q} = \omega L_{s} i_{d} \end{cases}$$

Исходя из выше представленного, можно сделать вывод, что для снижения общего вектора напряжения можно:

- 1. Снижать ток оси q, что приведет к снижению момента.
- 2. Создавать отрицательный ток по оси d, чтобы скомпенсировать составляющую ЭДС машины.

Создание отрицательного тока оси d позволит уменьшить прикладываемое к двигателю напряжение, не уменьшая при этом момент. А это значит, что при низком напряжении на инверторе создание отрицательного тока оси d позволит реализовать заданный момент. Такой метод называется ослаблением поля двигателя током статора и успешно применяется для возможности работы ВД на высокой скорости.

2.2 Уменьшение потерь в автономном инверторе напряжения

Для инверторов напряжения, которые используются в частности на автономном транспортном средстве, существует много различных алгоритмов формирования трехфазной синусоидальной ШИМ.

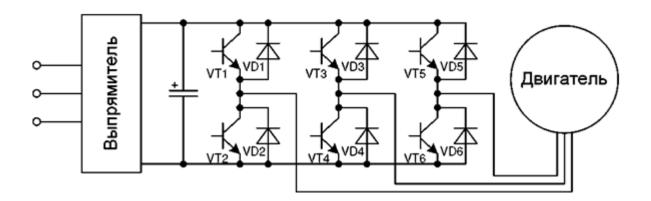


Рис. 2.1 Инвертор напряжения автономного транспортного средства с трехфазным двигателем.

Здесь использован метод «синусоидальной ШИМ», в котором производится шесть коммутаций силовых ключей на периоде, а выходное напряжение автономного инвертора меньше, чем на входе его выпрямителя. Чтобы повысить напряжение начали использовать метод подмешивания третей гармоники в задания скважностей, что приводило к увеличению итогового выходного напряжения. Затем этот метод доработали и реализовали в некоторых микроконтроллерах, например, IR, на аппаратном уровне.

На рис. 2.2 изображен рисунок, показывающий базовые вектора инвертора, имеющего шесть ключей и соответствующие коды состояния (каждая цифра кодирует состояние силового ключа инвертора, если значение 0, то работает нижний ключ, если значение 1, то работает верхний ключ). Для того что бы реализовать некоторое заданное напряжение Изад, которое лежит в нулевом секторе, при использовании векторной ШИМ допускается использовать как базовые вектора с кодами 100, 110, 111, так и 000, 100, 110. Работу схемы можно представить следующим образом. Обозначим ситуацию, когда замкнуты все «нижние» ключи, кодом 000, аналогично обозначим кодом 111 состояние, когда замкнуты все «верхние ключи». Работа системы начинается с кода 000 или 111. Известны способы [26], позволяющие снижать искажение выходной синусоиды, вызванное влиянием, мертвого времени. Для этого рекомендуется сменить используемый нулевой вектор непосредственно при работе. Данная смена производится посередине сектора, за счет чего визуально образуется двенадцать секторов, отсюда получено и название – двенадцатисекторная ШИМ. В двух соседних секторах, ранее бывших одним, при таком методе ШИМ используют разные нулевые вектора с кодами 000 и 111. В данном методе снижения потерь предлагается также использовать смену используемых нулевых векторов при работе, но смену производить в функции токов фаз с целью уменьшения динамических потерь инвертора.

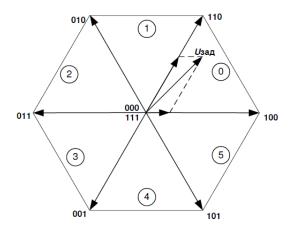


Рис. 2.2 Схема кодирования векторов инвертора.

На рис. 2.2 приведена схема кодирования векторов. Анализ работы инвертора в двух различных режимах (начальный код 000 или начальный код 111) показывает, что выходное напряжение инвертора будет соответствовать в обоих случаях Uзад (рис. 2.3).

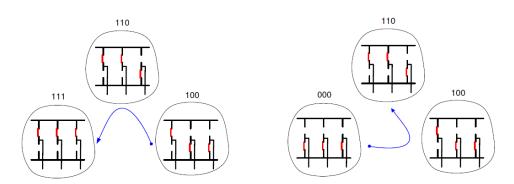


Рис. 2.3 Схемы очередности работы векторов инвертора

Анализ коммутации ключей инвертора в соответствии с очередностью работы векторов в двух режимах работы (начальный код 000 или начальный код 111) показывает, что на всем периоде коммутации всегда будет иметься одна некоммутируемая стойка. При этом динамические потери могут быть снижены за счет того, что по логике управления не коммутируется стойка с наибольшим током, за счет этого снижаются потери в ключах. Данный выше алгоритм можно реализовать на микроконтроллере, где должен обсчитываться каждый период ШИМ. Таким образом, можно будет выбрать наиболее выгодную для текущих токов фаз последовательность коммутации ключей.

2.3. Выбор и расчет силовых элементов схемы

Особенностью автономных электроприводов является питание от низковольтных источников тока, в частности от аккумуляторов. Для таких схем в качестве управляемых ключей рекомендуется выбирать MOSFET транзисторы, т.к. они имеют минимальное падение напряжения в открытом состоянии. Кроме этого существенно упрощаются цепи управления подобными ключами за счет использования полумостовых драйверов с использованием схем плавающего потенциала.

Выбор силовых элементов нужно производить с учетом двукратных запасов по напряжению и максимально допустимому току объекта управления.

Исходя из паспортных данных двигателя выбирается MOSFET транзистор IRFP90N20D.

Выбранные силовые MOSFET транзисторы устойчивы к короткому замыканию продолжительностью до 10 мкс, обладают высокой скоростью переключения и малым напряжением насыщения.

Система управления преобразователем должна быть построена на основе специализированных узлов управления ключами — драйверов. Выбор драйвера производится по нужному напряжению питания преобразователя и току цепей управления силовыми ключами. Для согласования работы драйверов и ключевых элементов преобразователя необходимо рассчитать резисторы в цепях управления ключами и зарядные емкости драйверов.

В отличие от биполярных транзисторов, транзисторы MOSFET управляются потенциалом и потребляют ток управления только в процессе коммутации. Такие транзисторы могут работать на высокой частоте в 50 кГц и выше. Для этого необходимо формировать цепи управления для предотвращения коммутационных перенапряжений. Существуют способы, которые позволяют решить эту задачу. Одним из эффективных методом борьбы с перенапряжением при коммутации является ограничение тока затвора, который основывается не следующем расчете.

По виду кулоновской характеристики затвора (рис. 2.4) определяем требуемый заряд Q1 для переключения транзистора:

 $\mathbf{U}_{\mathrm{GS}} = 12\mathbf{B}$ напряжение цепи управления. $Q_{\mathrm{l}} = 35\,\hat{\imath}\hat{O}$.

$$Q_1 = i_G t_{II} , \qquad (2.1)$$

где i_G - ток затвора при переключении;

 $t_{\scriptscriptstyle \Pi}$ - время переключения, $\,t_{\scriptscriptstyle \Pi}\approx 0{,}001/\,f_{\scriptscriptstyle K}\,,\,\,f_{\scriptscriptstyle K}\,$ =20 кГц - частота коммутации.

$$t_{\rm II} \approx \frac{0,001}{f_{\rm K}} = \frac{0,001}{20 \cdot 10^3} = 0,5 \cdot 10^{-7} \text{ c} \quad i_{\rm G} = \frac{35 \cdot 10^{-9}}{0,5 \cdot 10^{-7}} = 0,7 \text{ A}.$$

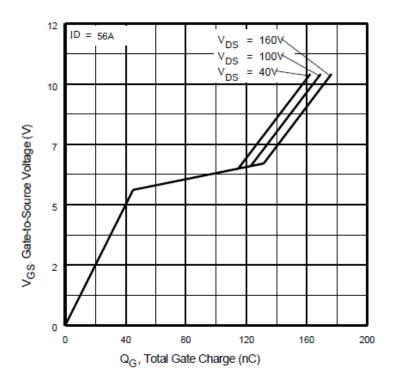


Рис. 2.4. Кулоновская характеристика цепи затвора
$$\mathbf{R_y} = \frac{\mathbf{U_{GE}}}{\mathbf{i_G}};$$
 Затем определяем сопротивление цепи управления U_{GS} :
$$\mathbf{R_y} = \frac{12}{0.7} = 17 \,\, \mathrm{Om}$$

При управлении ключами верхнего уровня используем схему с плавающим потенциалом. Основным элементом которой является емкость C (рис. 2.5)

Емкость обеспечивает надежное питание цепи управления верхним ключом. Известно, что Q = CU,

где C — величина емкости;

U — приложенное напряжение.

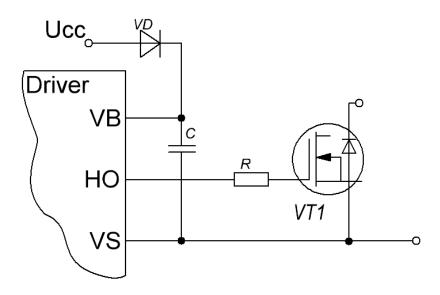


Рис. 2.5. Схема цепи управления затвором

Напряжение, которое приложено к емкости, определяем по выражению:

$$U = U_{CC} - U_{\ddot{A}} - U_{S}, \tag{2.2}$$

где $U_{\it CC}$ =15 $\it B$ - напряжение источника питания;

 $U_{\ddot{A}} = (0,7...1)~\hat{A}$ - падение напряжения на открытом диоде;

 $U_{\rm \it S}$ = 1,95 $\it B$ - падение напряжения на переходе затвор — исток транзистора.

$$U = 15 - 1 - 1.95 = 12,05 B$$

$$C \ge rac{2igg[2Q_1 + Q_{ls} + rac{I_G}{f}igg]}{U} = rac{70.2 \cdot 10^{-6}}{12,05} = 5,8 \; ext{мк}\Phi$$

Управляющие сигналы на систему автоматического управления поступают с ШИМ-контроллера TL494.

Для снижения нагрева двигателя необходимо отфильтровать напряжение на выходе инвертора.

Расчет RLC – фильтра:

Рассмотрим данный способ расчёта выходного фильтра на заданный коэффициент гармоник синусоидального напряжения на нагрузке. Инвертор напряжения реализует ШИМ с частотой квантования $f_{\rm K}=20~{\rm k}\Gamma_{\rm U}$ для построения синусоидального выходного напряжения с частотой $f=0..50~{\rm \Gamma}_{\rm U}$. Далее требуется опреде-

лить параметры выходного Γ -образного LC-фильтра, обеспечивающего на активной нагрузке R =0.1 Ом коэффициент гармоник не более K_{Γ} = 3%. Для оптимальных массогабаритных показателей в сравнении с обычными фильтрами выбрали Γ -образный LC-фильтр. Получена ШИМ — последовательность, которая управляет ключом (Рис.2.6).

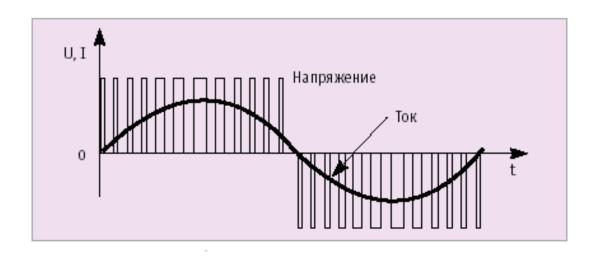


Рис. 2.6 Форма выходного напряжения РН.

Разложив полученную функцию, мы можем определить спектр амплитуд гармонических составляющих. Первая гармоническая составляющая (0.50 Гц) и множество высокочастотных гармоник, сконцентрированных возле частот, кратных частоте квантования (20; 40 кГц и т.д.). Таким образом, спектр не содержит относительно низкочастотных гармонических составляющих (кроме первой), а высокочастотные составляющие можно отфильтровать, используя LC-фильтр. Чем выше частота квантования, тем в более высоком частотном диапазоне окажутся массивы высокочастотных гармонических составляющих.

В зависимости от номера гармонической составляющей мы можем найти функцию коэффициента передачи выходного фильтра. Для этого по эквивалентной схеме выходного фильтра (рис.2.7) составляем систему:

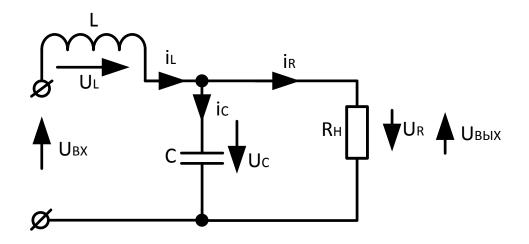


Рис. 2.7. Выходной фильтр

уравнений с использованием законов Кирхгофа и, производим математические преобразования, после которых можно найти искомую функцию:

$$K_{\Phi U} = \frac{U_{\text{BMX}}}{U_{BX}} = \frac{-R}{n^2 \omega^2 L C R - i n \omega L - R}$$
(2.3)

где n - номер гармонической составляющей; $\omega = 2\pi f$ - круговая частота выходного напряжения; L - индуктивность дросселя фильтра; C - ёмкость конденсатора фильтра; R - сопротивление нагрузки.

При дальнейших вычислениях нам нужно задаться начальными параметрами фильтра. Индуктивность можно выбрать произвольно, а ёмкость конденсатора находим из условия равенства волнового сопротивления фильтра сопротивлению нагрузки для исключения резонансных явлений на одной из высокочастотных гармонических составляющих:

$$C = \frac{L}{R^2} \left[\text{MK}\Phi \right] \tag{2.4}$$

Далее нужно перемножить каждую гармоническую составляющую выходного напряжения на коэффициент передачи фильтра. Потом находим диаграмму напряжения на нагрузке. Если напряжение на нагрузке имеет синусоидальный характер с некоторыми искажениями из-за наличия высокочастотных гармонических составляющих, не полностью подавленных фильтром, то фильтр с указан-

ными параметрами недостаточен для обеспечения на выходе заданного коэффициента гармоник напряжения.

По приведённому алгоритму рассчитываем коэффициент гармоник напряжения на нагрузке при различных параметрах фильтра с учётом выражений (2.3) и (2.4) от начального значения индуктивности дросселя с шагом ΔL для нескольких значений. Получаем зависимость коэффициента гармоник выходного напряжения от индуктивности дросселя фильтра. Производя расчёты при разных частотах квантования, можно получить семейства подобных характеристик.

Используя выражение (2.4), выбираем индуктивность дросселя и находим ёмкость конденсатора. Затем находим диаграмму напряжения на нагрузке. Выбираем характеристику, для которой коэффициент гармоник напряжения на нагрузке удовлетворяет заданному в начальном условии. Таким образом, мы можем определить необходимые основные параметры фильтра при заданной выходной частоте и частоте квантования.

2.4 Синтез структуры и модель ЭПВД

В большинстве источников литературы [62, 63] дифференциальные уравнения описания ВД приведены для $\phi = \pi/2$, для удобства вычислений преобразуем исходные уравнения с помощью тригонометрических преобразований. За базовые величины взяты номинальные значения величин для исследуемой машины. Уравнения принимают вид:

$$U_{q} = U\cos\phi = I_{q}(T_{9}p+1) + \omega(1+T_{9}I_{d})$$

$$U_{d} = -U\sin\phi = I_{d}(T_{9}p+1) - \omega T_{9}I_{q}$$

$$T_{M}\omega p = I_{q} - M_{H}$$

$$(2.5)$$

где в относительных единицах представлены следующие координаты: I_q и I_d — проекции тока на оси d и q во вращающейся системе координат, T_M — электромеханическая постоянная времени. За относительные единицы взяты номинальные значения координат.

В установившемся режиме уравнение механических характеристик для вентильного двигателя описывается формулой [28,60,61]:

$$M = \frac{\cos \theta}{1 + T_2^2 \omega^2} U - \frac{1 - T_3 U \sin \theta}{1 + T_2^2 \omega^2} \omega,$$
 (2.6)

где M , ω , U , T_{\ni} - относительные значения момента, скорости, напряжения и электромагнитной постоянной ВД, внутреннего угла.

Из уравнения (2.6) видно, что управление двигателем может быть реализовано за счет изменения напряжения U либо угла установки θ . Широко используют метод управления напряжением [4], т.к. до недавнего времени электронные способы изменения θ были сложны. Современное развитие преобразовательной техники и электроники позволяет создавать простые узлы электронного регулирования угла θ .

На основании системы уравнений (2.5) построим структурную схему двигателя (рис. 2.8).

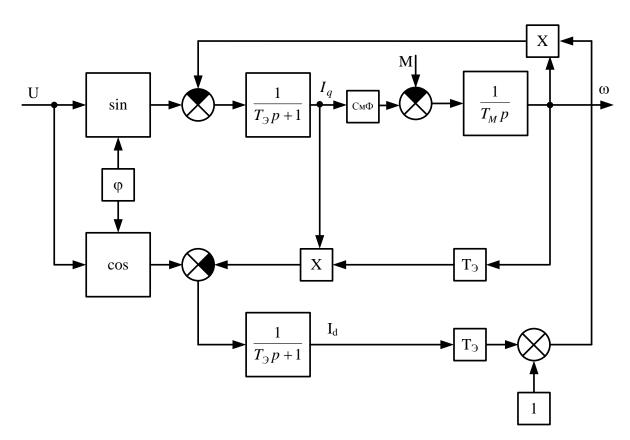


Рис. 2.8. Структурная схема вентильного двигателя с учетом значения угла установки ф.

Из выражения (2.6) следует, что большинство координат ВД зависят от угла θ . Анализ уравнения (2.6) показал, что в функции $M = f(\theta)$ имеется экстремум при условии:

$$\theta_{9KC} = \arctan(T_9\omega), \qquad (2.7)$$

$$M_{9KC} = M_{max} = \frac{U\sqrt{1 + T_9^2\omega^2}}{\left(1 + T_9^2\omega^2\right)^2} - \frac{\omega(1 + T_9^2\omega^2) - T_9^2\omega^2U\sqrt{1 + T_9^2\omega^2}}{\left(1 + T_9^2\omega^2\right)^2}, \qquad (2.8)$$

Аналогичный анализ можно провести для функции $U = f(\theta)$. Экстремум $U = f(\theta)$ достигается при том же условии (2.7):

$$U_{3KC} = U_{min} = \frac{\omega}{\sqrt{1 + T_2^2 \omega^2}} + \frac{1 + T_2^2 \omega^2}{\sqrt{1 + T_2^2 \omega^2}},$$
 (2.9)

Анализ функции $\omega = f(\theta)$ показывает, что экстремум достигается при условии:

$$T_{2}M = \sin\theta\cos\theta + T_{2}U\cos\theta, \qquad (2.10)$$

Уравнение (2.10) не позволяет однозначно, как в предыдущих случаях, определить значение $\theta_{ЭКС}$. Можно найти $\theta_{ЭКС}$ для условия M=0:

$$\theta_{\mathcal{H}C} = \arcsin(T_{\mathcal{H}}U), \qquad (2.11)$$

В этом случае:

$$\omega_{\mathcal{H}C} = \omega_{\text{max}} = \frac{U\sqrt{1 - T_{\mathcal{I}}^2 U^2}}{1 + T_{\mathcal{I}}^2 U^2},$$
(2.12)

Для того чтобы оценить влияние угла установки на момент, найдем приращение ΔM по формуле:

$$\Delta M = M_{2KC} - M_H, \tag{2.13}$$

где $M_{\it ЭКС}$ - экстремальное значение по формуле (2.8);

 M_H - значение M по формуле (2.6) при условии $\theta \! = \! 0$ (нейтральная установка датчика).

$$\Delta M = \frac{U(\sqrt{1 + T_3^2 \omega^2} - 1)}{1 + T_3^2 \omega^2},\tag{2.14}$$

Из уравнения (2.14) видно, что ΔM возрастает с ростом U влияние T_{\ni} и ω на ΔM незначительно.

Для оценки влияния угла установки на напряжение выполним аналогичный анализ:

$$\Delta U = U_{\mathcal{H}C} - U_H, \tag{2.15}$$

где $U_{\mathcal{H}C}$ - экстремальное значение U по формуле (2.5);

 U_H - значение U из формулы (2.5) при условии $\theta = 0$.

$$\Delta U = \left[\omega + M(1 + T_{\Im}^2 \omega^2)\right] \left[\frac{1}{\sqrt{1 + T_{\Im}^2 \omega^2}} - 1\right],\tag{2.16}$$

Из уравнения (2.16) видно, что модуль ΔU возрастает с ростом ω , М и T_3 .

Определим чувствительность момента к изменениям напряжения и угла установки. Чувствительность к изменению напряжения определяется выражением:

$$S^U = \frac{dM}{dU} \frac{U}{M}.$$

На основании (2.5) получаем следующее выражение:

$$S^{U} = \frac{(1 - T_{\Im}\omega\theta)U}{U - \omega(1 + T_{\Im}U\theta)},$$
(2.17)

По аналогичной формуле определяется чувствительность к изменению угла установки:

$$S^{\theta} = \frac{-(U\theta + \omega + T_{9}U\omega)\theta}{U - \omega(1 + T_{2}U)\theta},$$
(2.18)

Сравнение выражений (2.17) и (2.16) показывает, что при прочих равных условиях механическая характеристика вентильного двигателя более чувствительна к изменению угла установки ДПР, чем к изменению напряжения.

Пусть экстремальный регулятор обеспечивает выполнение условия (2.7). В этом случае

$$\sin \theta_{\mathcal{H}C} = \sin(\operatorname{arct}g(T_{\mathcal{H}}\omega)) = \frac{T_{\mathcal{H}}\omega}{\sqrt{1 + T_{\mathcal{H}}^2 \omega^2}} \\
\cos \theta_{\mathcal{H}C} = \cos(\operatorname{arct}g(T_{\mathcal{H}}\omega)) = \frac{1}{\sqrt{1 + T_{\mathcal{H}}^2 \omega^2}} \\$$
(2.19)

На основании выше изложенного можно построить структурную схему вычислителя приведена на рис. 2.9.

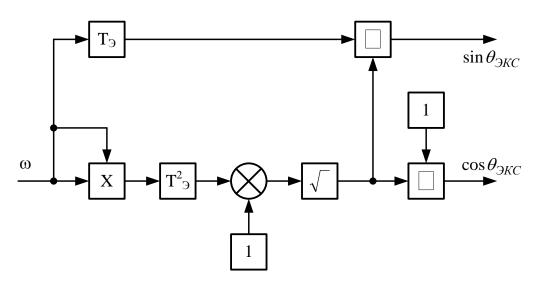


Рис. 2.9 Структурная схема вычислителя $\, heta_{
m ЭКC} .$

В реальном электроприводе экстремальный регулятор должен изменять сигналы ДПР по закону

$$\sin \alpha' = \sin(\phi + \theta_{\text{9KC}})
\cos \alpha' = \cos(\phi + \theta_{\text{9KC}}) ,$$
(2.20)

Для выполнения этих условий используем узел координатного преобразования. В вентильном двигателе имеются сигналы $\sin \varphi$ и $\cos \varphi$, вырабатываемые ДПР. Сигналы $\sin \theta_{\mathcal{I}KC}$ и $\cos \theta_{\mathcal{I}KC}$ формируются вычислителем (рис. 2.9). На основании этого координатное преобразование может быть реализовано схемой, структура которой приведена на рис. 2.10.

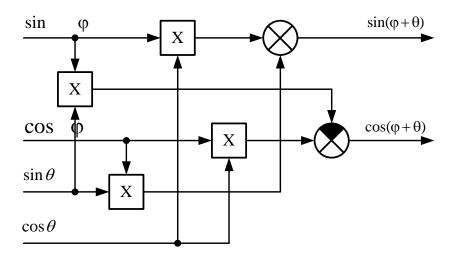


Рис. 2.10. Структурная схема узла координатного преобразования.

По структуре (рис. 2.8) было проведено моделирование вентильного двигателя. На рис. 2.11 приведены логарифмические амплитудные характеристики при управлении напряжением (1) и при управлении по углу установки (2) [61].

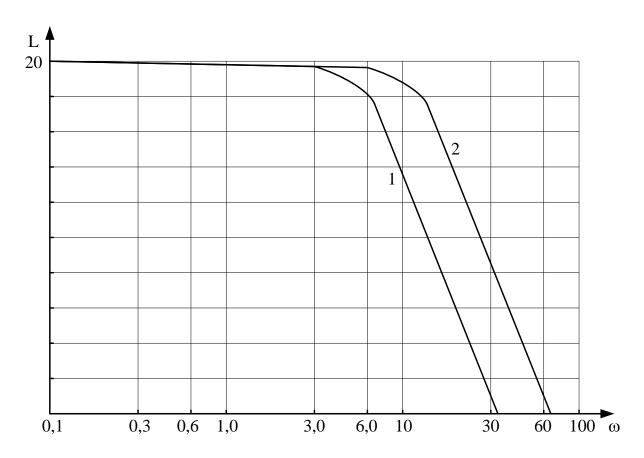


Рис. 2.11. Логарифмические амплитудные характеристики.

Сравнение логарифмических характеристик показывают преимущества при управлении по углу установки ДПР, тем самым увеличивая полосу пропускания.

2.5 Синтез вычислителей координат

вентильного двигателя на основе первичных датчиков

В автономных электроприводах для повышения момента используется двигатель с электрической редукцией, поэтому сигналы классических тахогенераторов на низких скоростях имеют низкий уровень, при достаточно высокой составляющей помехе.

На рис. 2.12, приведена схема вычислителя скорости [10, 28]. Она содержит два множительных звена M_1 и M_2 и два дифференцирующих звена. Напряжения U_1 и U_2 , поступающие от ДПР, определяются выражениями:

$$U_{1} = U_{mT} \sin \varphi(t)$$

$$U_{2} = U_{mT} \cos \varphi(t)$$
(2.21)

где \boldsymbol{U}_{mT} – амплитуда выходного напряжения ДПР.

Так как на выходе датчика скорости установлен фильтр, окончательно получаем

$$U_{\text{JC}}(p) = \frac{k_{\text{JC}}}{\left(T_{\text{J}}p+1\right)\left(T_{\phi}p+1\right)}\Omega(p). \tag{2.22}$$

На рис. 2.13 приведена схема датчика момента, который состоит из двух множительных звеньев M_3 и M_4 , на входы которых подаются напряжения U_1 и U_2 , а также напряжения $U_{i\alpha}$ и $U_{i\beta}$, пропорциональные токам в фазах.

$$U_{i\alpha} = I_{m} \sin \varphi(t)$$

$$U_{i\beta} = I_{m} \cos \varphi(t)$$
(2.23)

где I_m – модуль фазного тока.

Сигнал на выходе схемы рис. 2.13.

$$U_{\text{JM}} = U_5 + U_6 = U_{\text{mT}} \sin \varphi(t) I_{\text{m}} \sin^2 \varphi(t) + U_{\text{mT}} I_{\text{m}} \cos^2 \varphi(t) = U_{\text{mT}} I_{\text{m}}.$$
 (2.24)

Таким образом, напряжение $U_{\mathcal{I}\!M}^{'}$ пропорционально модулю тока, который в свою очередь пропорционален электромагнитному моменту двигателя. Учитывая, что

в канале измерения i_{α} и i_{β} установлены фильтры, и такой же фильтр установлен на выходе датчика момента, окончательно получаем:

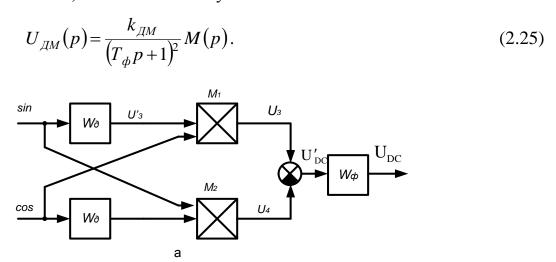


Рис. 2.12. Структурная схема вычислителя сигнала скорости

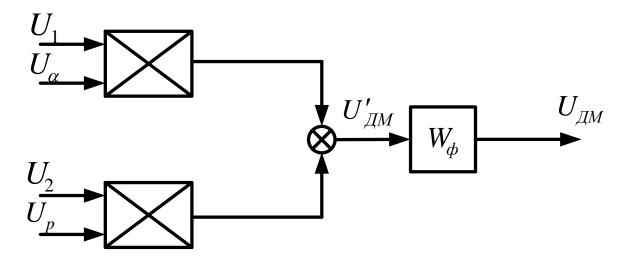


Рис. 2.13. Структурная схема датчика момента

Таким образом, расчетная структурная схема системы преобразователь — вентильный двигатель для режимов работы с малыми скоростями и использования разработанных датчиков момента и скорости имеет вид, приведенный на рис. 2.14.

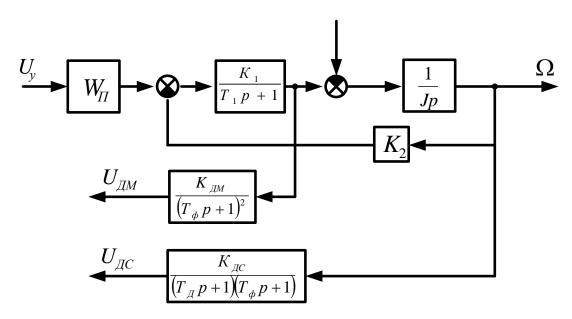


Рис. 2.14. Структурная схема ВД с вычислителями момента и скорости

2.6 Анализ влияния угла установки ДПР на характеристики ВД.

В процессе исследований анализировались координаты ВД при пуске с различными значениями угла θ [64, 69, 70]. Для θ =45° переходные процессы приведены на рис. 2.17. Подробное описание модели рассмотрено в 4.2.

В таблице 2.1 зафиксированы результаты приведенного моделирования.

Таблица 2.1

θ	0	45	90	135	180	225	270	315	360
M	0	14	18	12	0	-12	-18	-14	0
n	0	13	27	30	0	-30	-27	-13	0
Id	21	15	1	-14	-21	-14	1	15	21
Iq	0	11	16	11	0	-11	-16	-11	0

На основании таблицы 2.1 построена угловая характеристика вентильного двигателя, изображенная на рис. 2.15.

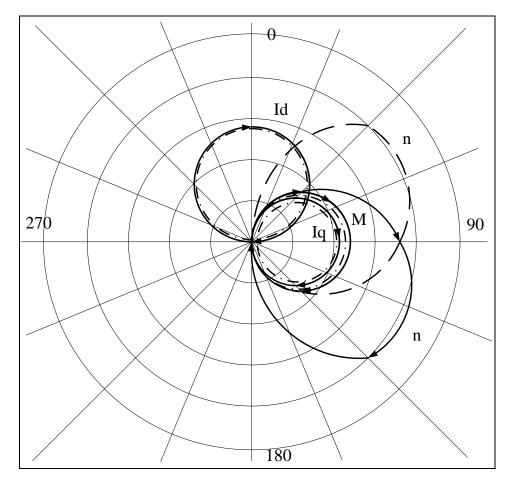


Рис. 2.15. Угловая диаграмма ВД.

Изменение угла θ происходит по часовой стрелке. По направлениям значений угла θ в масштабе отложены соответствующие значения координат ВД, которые затем соединены в годограф. Положительные значения координаты обозначены непрерывистой линией, отрицательные – пунктирной [70].

Анализ угловой диаграммы (рис. 2.15.) показывает, что

- годографы координат Id, Iq, М представляют собой окружности;
- годоргафы Id и Iq сдвинуты друг относительно друга на 90 градусов;
- годограф n состоит из двух эллипсов, экстремумы для +n и -n не совпадают, но симметричны относительно θ =90°;
 - годографы Iq и M лежат на одной оси и масштабно совпадают;
- максимальная скорость при пуске соответствует $\theta = 90^{\circ} \pm \alpha$, где α угол, зависящий от конструктивных параметров ВД.

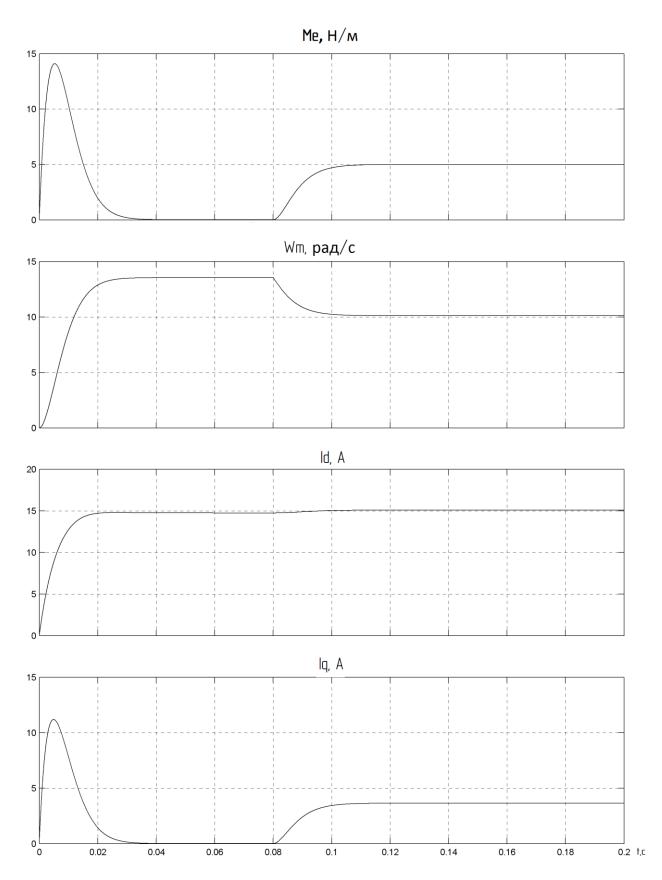


Рис.2.16 переходные процессы для $\,\theta$ =45°

Аналогично можно построить угловую диаграмму ВД при скачке нагрузки ΔM_H (рис. 2.17) данные для которой приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2

θ	0	45	90	135	180	225	270	315	360
ΔΜ	+5	+5	+5	+5	+5	+5	+5	+5	+5
Δn	-2.8	-2.8	-5	-10	-22	-22	-8	-4	-2.8
tpeг.	0.02	0.03	0.06	0.12	0.14	0.12	0.08	0.03	0.02

Анализ угловой диаграммы (рис. 2.17) показывает, что

- время регулирования tper. и статическая ошибка Δn существенно зависят от угла θ ;
 - минимальные значения этих параметров соответствуют значению $\theta \approx 0$.

Система управления (рис. 3.2) содержит контуры регулирования тока I_q , скорости ω , тока I_d , потокосцеплений ψ_d и ψ_q . Расчеты регуляторов этих контуров можно выполнить по известным методикам синтеза систем подчиненного регулирования.

По значениям таб. 1 можно построить угловую диаграмму (рис. 2.18), характеризующую энергоэффективность ВД при пуске.

Для оценки энергоэффективности предлагается использовать коэффициент $K_{\acute{Y}}$, определяемый по выражению

$$K_{\acute{Y}} = \frac{P_M P_{\acute{Y}MAX}}{P_{\acute{Y}} P_{MMAX}},$$

где P_M , P_{MMAX} - механическая мощность ВД при пуске для различных значений угла θ и ее максимальное значение;

 $P_{\acute{Y}}$, $P_{\acute{Y}MAX}$ - электрическая мощность ВД при пуске для различных значений угла θ и ее максимальное значение. Из диаграммы видно, что максимум значения коэффициента $K_{\acute{Y}}$ лежит в секторе $90^{\circ}\pm\alpha$.

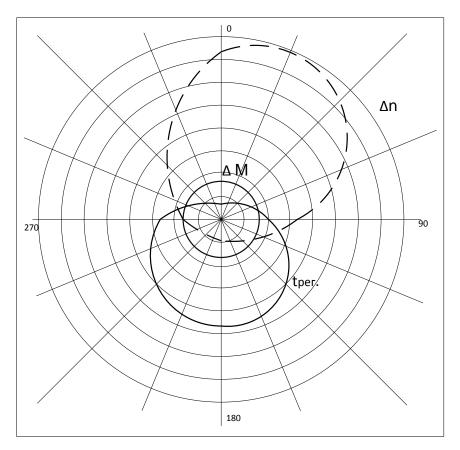


Рис. 2.17. Угловая диаграмма параметров ВД при скачке нагрузки.

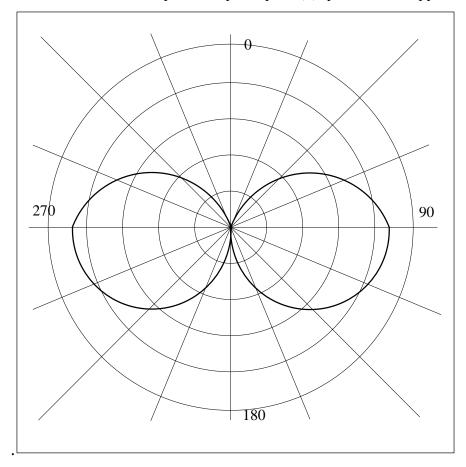


Рис. 2.18. Угловая диаграмма энергоэффективности ВД

В режиме рекуперативного торможения уменьшается скважность импульсов на транзисторах мостовых инверторов силовых цепей. Накопленная кинетическая энергия движения создает в обмотках ВД эдс, которая через мосты обратных диодов прикладывается к автономному источнику электроэнергии (аккумулятору) и происходит возврат энергии. Величина возвращаемой энергии зависит от тока в этом режиме. Его значение в свою очередь связано с жесткостью характеристики ВД на этом этапе работы. Традиционная тяговая характеристика имеет высокую жесткость при больших моментах нагрузки и малую при низких. Если в процессе торможения увеличить жесткость характеристики ВД, то возрастет ток и возвращаемая энергия. Изменение характеристики ВД можно осуществить за счет электронного управления углом установки.

Снижение угловой скорости вентильного двигателя от выше основной до основной путем усиления его магнитного момента происходит за счет возникающего торможения с отдачей энергии (рекуперативного торможения). В силу механической инерции привода угловая скорость его не может мгновенно измениться, и поэтому с ростом магнитного потока возрастает ЭДС двигателя. При динамическом торможении накопленная кинетическая энергия возвращается в источник [71]. Электрическая машина в этом случае переходит в генераторный режим благодаря свойству обратимости. Динамическое торможение широко используется в электротранспорте, что приводит к повышению КПД электропривода.

Рекуперативное торможение можно реализовать следующим образом. Все транзисторы инвертора заперты (напряжение снижено до нуля). Скорость ВД такова, что ЭДС E_d , полученная после выпрямления обратными диодами фазных ЭДС, больше напряжения питания: $E_d > U_n$. Энергия, накопленная во вращающихся массах, возвращается в источник питания (аккумуляторную батарею).

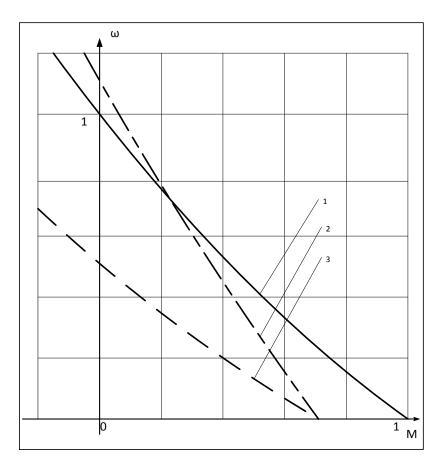


Рис.2.19. Механические характеристики ВД для различных значений угла установки ДПР: 1- угол равен 0° , 2- угол равен - 45° , 3-угол равен 45°

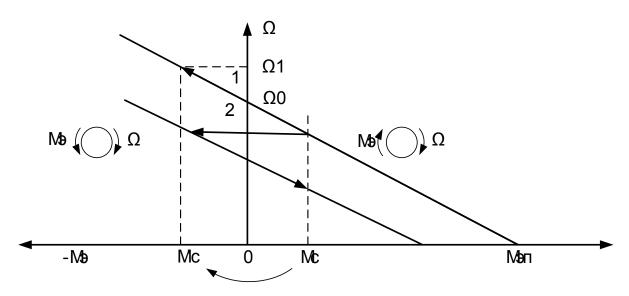


Рис. 2.20. Переход ВД в режим рекуперативного торможения.

Под действием тормозного момента двигателя скорость снижается, вместе с ней снижается $E_{\rm d}$ до уровня $E_{\rm d}{=}U$ и процесс рекуперации энергии остановится.

Выводы по главе 2

В главе обоснованы и синтезированы основные алгоритмы управления ВД, которых достаточно для применения электропривода в автономном электротранспорте. Система управления ВД содержит узел, обеспечивающий согласованное управление токами Id, Iq, двигателя в режиме эффективного динамического торможения. Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

- 1. Управление ВД по углу установки ДПР является эффективным и позволяет оптимизировать режимы работы двигателя;
- 2. В случае создания реверсивного быстродействующего электропривода наиболее приемлемой является нейтральная установка;
- 3. Полученные выражения справедливы для аналоговых ДПР различных типов (вращающийся трансформатор, датчик Холла с линейной характеристикой и т.д.);
- 4. Управление по углу установки имеет более высокое быстродействие, чем по напряжению.

ГЛАВА 3. СИНТЕЗ ЭПВД С НИЗКОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬЮ К ПАРАМЕТРИЧЕСКИМ ИЗМЕНЕНИЯМ.

3.1 Анализ ЭПВД к параметрическим изменениям и электропривода с низкой чувствительностью.

Электроприводы на основе вентильных двигателей (ВД) с возбуждением от постоянных магнитов широко применяются в различных отраслях. Отмечено [23, 61], что они обладают сочетанием свойств, недостижимых для других двигателей – высокими динамическими характеристиками и энергоэффективностью, малыми массой и габаритами, высокой надежностью. Существует большое разнообразие систем управления ВД [54, 55], в то же время появляются новые схемы, имеющие

более высокие функциональные возможности [23]. Рассмотрен синтез системы управления ВД с возможностью электронного управления углом установки датчика положения ротора (ДПР).

Функциональная схема системы управления ВД принимает вид рис. 3.1. Она выполнена на основе автономного инвертора напряжения (АИ). Схема построена по структуре подчиненного регулирования с контурами регулирования токов во вращающейся системе координат d-q и регуляторами этих токов РТq и РТd, контуром проекции d потока Ф с регулятором РФd и контуром скорости с регулятором РС [78, 79].

Контроль тока статора ВД осуществляет датчик-преобразователь тока UT, который измеряет мгновенные значения фазных токов в двух фазах A и В и выдает пропорциональные им сигналы. Здесь же эти сигналы преобразуются в сигналы неподвижной системы координат α-β в соответствии с формулами:

$$U_{T\alpha} = U_{TA} \frac{\sqrt{3}}{2} U_{T\beta} = (U_{TA} + 2U_{TB})/\sqrt{3}$$
 (3.1)

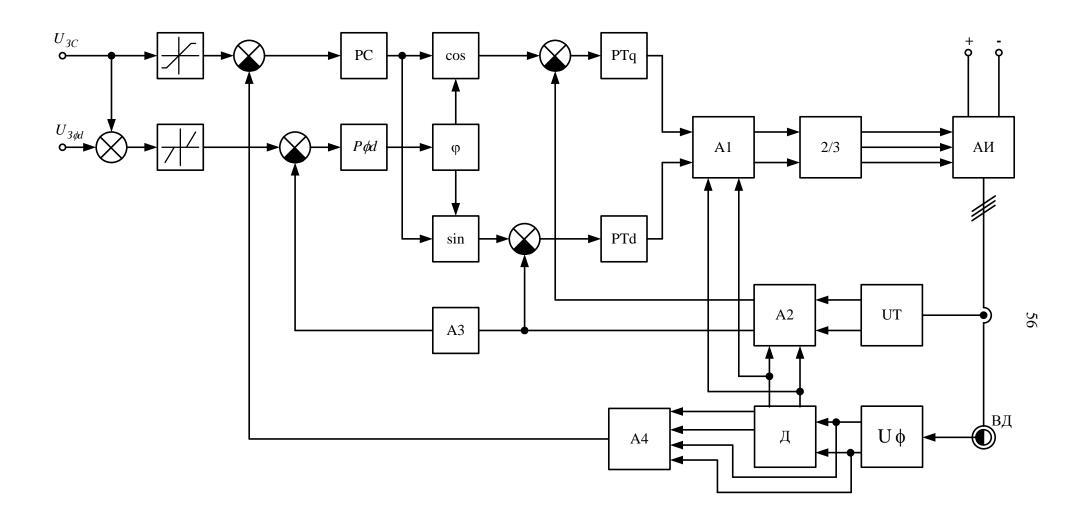


Рис.3.1. Функциональная схема управления ВД.

Датчик потока ϕ_0 построен на основе элементов Холла, который размещается в воздушном зазоре двигателя, и измеряет мгновенные значения проекций ϕ_0 в тех же фазах A и B. Здесь же эти сигналы преобразуются в проекции координат α - β , по формулам, аналогичным (3.1).

Сигналы $U_{\phi\alpha}$ и $U_{\phi\beta}$ поступают в узел Д, где определяется угол ϕ между вектором потока ϕ_0 и неподвижными осями статора α - β , необходимый для перехода к вращающимся координатам d-q. В узле Д определяются сигналы, пропорциональные тригонометрическим функциям

$$\sin \varphi = U_{\phi\beta} / U_{\phi0}
\cos \varphi = U_{\phi\alpha} / U_{\phi0}, \tag{3.2}$$

где
$$U_{\phi 0} = \sqrt{U_{\phi lpha}^2 + U_{\phi eta}^2}$$
 .

Эти сигналы в модуле A1 позволяют преобразовать напряжения $U_{T\alpha}$ и $U_{T\beta}$ в U_{Td} и U_{Tq} по формулам

$$U_{Td} = U_{T\alpha} \cos \varphi + U_{T\beta} \sin \varphi$$

$$U_{Tq} = U_{T\beta} \cos \varphi - U_{T\alpha} \sin \varphi$$
(3.3)

Вычисленные сигналы токов в проекциях d-q поступают в виде обратных связей на соответствующие регуляторы PTq и PTd. Выходы этих регуляторов подключены ко входу модуля A2, где происходит обратное преобразование в неподвижную систему координат по формулам:

$$U'_{T\alpha} = U'_{Td}\cos\varphi - U'_{Tq}\sin\varphi$$

$$U'_{T\beta} = U'_{Td}\sin\varphi + U'_{Tq}\cos\varphi$$
(3.4)

Полученные сигналы управления $U'_{T\alpha}$ и $U'_{T\beta}$ в блоке 2/3 преобразуются из двухфазной системы в трехфазную по известным соотношениям.

Такое построение системы позволяет использовать два канала управления ВД — по скорости и по потоку ϕ_d . При нейтральной установке ДПР U_{Td} =0; $U_{Tg} = U_T \equiv M_{\ddot{a}}.$ На основании функциональной схемы (рис 3.1) была составлена структурная (рис. 3.2). Автономный инвертор напряжения принимается безынерционным. Отмечается [23], что составляющая ϕ_d ослабляет поток, участвующий в создании момента $M_{\ddot{a}}$. Поэтому по аналогии с двигателем постоянного тока это дает возможность двухзонного регулирования ВД.

Силовая цепь инвертора напряжения подключается непосредственно к автономному источнику электроэнергии (аккумулятору). Это позволяет реализовать энергоэффективное управление электроприводом ВД за счет режима рекуперации. Это достаточно просто реализуется при управлении с участием ϕ_d за счет деформации механических характеристик.

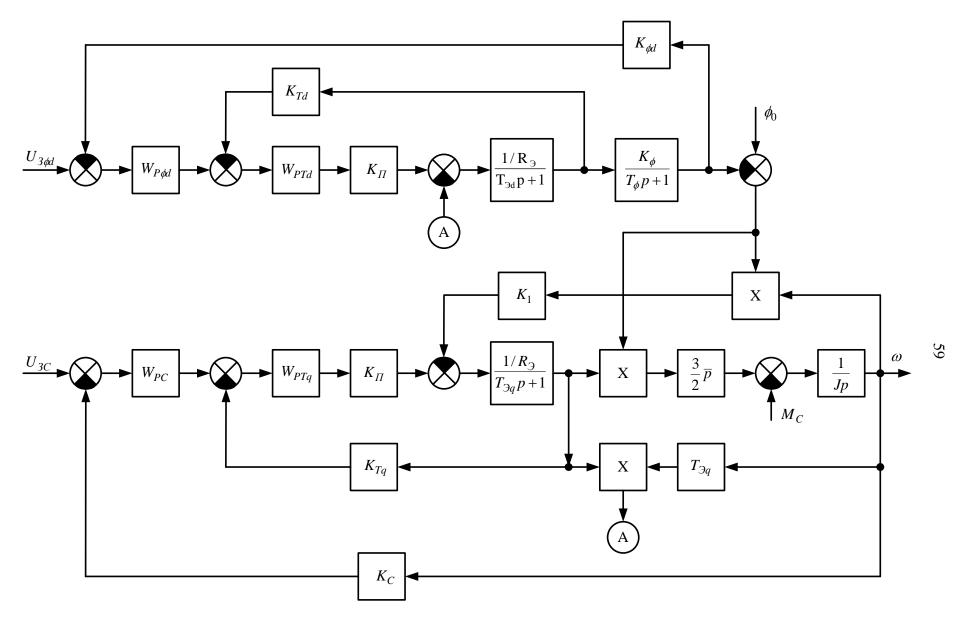


Рис. 3.2. Структурная схема системы управления ВД в осях d-q.

3.2 Динамика ЭПВД при изменении момента инерции объекта

Работа автономных транспортных средств (электрокара и т.д.) характеризуется изменениями момента инерции объекта в широких пределах, поэтому эффективное управление ЭПВД должно учитывать эту особенность. Проведем анализ чувствительности исследуемого ЭПВД, построенного по структуре подчиненного регулирования к параметрическим возмущениям (изменению момента инерции). Предлагается использовать упреждающую коррекцию [11] для снижения чувствительности схемы к изменениям параметров объекта. Структурная схема системы приведена на рис. 3.3.

Синтез регулятора тока выполняется исходя из настройки контура на технический оптимум, при этом передаточная функция замкнутого контура тока принимает вид:

$$W_{KT}(p) \approx \frac{1/K_{OT}}{T_{T}p+1} , \qquad (3.5)$$

где $K_{\text{от}}$ -коэффициент обратной связи по току, $T_{\text{\tiny T}}$ - эквивалентная постоянная времени контура тока.

Для получения требуемой характеристики выполним настройку внешнего контура на технический оптимум:

$$W_{pc} = \frac{T'_{M} K_{or}}{K_{OC} K_{II} R_{2} 2T_{T}} , \qquad (3.6)$$

где T'_{T^-} расчетное фиксированное значение постоянной времени, K_{OC} - коэффициент обратной связи по скорости, $K_{Д}$ — коэффициент передачи двигателя, R_{\Im} — эквивалентное сопротивление двигателя.

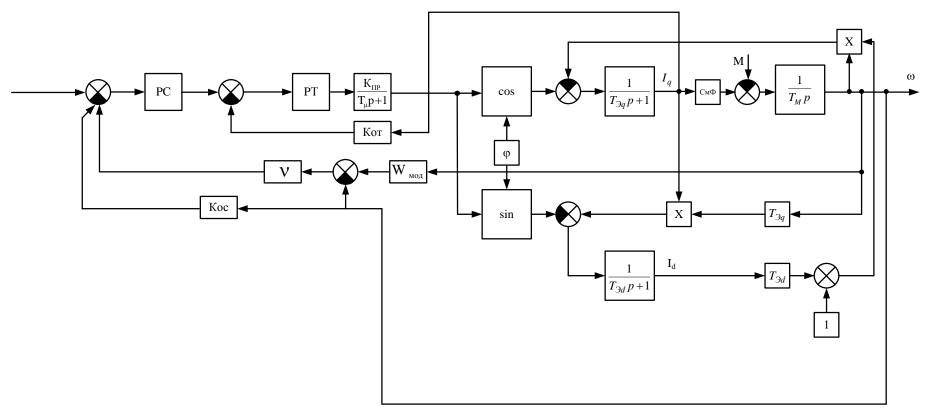


Рис.3.3 Структурная схема системы

Передаточная функция замкнутого контура скорости принимает вид:

$$W_{KC}(p) = \frac{1/K_{C}}{2\alpha T_{T}^{2} p^{2} + 2\alpha T_{T} p + 1}$$
(3.7)

где $\alpha = T_M/T'_M$ — коэффициент характеризующий различие текущего и расчетного значения.

Проведем анализ выражения (3.7) по чувствительности показателя колебательности М коэффициенту α.

Выражение для показателя колебательности следующее:

$$M = \frac{A(\omega_p)}{A(\omega = 0)} , \qquad (3.8)$$

где $A(\omega_p)$ – значение амплитудной характеристики системы на резонансной частоте.

Для системы с настройкой на технический оптимум передаточная функция имеет вид (3.7). Приведем ее к нормированной форме записи [11]

$$W_{3\Pi} = \frac{K}{T^2 p^2 + 2\xi T p + 1},\tag{3.9}$$

где K=1/K_{OC};
$$T = T_T \sqrt{2\alpha}$$
; $\xi = \sqrt{\frac{\alpha}{2}}$.

Амплитудная характеристика для рассматриваемой системы известна:

$$A(\omega) = \frac{K}{\sqrt{(2T\xi\omega)^2 + (1 - T^2\omega^2)^2}}$$
(3.10)

При ω = ω_p эта характеристика принимает экстремальное значение

$$\frac{\partial A(\omega)}{\partial(\omega)} = 0$$

Нахождение условий экстремума функции A(ω) дает результат

$$\omega_p = \sqrt{\frac{1 - 2\xi^2}{T^2}} \tag{3.11}$$

Подставим (3.11) в (3.10) и определим значение $A(\omega_p)$

$$A(\omega_p) = \frac{K}{2\xi\sqrt{1-\xi^2}}$$

Используя выражение (3.10) можно определить показатель колебательности для рассматриваемой системы

$$M = \frac{1}{\sqrt{2\alpha - \alpha^2}} \tag{3.12}$$

Оценим влияние α на значение показателя колебательности:

$$\frac{\partial \mathbf{M}}{\partial \alpha} = -\frac{1 - \alpha}{(2\alpha - \alpha^2)^{2/3}} \tag{3.13}$$

Из выражения (3.13) видно, что значение колебательности М изменяется в широких пределах в зависимости от α . Для устранения этого недостатка используем упреждающую коррекцию. Формирование корректирующего сигнала показано на рис.3.6. Сигнал с датчика тока поступает на звено модели $W_{MOД}(p)$, параметры которого выбираются из условия:

$$W_{MOД}(p)=W_{OБ}(p)_{HOM},$$

Где $W_{OF}(p)_{HOM}$ — передаточная функция объекта в номинальном режиме. Для рассматриваемого случая:

$$W_{\text{MOД}}(p) = \frac{K_{\text{Д}}R_{\text{9}}}{T_{\text{Mpacy}}p}$$
(3.14)

Рассмотрим случай, когда W_{MOJ} выполняется в виде апериодического звена [11]:

$$W_{\text{MOД}}(p) = \frac{K_{\text{Д}}R_{\text{9}}}{T_{\text{Mpacy}}p+1}$$
(3.15)

Сигнал с выхода звена модели (3.15) сравнивается с сигналом обратной связи по скорости. Полученный дифференциальный сигнал с коэффициентом ν поступает на регулятор скорости. Упрощенная передаточная функцию замкнутого контура скорости с упреждающей коррекцией $W_{KCy}(p)$ имеет вид:

$$W_{KCY} = \frac{1/K_{OC}x}{2T_T^2 \frac{\alpha}{x} p^2 + 2T \frac{\alpha}{x} p + 1} ,$$
 (3.16)

где $x=1+v(\alpha-1)$

Для $W_{KCY}(p)$ показатель колебательности определяется формулой:

$$M = \frac{1}{\sqrt{2\frac{\alpha}{x} - \left(\frac{\alpha}{x}\right)^2}} = \frac{1 + \nu(\alpha - 1)}{\sqrt{2\alpha[1 + \nu(\alpha - 1)] - \alpha^2}}$$
(3.17)

Анализ формулы (3.19) позволяет сделать следующие выводы:

- при условии v=0, значение M соответствует системе без упреждающей коррекции;
 - при условии v=1, значение M=1 независимо от значения α ;
 - при условии α =1, значение M=1 независимо от значения ν .

Видно, что применение упреждающей коррекции позволяет устранить влияние изменения момента инерции объекта на динамические свойства системы.

3.3 Изменение уровня заряда аккумулятора

В автономных транспортных средствах заряд аккумулятора изменяется (снижается) от длины пробега, температуры окружающей среды, старения и т.д. Это отражается на динамических свойствах системы электропривода. Снижение заряда эквивалентно изменению параметров контура регулирования тока (рис. 3.6) снижению K_{np} и увеличению R_{3} . Используем и в этом случае для сохранения динамических показателей системы упреждающую коррекцию. Для снижения влияния изменения параметров внутреннего контура в структуре подчиненного регулирования (рис. 3.7) можно использовать более простую реализацию упреждающей коррекции.

Широкое распространение в технике автоматического управления, особенно для построения автоматизированных электроприводов, находит структура с подчиненным регулированием рис. 3.7, обладающая рядом общеизвестных досто-

инств. В то же время известен и ее недостаток, заключающийся в том, что при увеличении числа контуров, неизбежно снижается быстродействие системы.

Реализация упреждающей коррекции в структуре подчиненного регулирования позволяет [11] стабилизировать систему при изменении параметров звеньев в процессе эксплуатации. Причем это достигается практически без снижения запаса устойчивости системы и при использовании лишь физически реализуемых звеньев [77].

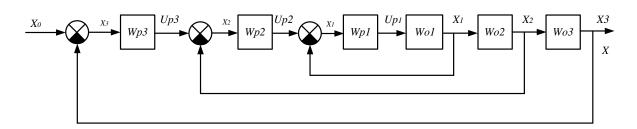


Рис. 3.4 Структура системы подчиненного регулирования в традиционном построении.

Правила применения упреждающей коррекции в структуре подчиненного регулирования вытекают из следующих соображений. Представим, что внутренний контур в структуре рис. 3.4 является звеном, влияние которого на устойчивость второго желательно устранить. Во внутреннем контуре структуры подчиненного регулирования уже имеется результат сравнения в виде сигнала ошибки x_1 = U_{p2} - X_1 , то для реализации упреждающей коррекции необходимо пропустить сигнал x_1 через модель звена W_{02} . Далее, чтобы скомпенсировать влияние второго контура на устойчивость третьего, необходимо сигнал ошибки x_2 пропустить через модель звена W_{03} и подать в виде сигнала отрицательной обратной связи на вход регулятора W_{p3} . На рисунке 3.5 приведена структурная схема системы подчиненного регулирования с упреждающей коррекцией, в которой динамические свойства внутреннего контура обеспечены за счет последовательного корректирующего устройства.

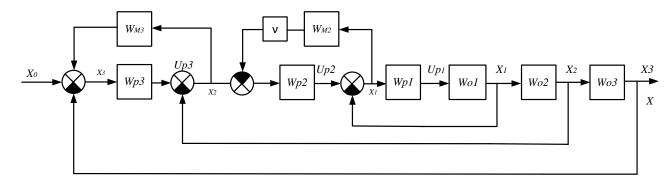


Рис. 3.5 Структура системы подчиненного регулирования с упреждающей коррекцией

Оценим динамические показатели структуры рис. 3.5 по управляющему воздействию. Исключая перекрестные связи после несложных преобразований, найдем передаточные функции замкнутых контуров:

$$W_{31}(p) = \frac{W_{p1}W_{p2}W_{01}W_{02}}{1 + W_{p1}W_{01} + W_{p2}W_{M2} + W_{p1}W_{p2}W_{01}W_{02}}$$
(3.18)

Для рассматриваемой схемы имеем:

$$\begin{split} W_{P1}(p) &= \frac{R'_{3} (T'_{3} p + 1)}{2 T_{\mu} p K_{\Pi P}} \\ W_{P2}(p) &= \frac{T_{M} K_{or}}{2 T_{\mu} p K_{\Pi P}} \\ W_{01}(p) &= \frac{K_{\Pi P}}{T_{\mu} p + 1} \times \frac{1/R_{9}}{T_{9} p + 1} \\ W_{02}(p) &= \frac{K_{\Lambda} R_{9}}{T_{M} p} \\ W_{M2}(p) &= \frac{K_{\Lambda} R_{9}}{T_{M} p + 1} \end{split} , \tag{3.19}$$

где R'_{\ni} и T'_{\ni} настроечные значения величин для выбора параметров регулятора.

На основе уравнений (3.19) и (3.18) можно получить передаточные функции с учетом изменений R_{\ni} и T_{\ni} для структуры с узлом упреждающей коррекции $W_{\text{СУК}}(p)$

$$W_{C\Pi P}(p) = \frac{y}{2T_T^2 p^2 + 2T_T p x y + y}$$
 (3.20)

$$W_{CYK}(p) = \frac{y}{2T_T^2 p^2 + 2T_T p[(1 - xy)v + xy] + y}$$
(3.21)

$$\Gamma_{\text{Де}}, \quad x = \frac{R'_{\ni}}{R_{\ni}}; \qquad y = \frac{T'_{\ni} p + 1}{T_{\ni} p + 1};$$

Оценим чувствительность передаточных функций (3.20) и (3.21) к изменениям x и y:

$$\frac{dW_{C\Pi P}(p)}{dx} = \frac{-2T_{T}y^{2}p}{\left[2T_{T}^{2}p^{2} + 2T_{T}pxy + y\right]^{2}}$$
(3.22)

$$\frac{dW_{CIIP}(p)}{dy} = \frac{2T^2p^2}{\left[2T_T^2p^2 + 2T_Tpxy + y\right]^2}$$
(3.23)

$$\frac{dW_{CYK}(p)}{dx} = \frac{-2T_T y^2 p(1-v)}{\left\{2T_T^2 p^2 + 2T_T p[(1-xy)v + xy] + y\right\}^2}$$
(3.24)

$$\frac{dW_{CYK}(p)}{dy} = \frac{2Tp(Tp+v)}{\left\{2T_T^2p^2 + 2T_Tp[(1-xy)v + xy] + y\right\}^2}$$
(3.25)

Анализ выражений (3.22-3.24) показывает, что в системе подчиненного регулирования

- изменение значений x или y приводит к изменению передаточной функции $W_{\text{CIIP}}(p);$
 - влияние х и у проявляется на изменении динамических свойств системы;
 В системе с упреждающей коррекции:
- возможно полностью скомпенсировать влияния изменения x при условии v=1;
- изменяя значение величины компенсирующего сигнала v возможно снизить суммарное влияние x и y на изменение динамических свойств системы.

В результате проведенных исследований можно сделать следующие выволы:

 применение упреждающей коррекции позволяет снизить или полностью компенсировать влияния параметрических изменений электропривода на динамические показатели системы;

- возможно полностью скомпенсировать изменение момента инерции;
- изменение $R_{\mathfrak{I}}$ ($T_{\mathfrak{I}}$) компенсируется частично, полная компенсация существенно дополняет схему.

Рассмотрим компьютерное моделирование структурной схемы рис. 3.5. Модель системы подчиненного регулирования с упреждающей коррекцией показана на рисунке 3.6.

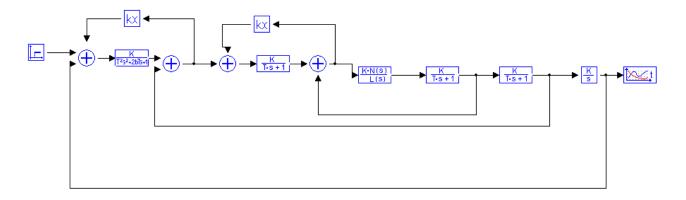
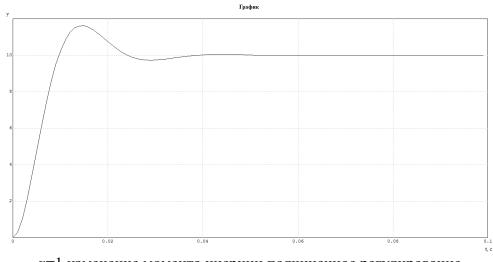
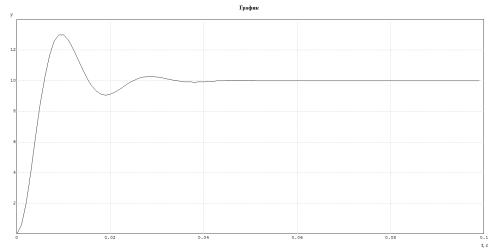


Рис. 3.6 Модель системы подчиненного регулирования с упреждающей коррекцией.

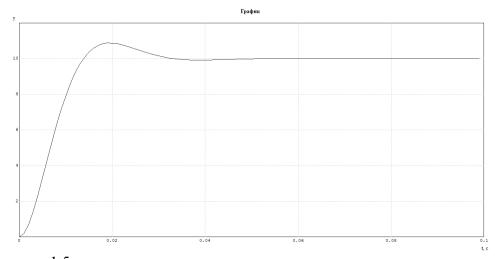
На рис. 3.7 показаны три переходных процесса при различных значениях α . Анализ данных переходных процессов показывает, что при подчиненном регулировании изменение момента инерции отрицательно влияет на амплитуду переходного процесса. Чем больше α , тем меньше амплитуда переходного процесса, а время переходного процесса уменьшается. При α =1.5 практически отсутствует перерегулирование.



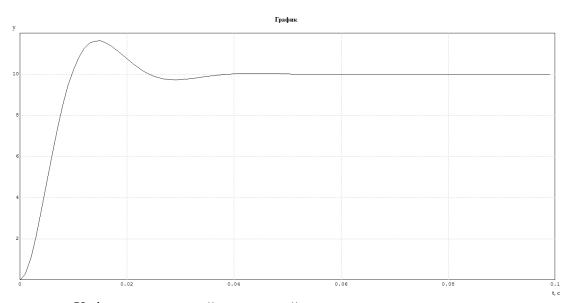
α=1 изменение момента инерции подчиненное регулирование



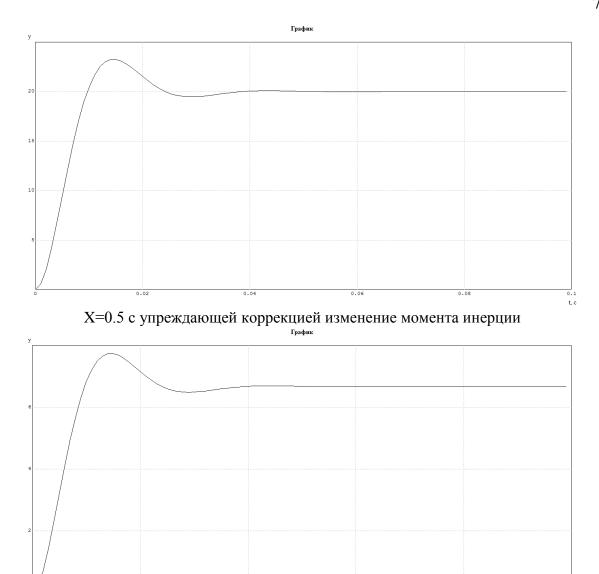
 α =0.5 изменение момента инерции подчиненное регулирование



 α =1.5 изменение момента инерции подчиненное регулирование Рис.3.7 Изменение момента инерции при различных значениях α .



X=1 с упреждающей коррекцией изменение момента инерции



X=1.5 с упреждающей коррекцией изменение момента инерции Рис.3.8 Изменение момента инерции при различных значениях X.

На рис.3.8 показаны три переходных процесса при различных значениях X. Анализ переходных процессов показывает, что применение упреждающей коррекции положительно влияет на систему в целом. Время переходного процесса уменьшается, амплитуда переходного процесса уменьшается, перерегулирование практически отсутствует.

3.4 Схемотехническая реализация и энергосберегающие режимы ЭПВД

На автономных объектах (автомобили, суда, самолеты) используются электроприводы различного применения. Весьма часто в качестве первичного источника электроэнергии выступает аккумулятор. В этом случае вопросы энергоэффективности системы источник-потребитель являются актуальными. Одним из энергосберегающих режимов работы является рекуперативное торможение ЭП. Он возможен, если в силовой цепи между аккумулятором и двигателем отсутствуют однонаправленные цепи [72, 76].

Рассмотрим режимы работы тягового электропривода автономного объекта с точки зрения его максимальной энергоэффективности. Во время работы происходит потребление электроэнергии, которую можно разделить на две составляющие:

- энергия потерь (нагрев частей электрооборудования),
- кинетическая энергия движения.

Первая составляющая расходуется необратимо. Возможности ее снижения известны: повышение КПД двигателя, кинематической передачи и силового преобразователя.

Путями достижения этих целей являются: использование высокомоментных двигателей с возбуждением от постоянных магнитов, минимизация числа звеньев кинематической цепи, применение силовых ключей с низким падением напряжения (MOSFET).

Рассмотрим схему, содержащую вентильный двигатель, который при определенных допущениях в генераторном режиме можно представить следующей схемой, приведенной на рис. 3.9.

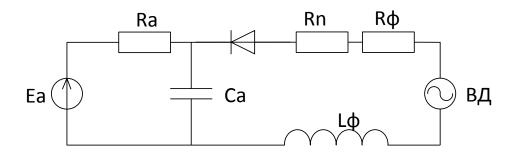


Рис. 3.9 Схема замещения

На основании схемы рис.3.9 и исходя из уравнений [72], описывающих работу аккумулятора, преобразователя и двигателя, можно составить структурную схему автономного электропривода рис. 3.11. Аккумулятор имеет внутреннюю емкость (Са) и сопротивление (Ra). При подключении нагрузки напряжение на аккумуляторе определяется уравнением:

$$Ua\kappa(p) = \frac{Ka}{Tap+1} \times Ea\kappa(p)$$
 (3.26)

где Ка, Та коэффициент и постоянная времени аккумулятора.

Силовой преобразователь может быть представлен апериодическим звеном $\text{Wnp}(p) = \frac{K\pi}{T\pi P + 1}, \text{где } K\pi \text{ и } T\pi - \text{коэффициент и постоянная времени преобразователя. Уравнения разряда и заряда содержат ЭДС поляризации En: }$

$$Up = Ea - En - Ir_0t$$

$$U3 = Ea + En + Ir_0t$$
(3.27)

где Up, Uз напряжения разряда и заряда t- время процесса

В процессе работы напряжение аккумулятора может изменяться, для учета этого используется множительное звено. Ток, протекающий по двигателю, приводит к разряду аккумулятора. На структуре это реализуется с помощью диода D1 и интегрирующего звена K_1/p .

В режиме торможения снижается Uя. Запасенная кинетическая энергия поддерживает уровень Ея, что в итоге приводит к изменению тока Ія.

Присутствуют звенья, позволяющие учесть напряжение поляризации аккумулятора и цепь рекуперации. В процессе моделирования задавались циклы разгона-торможения, графики процессов приведены на рис. 3.10.

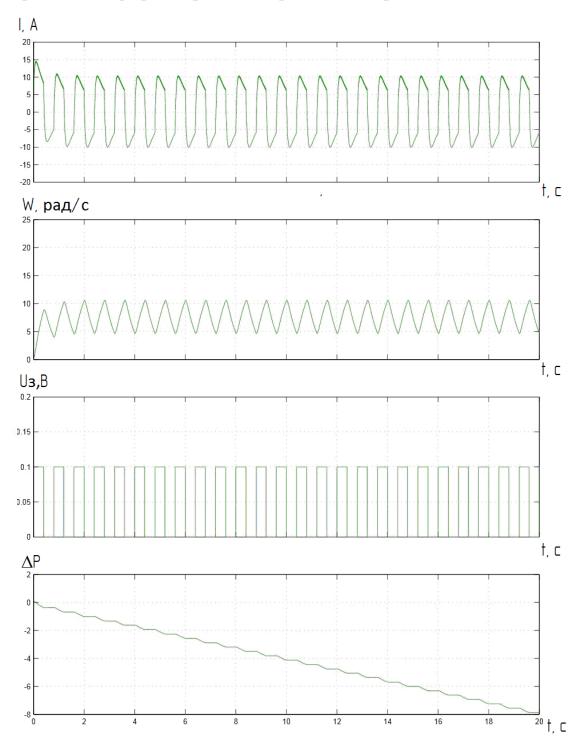


Рис.3.10 Циклы разгона и торможения:

1-
$$I=f(t)$$
; 2 - $\omega = f(t)$; 3 - $U_3 = f(t)$; 4 - $\Delta P = f(t)$

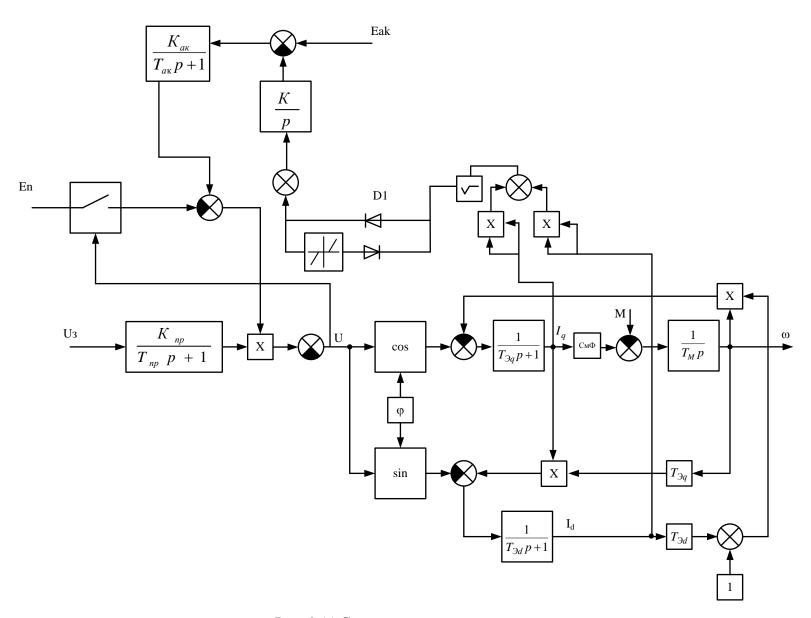


Рис. 3.11 Структурная схема электропривода

Контролировался уровень напряжения аккумулятора для различных значений. Увеличение этих координат позволяет снизить потери в рассматриваемом режиме работы что показано на рис. 3.12.

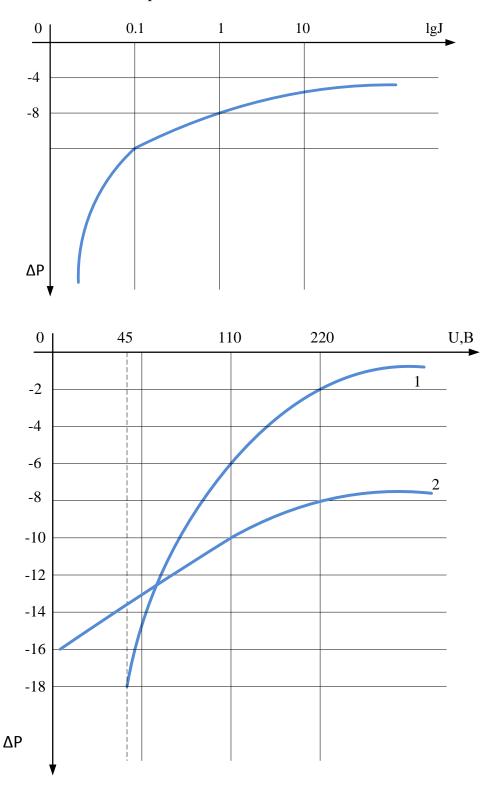


Рис. 3.12 Зависимость потерь электроэнергии ΔP от напряжения возбуждения Uв и момента инерции J 1- с нагрузкой, 2 — без нагрузки.

Типичной для тягового режима является вентиляторная нагрузка. В то же время двигатель внутреннего сгорания (ДВС) при управлении педалью газа представляет собой систему регулирования момента (тяги). Это позволяет обеспечить движение без ударных нагрузок. Подобную мягкую характеристику электропривода можно обеспечить с помощью обратной связи по току. Но такая характеристика не обеспечит эффективной рекуперации при снижении скорости или торможении. Для достижения токов торможения характеристика должна быть жесткой.

Для совмещения этих требований механическая характеристика электропривода должна иметь жесткую характеристику при M<Mc и мягкую при M>Mc рис. 3.13.

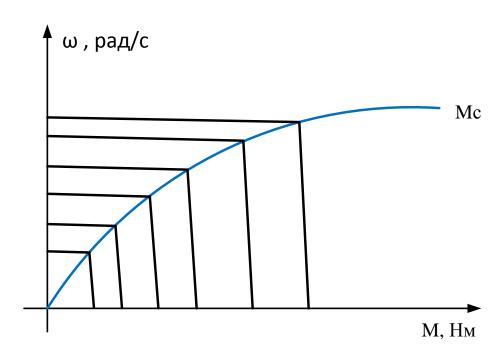


Рис. 3.13 Желаемые механические характеристики

Такая характеристика позволит обеспечить плавный разгон и эффективное (рекуперативное) торможение. Узел зависимого токоограничения для этого электропривода реализован на цифровой преобразовательной технике и приведен на рис. 3.14.

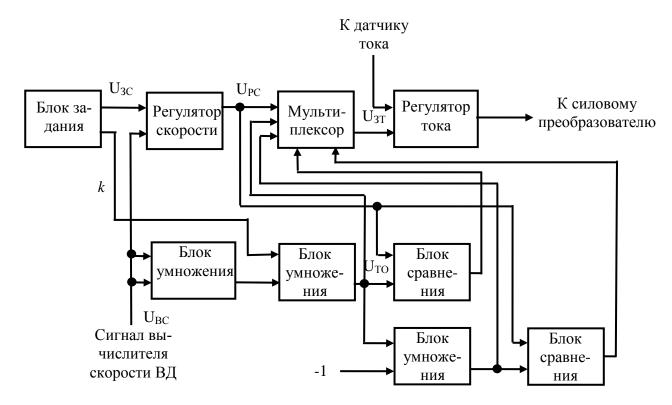


Рис. 3.14 Узел зависимого токоограничения

Схема зависимого токоограничения работает следующим образом. С помощью блоков умножения 1 и 2 формируются значения сигнала зависимого токоограничения:

$$U_{TO} = K \cdot U_{RC}^2$$

Если $U_{PC}>U_{TO}$ (разгон), то мультиплексор по сигналу блока сравнения 1 обеспечивает U_{3T} =const.

Если $U_{PC} \!\!=\!\! U_{TO}$ (движение с постоянной скоростью), то обеспечивается условие $U_{3T} \!\!=\!\! K U_{BC}^2$.

Если $U_{PC} \!\!<\! U_{TO}$ (торможение), блок сравнения 2 и блок умножения 3 обеспечивают $U_{3T} \!\!=\! - K U_{BC}^2$.

Таким образом обеспечивается режим работы электропривода с зависимым токоограничением.

При построении ЭП по структуре подчиненного регулирования токоограничение реализуется на регуляторе скорости. Для вентиляторной нагрузки известно соотношение:

$$Mc = k\omega^2, (3.38)$$

В соответствии (3.38) должен изменяться уровень токоограничения, это обеспечивается применением звена умножения.

3.5 Управление и диагностика вентильного двигателя

Рассмотрим управление ВД в составе автономного электропривода. Особенностью рассматриваемой системы является многофункциональное использование датчика положения ротора (ДПР), в частности для косвенного измерения электромагнитного момента и частоты вращения, а также в качестве обратной связи по положению ротора [75].

На рис. 3.15 приведена функциональная схема рассматриваемой системы электропривода.

Двигатель управляется от трех реверсивных усилителей постоянного тока Y_1 , Y_2 и Y_3 , нагрузкой которых являются якорные обмотки ОЯ1, ОЯ2 и ОЯ3. В качестве ДПР используется индукционный 3-х фазный редуктосин, на выходных обмотках которого формируются промодулированные углом поворота α синуснокосинусные напряжения Е1, Е2 и Е3, имеющие несущую частоту ω_0 . С помощью множительных звеньев М1, М2 и М3 формируются напряжения U1, U2 и U3 являющиеся огибающими напряжений Е1, Е2 и Е3:

$$U_{1} = U_{MT} \sin \alpha(t);$$

$$U_{2} = U_{MT} \sin(\alpha + 120^{\circ})(t);$$

$$U_{3} = U_{MT} \sin(\alpha - 120^{\circ})(t);$$
(3.29)

где U_{MT} — амплитудное значение напряжения множительного звена.

Напряжения U1, U2 и U3 в свою очередь модулируются сигналом управления $U_{\rm y}$, определяющим задание скорости двигателя. Использование множительных звеньев M1-M3 и ДПР со свойствами синусно-косинусного вращающегося трансформатора позволяет при любом задании скорости формировать круговое вращающееся поле якоря при условии, что усилители ${\rm y_1,y_2}$ и ${\rm y_3}$ без искажений повторяют форму выходных напряжений множительных звеньев M4-M6. Приня-

тый способ задания скорости в отличие от изменения ее путем описанного в [61] способа регулирования напряжения возбуждения редуктосина позволяет обходиться без специального канала реверса, так как при изменении знака U_{y} изменяется и порядок следования фаз якоря двигателя. Кроме этого, принятый способ дает возможность использования ДПР и в качестве датчика положения рабочего органа, так как его метрологические характеристики при $U_{B} = const$ сохраняются.

Так как непосредственное измерение электромагнитного момента и частоты вращения тихоходного ВД затруднено, в электроприводе по схеме рис. 3.12 реализованы датчики с косвенными измерениями упомянутых величин [75].

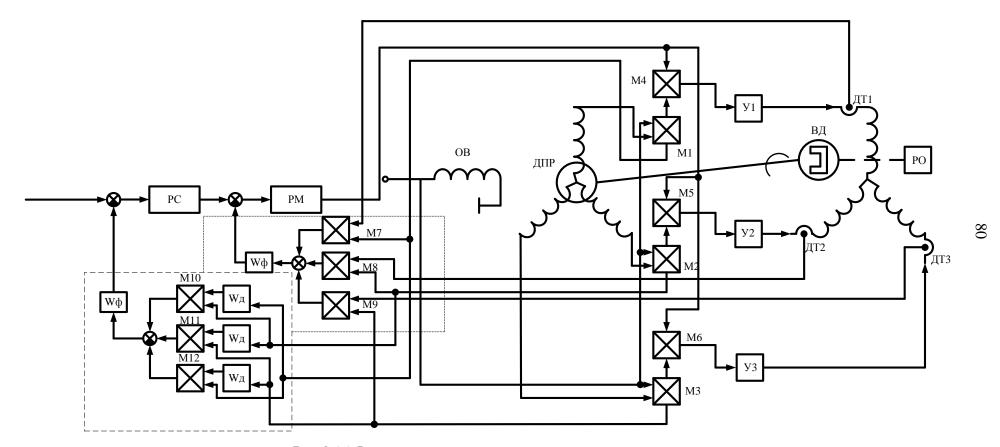


Рис.3.15 Функциональная схема рассматриваемой системы.

Датчик момента ДМ состоит из множительных звеньев М7-М9, сумматора и фильтра W_{Φ} . Напряжения U_{i1} - U_{i3} с датчиков фазных токов ${\rm ДT_1}$ - ${\rm ДT_3}$ определяются выражениями:

$$U_{i1} = c_{i}I_{MR}\cos\alpha(t);$$

$$U_{i2} = c_{i}I_{MR}\cos(\alpha - 120^{\circ})(t),$$

$$U_{i3} = c_{i}I_{MR}\cos(\alpha + 120^{\circ})(t)$$
(3.30)

где c_i – масштабный коэффициент;

 I_{MS} – амплитудное значение тока фазы двигателя.

Момент, развиваемый двигателем ($M_{\mathcal{A}}$) и поток (Φ_B) определяются выражениями:

$$M_{II} = c_M \Phi_B I_{MH}$$
; $\Phi_B = U_{MT} = const$,

где c_M – моментный коэффициент двигателя.

Напряжение на выходе датчика момента ($U_{D\!\!\!/M}$) формируется следующим образом:

$$U_{\mathcal{J}M} = W_{\Phi}(U_{i1}U_{1} + U_{i2}U_{2} + U_{i3}U_{3}) =$$

$$= c_{i}W_{\Phi} \left[U_{MT}I_{MR}\cos^{2}\alpha(t) + U_{MT}I_{MR}\cos^{2}(\alpha - 120^{\circ})(t) + U_{MT}I_{MR}\cos^{2}(\alpha + 120^{\circ})(t) \right] =$$

$$= c_{i}W_{\Phi}U_{MT}I_{MR} = K_{\mathcal{J}M}W_{\Phi}M_{\mathcal{J}};$$
(3.31)

где $K_{\it TM}$ — коэффициент датчика момента.

Наличие датчика положения ротора в электроприводах с вентильными двигателями позволяет организовать обратную связь по положению рабочего органа (РО) и реализовать следящие системы, точность которых будет определяться точностью применяемых ДПР[60].

При разработке устройства диагностирования блока (соединения блоков, замкнутого контура) приняты следующие положения:

—Напряжение на выходе блока может изменяться по произвольному закону и принимать любые значения в диапазоне $U_{\min} \leq U \leq U_{\max}$

- -Устройство должно обеспечивать контроль в «статике», т.е. при частоте входного сигнала существенно меньшей полосы пропускания контролируемого блока.
- —Устройство должно правильно функционировать в «динамике», т.е. при частоте входного сигнала равной или больше полосы пропускания контролируемого блока.
 - –Диапазон измеряемого сигнала должен быть Д>50
 - –Частотный диапазон входных сигналов должен быть не менее Дω ≥ 1000
- Форма выходных сигналов может быть синусоидой, однополярным меандром или двухполярным меандром.
- —Устройство должно обеспечивать контроль работоспособности нелинейного блока (замкнутый контур). В контуре скорости необходимо учесть две существенные нелинейности: «насыщение» и «сухое трение»

Функциональная схема устройства приведена на рис.3.16

где $M_{_{9H}}$ - блок модели;

БМ - блок вычисления модуля;

 $\sqrt{}$ - блок вычисления квадратного корня;

÷ - блок деления:

СУ - устройство сравнения;

 Φ - фильтр;

Y - усилитель;

K - компаратор;

 K_{π} - ключ;

 $\Phi \Pi V$ - формирователь длительности импульса;

УОР - устройство определения режима работы;

И.ИЛИ - блоки, выполняющие логические операции;

*ЛУ*1, *ЛУ*2 - логические устройства, объединяющие несколько простых функциональных блоков.

Устройство состоит из двух каналов: канала измерения и канала блокирования.

В канал измерения входят блоки: эталонной модели, вычисления модуля, масштабные усилители, блоки извлечения корня, делитель, устройство сравнения, фильтр, усилитель с регулируемым коэффициентом усиления, компаратор.

В канал блокирования входят идентичные логические устройства ЛУ1, ЛУ2, элемент «ИЛИ» и ключ Кл.

Устройство работает следующим образом. Входной сигнал электропривода $U_{\rm BX}$ (блока) через $M_{\rm BH}$ и выходной сигнал электропривода $U_{\rm BH}$ (блока) непосредственно поступают на блок вычисления модуля и через масштабных усилителей, а также через блоки извлечения корня подаются на входы делителя. На выходе образуется напряжение $U_{\pi}=10(U_{\rm BH}/U_{\rm M})0.5B$. При соотношении $U_{\rm BH}/U_{\rm M}=0.5$ напряжение $U_{\pi}=10/\sqrt{2}B=const$. При отсутствии неисправности или отклонения от заданных значений напряжение на выходе устройства сравнения близко к нулю. При наличии неисправностей в схеме напряжение на выходе делителя измениться, в результате чего напряжение на выходе фильтра $U_{\phi}\neq 0$. При достижении уставки срабатывания на выходе компаратора К образуется напряжение положительной полярности, что свидетельствует о неисправности в электроприводе (блоке).

Особенностью схемы является достаточно большой диапазон изменения входных сигналов, что достигается введением блоков извлечения корня.

Однако при достаточно малых сигналах в статике и при прохождении сигналов через нуль в динамике погрешности делителя резко возрастают. Если не предпринимать каких-либо дополнительных мероприятий, то устройство будет диагностировать неисправности при их отсутствии, т.е. появятся ложные срабатывания.

Для исключения ложных срабатываний в устройство введен второй, дополнительный канал – канал блокирования.

Для исключения ложного срабатывания в «статике» введены сравнивающее устройство и компаратор.

Для исключения ложного срабатывания в «динамике» введен формирователь длительности импульса ФДИ, на выходе которого образуется импульс фиксированной длительности при каждом положительном фронте напряжения на выходе компаратора.

С целью расширения диапазона измеряемых сигналов в «динамике введены дополнительно: устройство сравнения, компаратор, устройство определения режима работы УОР и элемент «И». Дополнительное устройство вырабатывает запрещающий сигнал при торможении, если напряжение на выходе блока (или модели) ниже уставки, определяемой напряжением.

Все запрещающие сигналы через элемент «ИЛИ» поступают на управляющий вход ключа Кл, который шунтирует выход фильтра Φ и исключает ложные срабатывания устройства.

Следует отметить, что при невысоких требованиях к диапазону контролируемых сигналов и быстродействию устройство определения режима работы, устройство сравнения, компаратор и элемент «И» могут быть исключены из схемы диагностирования.

Блок модели (рис. 3.16) выполнен на основе операционных усилителей. Синтез модели скоростного контура проводился по результатам проведенных исследований.

В линейном представлении, без учета инерционности обратной связи, передаточная функция блока модели имеет вид при настройке на технический оптимум:

$$W_{M}(p) = \frac{1}{2T_{M}^{2} p^{2} + 2T_{M} p + 1}$$
(3.32)

с учетом фильтра в обратной связи:

$$W_{M} = \frac{1}{2T_{M} p(T_{M} p + 1) + W_{\phi}(p)},$$
(3.33)

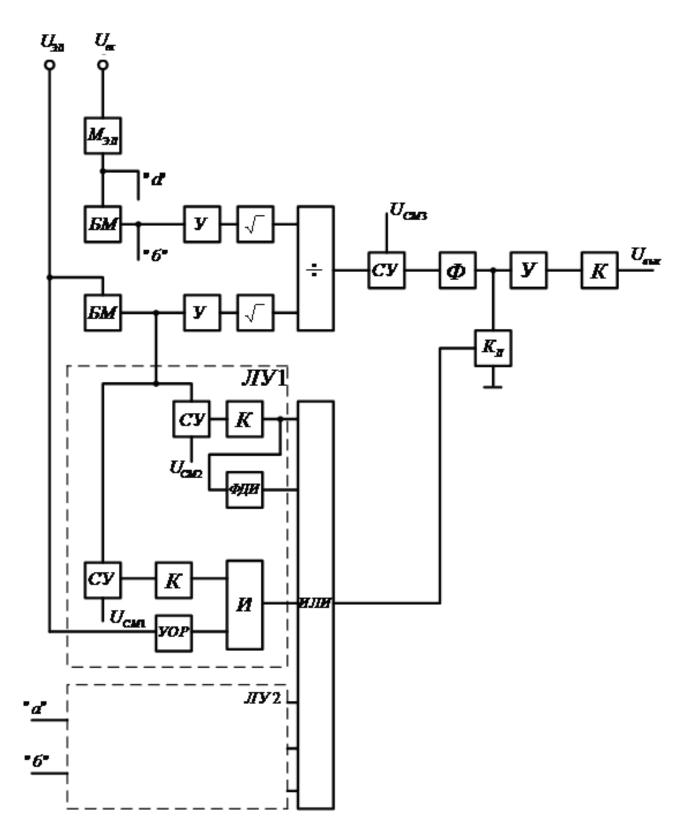


Рис.3.16 Функциональная схема устройства.

где
$$W_{\phi}(p) \approx \frac{1}{2T_6^2 p^2 + 2T_6 p + 1}$$
 (3.34)

В обратной связи модели включен такой же фильтр, как и в обратной связи скоростного контура.

Устройство диагностирования испытывалось при функционировании его с отдельным блоком (и моделью блока), а также при диагностировании скоростного контура (и модели контура) следящей системы.

При испытании использовались тестовые сигналы, ступенчатый однополярный, ступенчатый двухполярный, синусоидальный. При испытаниях скоростного контура изменялось относительное значение коэффициента усиления в пределах $\kappa^* = \kappa/\kappa = 0.5 \div 1 \div 2$. Исходной настройкой является такая, при которой устройство не фиксирует ошибки при правильно настроенной модели и относительном коэффициенте усиления $\kappa^* = 1$.

Следует отметить, что при использовании рассматриваемого устройства для диагностирования нескольких различных блоков необходимо использовать в каждом случае различные эталонные модели блока (или участков функциональных схем).

На рисунке 3.17 показан используемый в электроприводе экспериментальный двигатель:

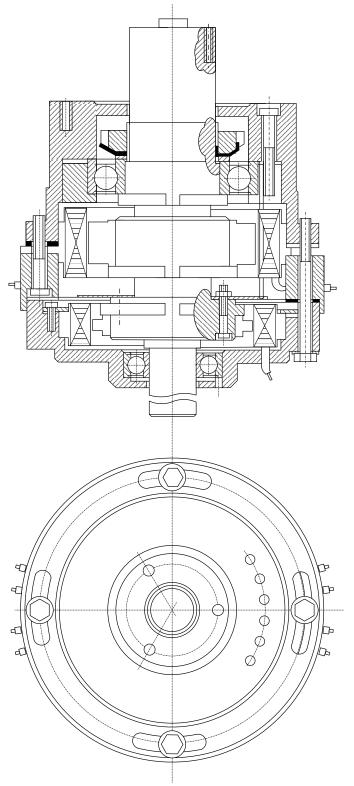


Рис. 3.17 Вентильный двигатель

Особенностью конструкции является поворотная обойма, в которой закреплен ДПР. Она механически позволяет менять угол подстройки и исследовать электропривод ВД при различных значениях угла установки ДПР.

Выводы по главе 3

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

- 1. Разработанные вычислители координат позволяют создавать электроприводы с высокими техническими показателями;
- 2. Датчик положения ротора с 2-х или 3-х фазными синусоидальными выходными сигналами может быть использован в работе вычислителей координат электропривода и формировании обратной связи по положению;
- 3. Для повышения эксплуатационных свойств современных электроприводов необходимо использовать текущую диагностику их функционирования;
- 4. Разработанный узел диагностики позволяет эффективно контролировать работу электропривода в статическом и динамическом режимах.

На основе проведенного математического моделирования и исследования переходных процессов можно повысить энергоэффективность автономных электромеханических систем. Обеспечить режим рекуперативного торможения, тем самым продлить время работы аккумулятора автономного транспортного средства без подзарядки [67, 70].

ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

4.1 Описание экспериментальной установки

Для исследования электропривода на основе вентильного двигателя была создана экспериментальная установка, в состав которой вошли:

- вентильный двигатель фирмы Golden AGE
- силовой модуль фирмы IR
- нагрузочная машина постоянного тока
- элементы контроля и управления

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 4.1.

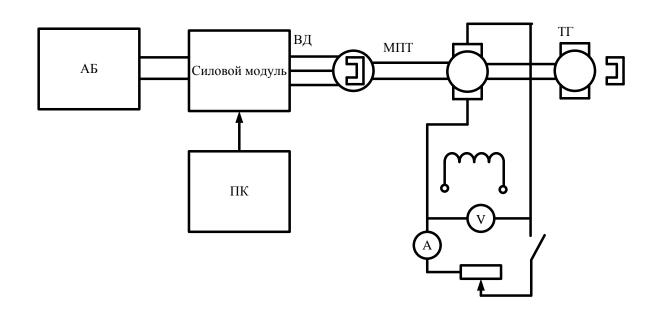


Рис. 4.1 Схема экспериментальной установки

Вентильный двигатель фирмы Golden AGE мощностью 1000 Вт максимальная скорость вращения 2500 об/мин, номинальный ток 2,1A.

Силовой модуль IRAMS10UP60B — это комплексный силовой модуль, разработанный и оптимизированным для аппаратного управления двигателем. Внутренний шунтирующий резистор обеспечивает легкую обратную связь по току через цепь единичного шунта для восстановления тока, содержащуюся в IRMCF34. Встроенная токовая защита и БТИЗ (биполярные транзисторы с изолированным затвором), рассчитанные на короткое замыкание, наряду с защитой от снижения напряжения и встроенным датчиком температур, обеспечивают высокий уровень защиты и безотказную работу устройства. Внесение ограничительных диодов на стороне высокого напряжения драйвера и питание одной полярности, необходимое для управления внутренними схемами, упрощает использование модуля и влечет за собой дальнейшие преимущества, связанные со снижением затрат.

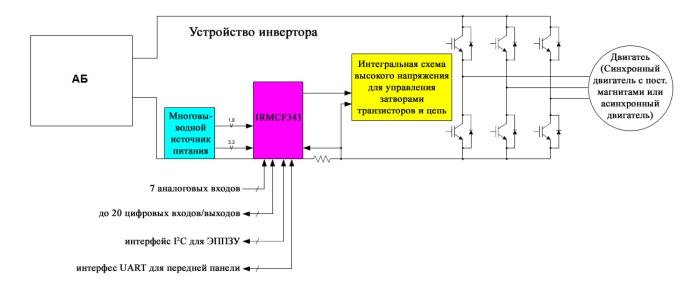


Рис. 4.2. Типичная функциональная схема, использующая IRMCF341

Преобразователь IRMCS3041 это опорная платформа для разработки приложений управления питаемыми от инвертора двигателями, основанная на чипсете iMOTION. Она содержит интегральную схему цифрового контроля движения IRMCF341 и комплексный силовой модуль IRAMS10UP60B.

IRMCF341 это устройство основанное на интегральной схеме и разработанное, прежде всего как одночиповое решение для осуществления бездатчикового контроля электродвигателя с постоянными магнитами при различных его применениях. В отличие от традиционного микроконтроллера или цифрового сигнального процессора, IRMCF341 обеспечивает встроенный замкнутый алгоритм бездатчикового контроля, использующий уникальное средство контроля за движением (МСЕТМ) для электродвигателей с поверхностными или внутренними постоянными магнитами и синусоидальной обратной ЭДС. IRMCF341 также использует уникальную цепь единичного шунта для восстановления тока. Это позволяет не использовать дополнительную аналогово-цифровую схему и дает возможность использовать интерфейс прямого шунта резистора применительно к интегральной схеме. МСЕТМ состоит из набора элементов контроля, периферийных устройств обеспечения движения, специального синтезатора контроля движения и двухканального ОЗУ (оперативной памяти) для отображения сигналов внутренних узлов. Программирование контроля движения достигается за счет использования специального графического компилятора, встроенного разработки среду

МАТLAB/SimulinkTM. Установление последовательности действий, пользовательский интерфейс, связь с ведущим узлом, и задачи контроля более высокого уровня могут быть осуществлены в быстродействующем 8-битном микроконтроллере 8051. Микроконтроллер 8051 снабжен портом JTAG для облегчения использования устройств эмуляции и отладки. На рис. 4.2 показана типичная прикладная схема, использующая IRMCF341.

IRMCF341 содержит программируемое ОЗУ на 24 Кбайт, которое может быть загружено от внешнего ЭППЗУ (электрически программируемого постоянно-запоминающего устройства) для выполнения программы микроконтроллером 8051. Преобразователь IRMCF341 предназначен для целей разработки и отладки. Для производства в больших объемах, программируемое ОЗУ заменяется на ПЗУ объемом 24 Кбайт с масочным программированием. И исследовательская версия, и версия с масочной ПЗУ выпускаются в 64-выводном корпусе типа QFP с идентичной конфигурацией выводов, чтобы облегчить трассировку и переход к массовому производству.

Контроллер IRMCF341 требует питания напряжениями 3.3 В и 1.8 В. На выводе VDD1 – сигнал уровнем 3.3 В. Он используется для ввода/вывода данных. IRMCF341 не требует внешней RC цепи для перезагрузки. Чтобы установить в исходное состояние отладчик JTAG, можно использовать кнопку перезагрузки.

Данная платформа позволяет исследовать вентильный электропривод посредством управления им через ПК, также можно задать программу и ВД будет работать автономно по заданной программе в автоматическом режиме. Программное обеспечение позволяет снимать различные характеристики ВД, контролировать ток, напряжение, угол установки ДПР, момент. На основе платформы был создан учебный исследовательский стенд, который позволяет изучить различные режимы работы ЭПВД [73, 74, 79].

При помощи этой платформы были сняты характеристики ВД при различных режимах работы:

На первоначальном этапе снималась графики скорости и момента:

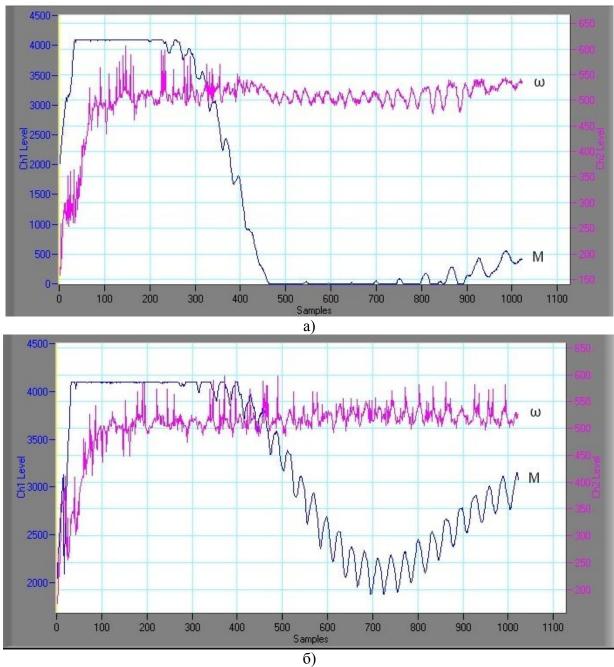


Рис.4.3 Задание скорости 1000 оборотов а) без нагрузки б) с нагрузкой

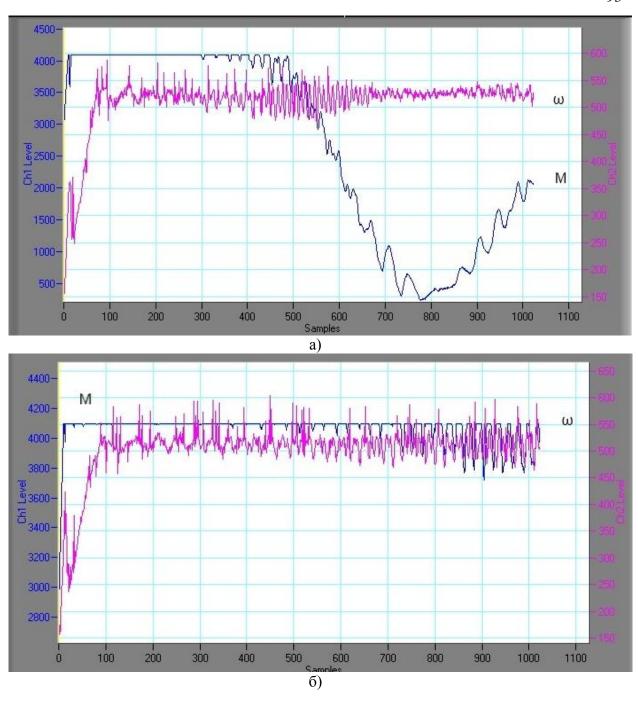


Рис.4.4 Задание скорости 1500 оборотов а) без нагрузки б) с нагрузкой

На рис. 4.3.-4.4 представлены графики при различном задании скорости вращения двигателя. Из рис. 4.3 и рис. 4.4 видно, что скорость вращения не зависит от нагрузки. Момент зависит от нагрузки, приложенной к валу ВД, на рис.4.3-4.4. видно, что во время быстрого запуска двигателя график скорости и момента имеют пульсацию, а на рис.4.4 б) пульсация момента практически отсутствует и быстродействие системы очень высокое, что немаловажно в современном элек-

троприводе. Данный двигатель очень быстро выходит на установившейся режим работы.

Вторым этапом снималась графики тока \mathbf{I}_q и момента.

На рис. 4.5.-4.6 представлены графики при различном задании скорости вращения двигателя. Из рис. 4.5 и рис. 4.6 видно, что ток I_q , не зависит от нагрузки. Момент зависит от нагрузки, приложенной к валу ВД, на рис. 4.5-4.6. видно, что во время быстрого запуска двигателя график тока и момента имеют пульсацию, а на рис. 4.6 б) пульсация момента отсутствует.

Исходя из вышесказанного можно сделать следующие выводы:

- Управление ВД по углу установки является эффективным
- Ток I_q не зависит от угла установки ДПР

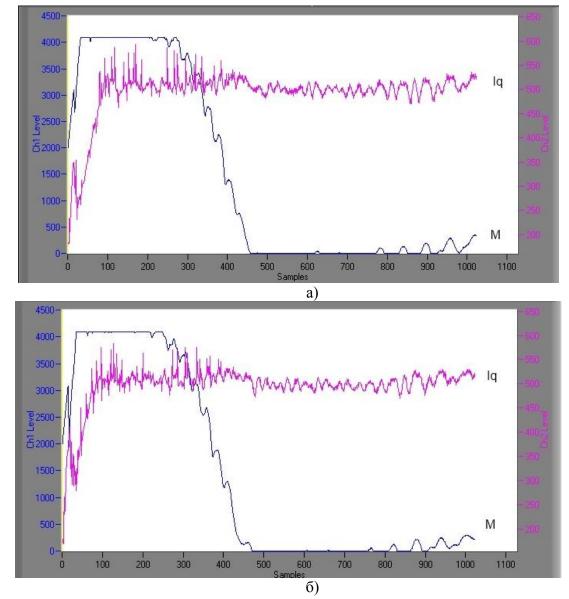


Рис.4.5 Задание скорости 1000 оборотов а) без нагрузки б) с нагрузкой

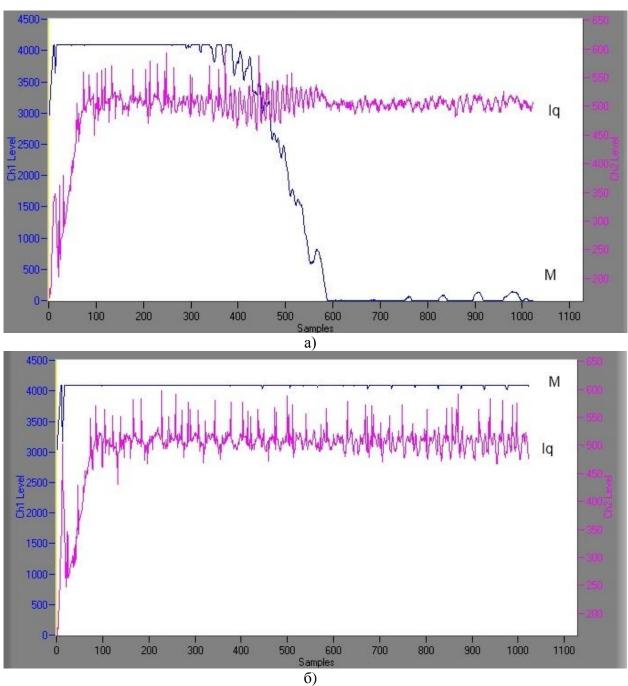


Рис. 4.6 Задание скорости 1500 оборотов а) без нагрузки б) с нагрузкой

4.2 Моделирование исследуемого двигателя

4.2.1 Исследование влияния угла установки ДПР

На основе полученных структурных схем ВД и системы в целом была разработана модель ЭПВД в среде MATLAB[102] (рис 4.7). Полученная модель позволяет имитировать изменение угла установки ДПР. Так же разработанная модель

позволяет контролировать основные координаты ВД: скорость, момент, токи I_d и I_q и управлять задающими и возмущающими сигналами.

В ходе компьютерного моделирования в среде MATLAB автором снимались осциллограммы переходных процессов при различных углах установки ДПР, полученные осциллограммы послужили для построения угловых диаграмм.

Так же, исследуя полученные переходные процессы ВД, можно определить энергопотребление ЭПВД автономного объекта в различных режимах работы.

Модель рис. 4.7 содержит блоки задания напряжения, задания угла установки ДПР, блок вычисления sin и cos, блок задания момента, вычислители координат, интеграторы, блоки сложения и вычитания, блоки умножения.

Из структурной схемы ВД видно, что он отличается от двигателя постоянного тока наличием перекрестных связей по переменным состояния i_d , i_q в уравнениях равновесия ЭДС на обмотках и добавочным слагаемым момента в уравнении равновесия моментов на валу ВД. Этот момент возникает вследствие наличия в роторе явновыраженных полюсов и называется реактивным моментом синхронной машины.

Математическое описание ВД в неподвижной системе координат достаточно сложное, его приходится применять при импульсном управлении ВД, когда нельзя использовать уравнения для напряжений на фазах двигателя.

На рис. 4.8-4.9 представлены переходные процессы в ВД при управлении по напряжению.

В случае питания обмоток статора синусоидальным или квазисинусоидальным (ШИМ по синусоидальному закону) напряжением следует использовать вращающиеся координаты для упрощения математического описания ВД и, как следствие, упрощения синтеза системы регулирования, т.к. последняя, как известно, строится во вращающейся системе координат.

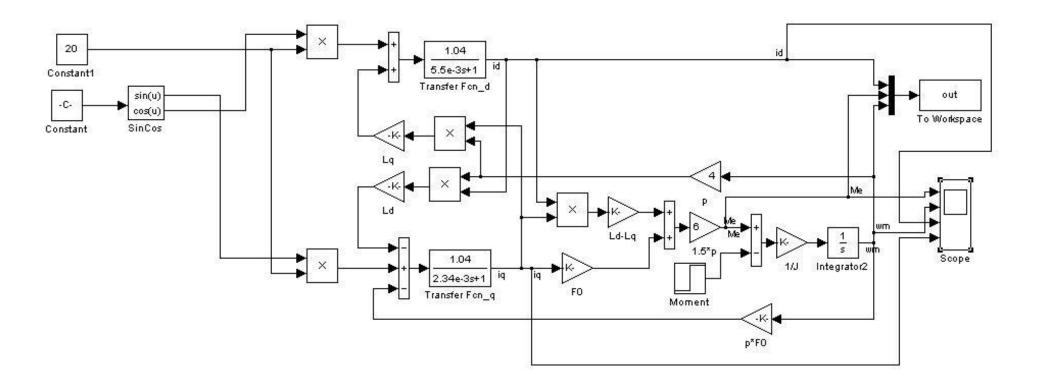


Рис.4.7 Модель ВД в среде MATLAB

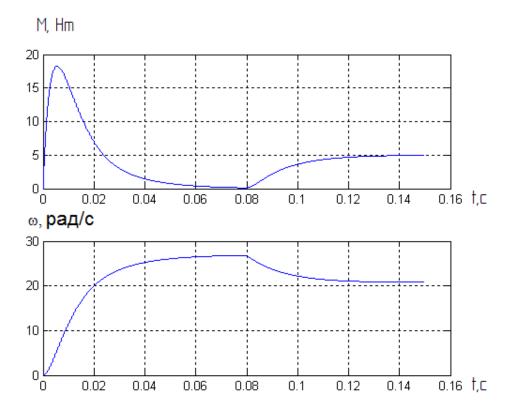


Рис. 4.8 Переходные процессы в ВД при U=20B

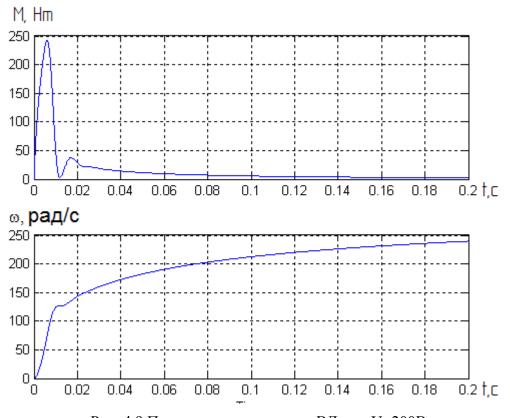


Рис. 4.9 Переходные процессы в ВД при U=200В

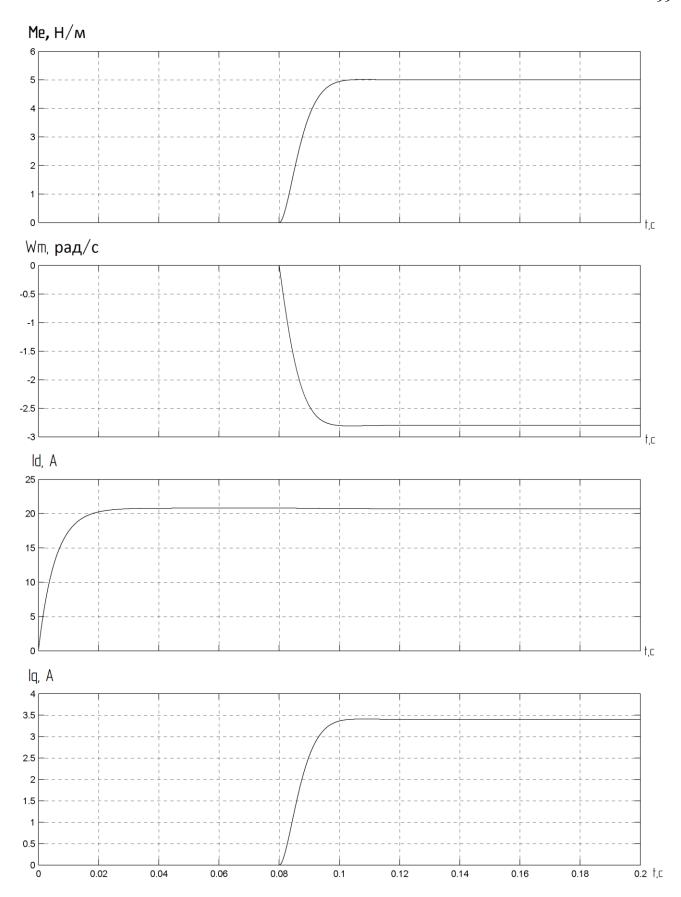


Рис.4.10 Переходные процессы в ВД при условии угла установки ДПР 0°

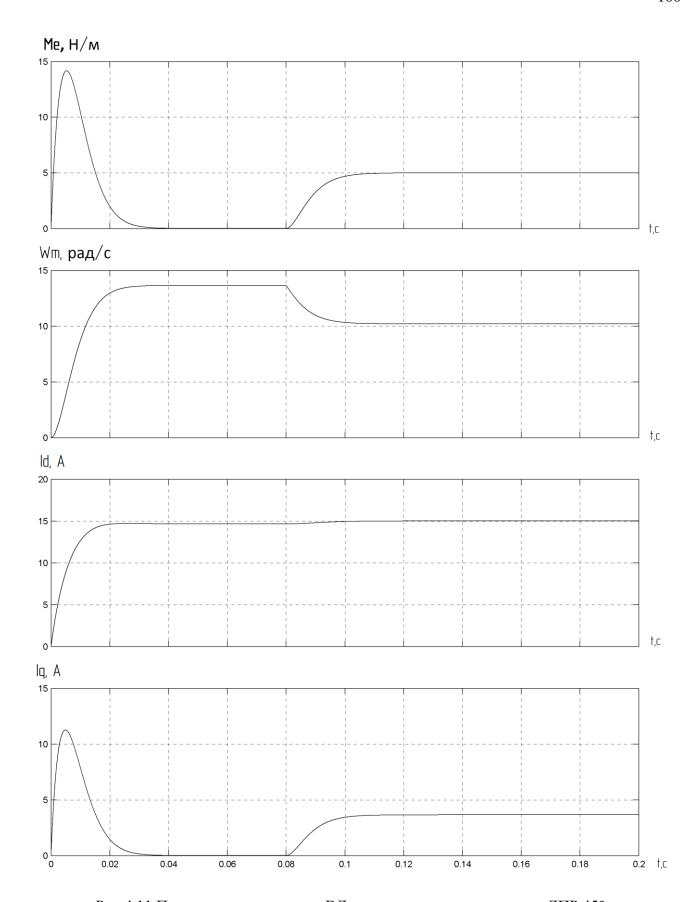


Рис.4.11 Переходные процессы в ВД при условии угла установки ДПР 45°

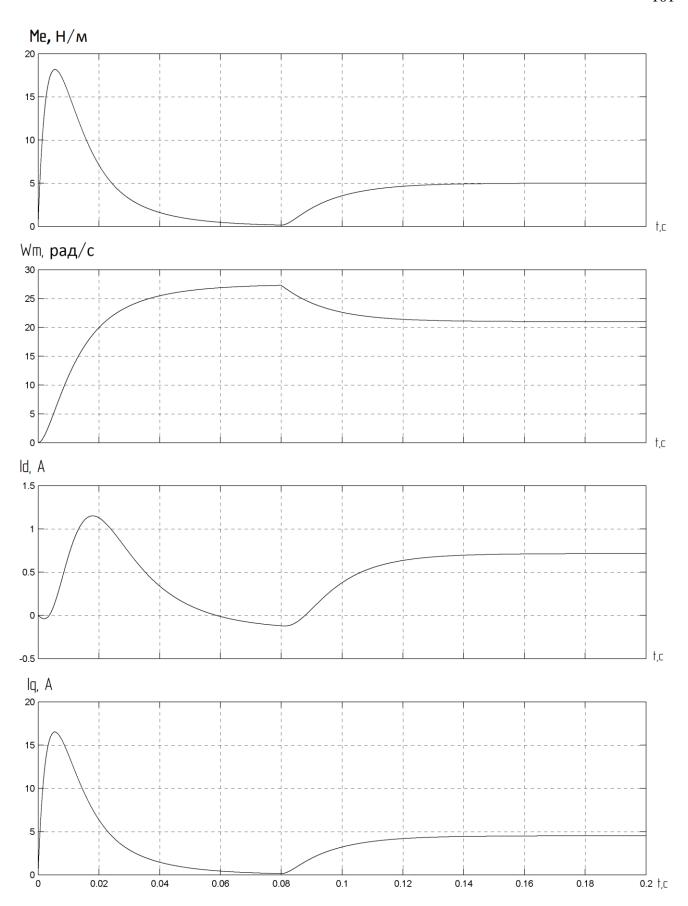


Рис.4.12 Переходные процессы в ВД при условии угла установки ДПР 90°

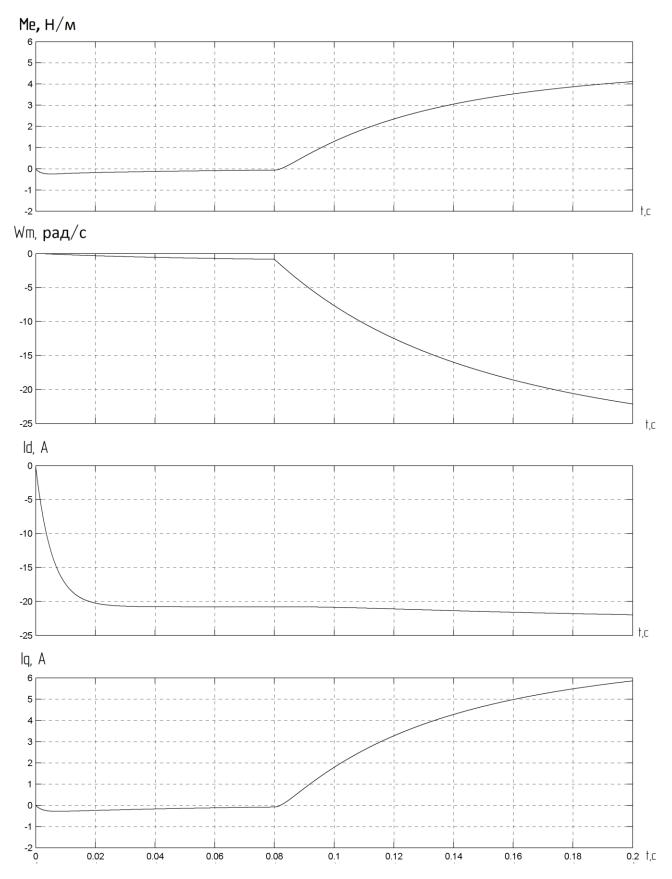


Рис.4.13 Переходные процессы в ВД при условии угла установки ДПР 180°

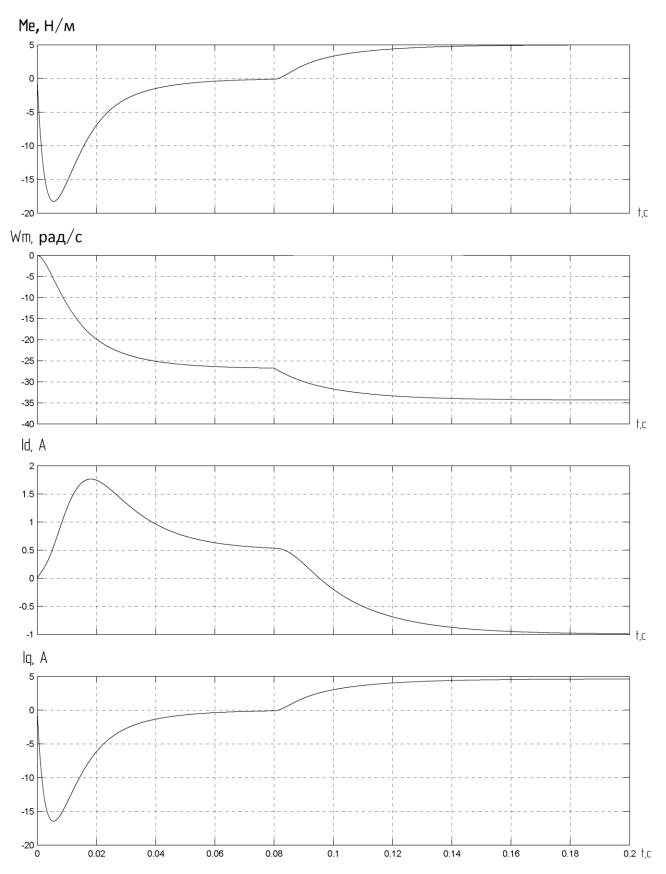


Рис.4.14 Переходные процессы в ВД при условии угла установки ДПР 270°

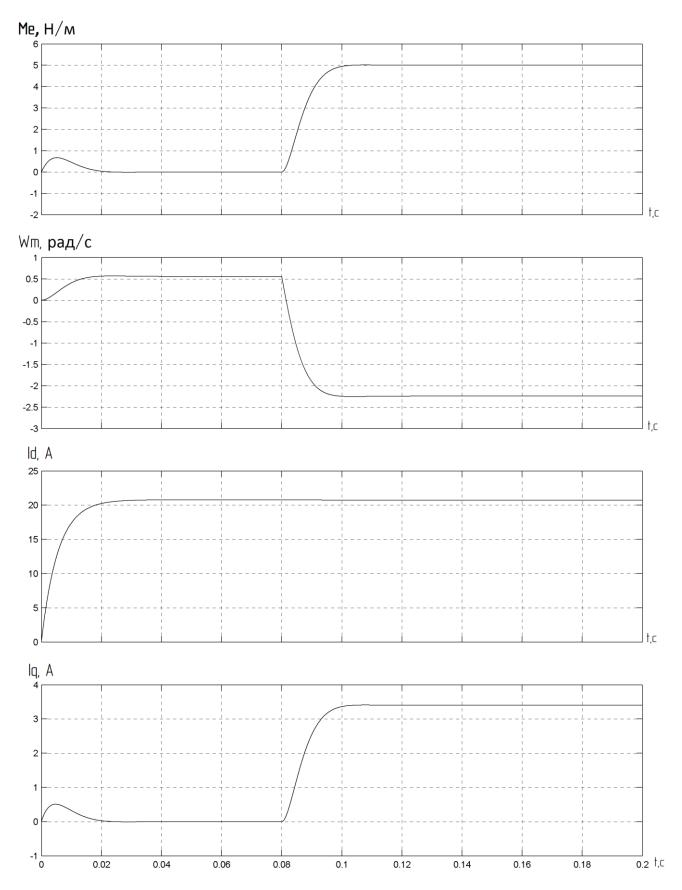


Рис.4.15 Переходные процессы в ВД при условии угла установки ДПР 360°

Полученные переходные процессы для различных углов установки ДПР позволяют построить угловые диаграммы (рис.2.12, 2.14-2.15). Они наглядно демонстрируют влияние угла установки на координаты ВД и позволяют сделать выводы о целесообразности изменения работы ВД за счет изменения угла θ в двигательном и тормозном режимах. Таким образом, управление по углу θ позволяет повысить энергоэффективность ЭПВД за счет изменения механической характеристики ВД в режиме рекуперации. Исходя из рис. 4.8-4.9 следует, что при больших сигналах ВД является нелинейным звеном, где существенным образом проявляются перекрестные связи. Переходные процессы рис. 4.10-4.15 при установке угла положения ротора 90° полностью идентичны рис. 4.8.

4.2.2 Исследование режимов рекуперации

При исследовании режимов рекуперации задавались циклы разгона — торможения при различном угле установки ДПР и снимались переходные процессы для I=f(t); $\omega=f(t)$; $\Delta U=f(t)$; U = f(t). Из графиков видно, что при разгоне двигателя падает напряжение аккумулятора ΔU , а при торможении напряжение аккумулятора растет. Тем самым обеспечивается энергоэффективный режим рекуперативного торможения. Данный режим позволяет нам повысить энергоэффективность электропривода и время работы от одной подзарядке аккумулятора, что важно в современном электроприводе. Время работы от одной подзарядки аккумулятора позволяет увеличить ресурс аккумулятора автономного объекта, продлить время автономной работы.

Задавались циклы разгона и торможения рис.4.16-4.21 анализ которых позволяет построить угловые характеристики (рис.2.12, 2.14-2.15) Они наглядно демонстрируют влияние угла установки на координаты ВД при разгонах и торможении и позволяют сделать выводы о целесообразности векторного управления ВД.

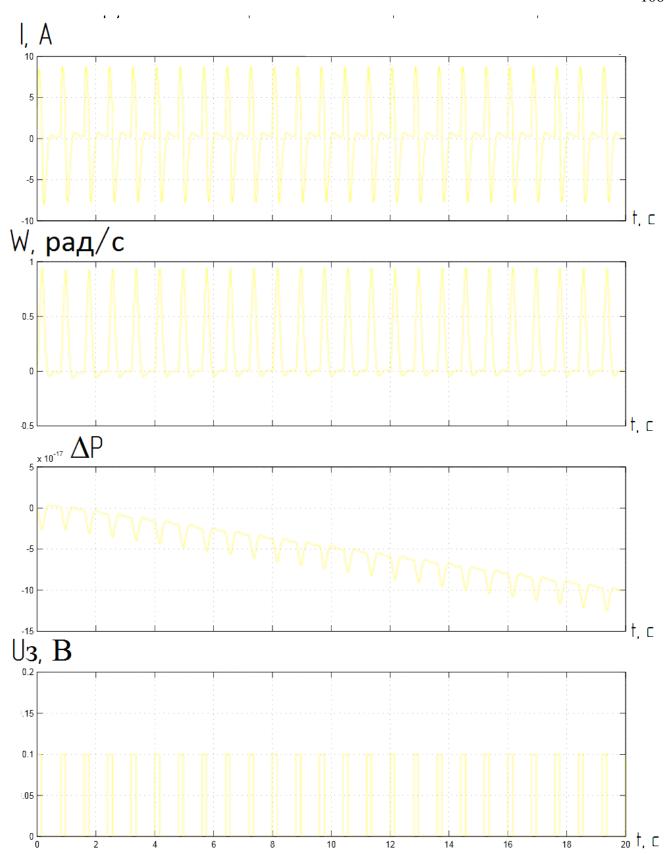


Рис.4.16 Циклы разгона и торможения при θ = 0°

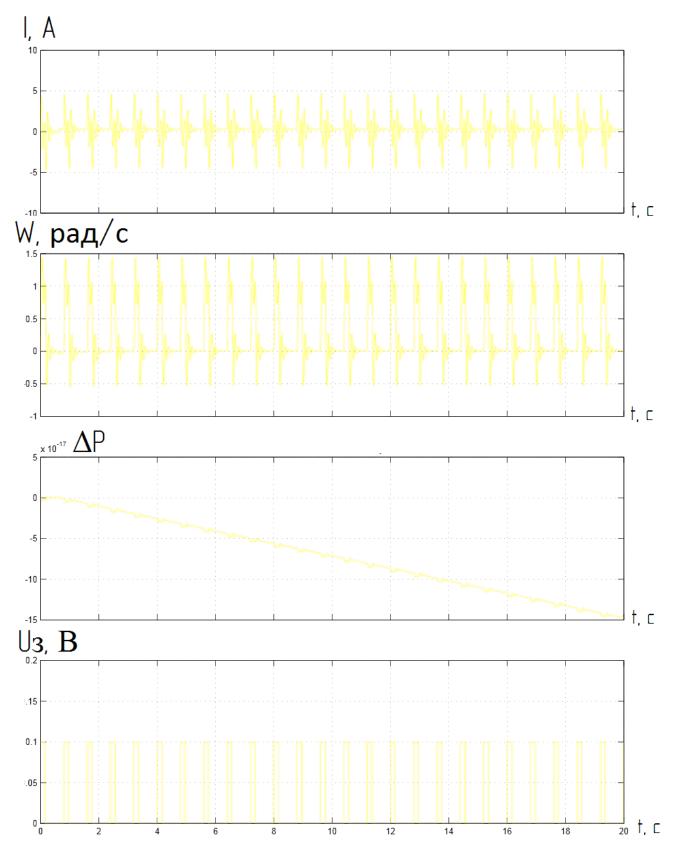


Рис.4.17 Циклы разгона и торможения при θ =45°

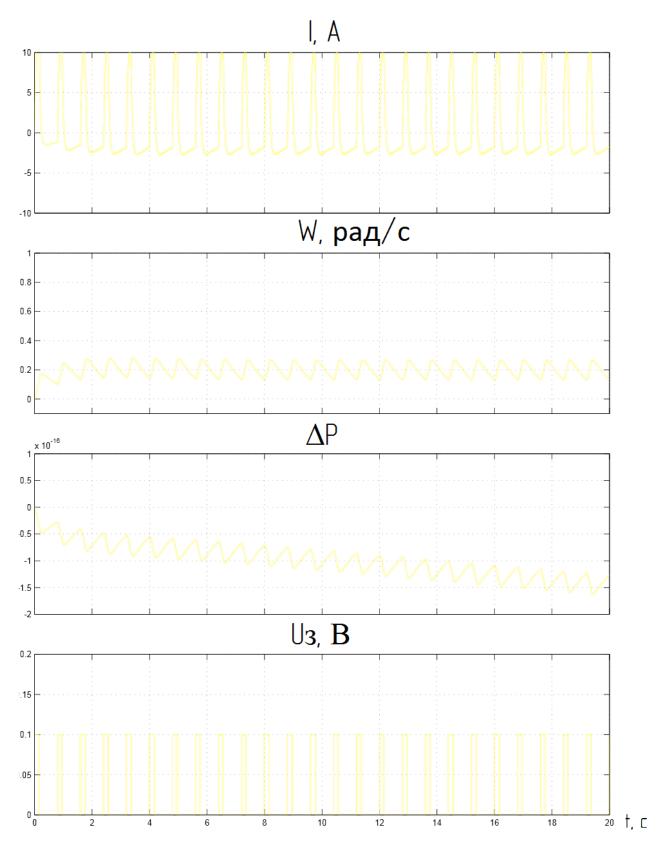


Рис.4.18 Циклы разгона и торможения при θ =90°

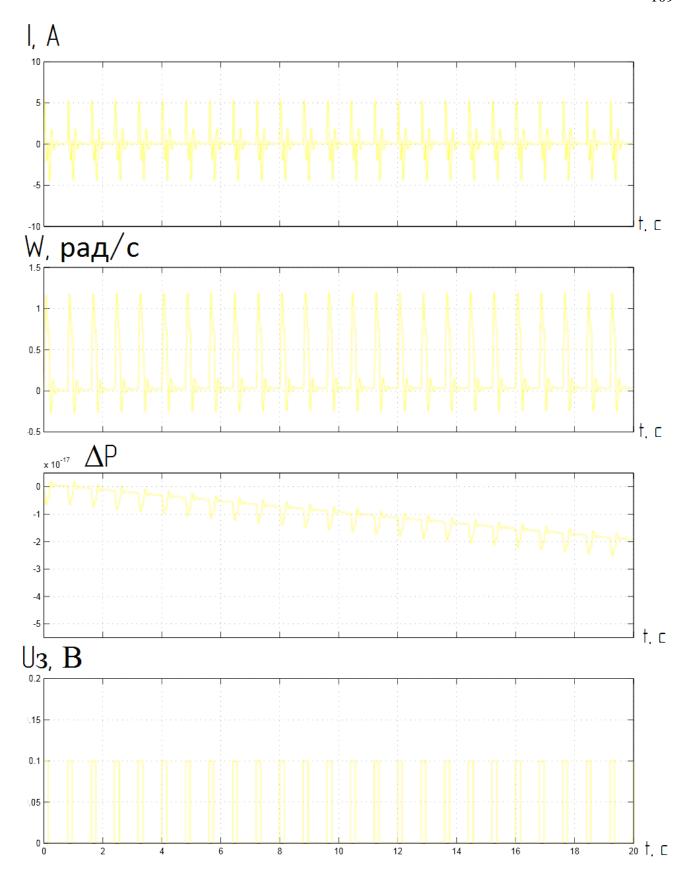


Рис.4.19 Циклы разгона и торможения при θ =135°

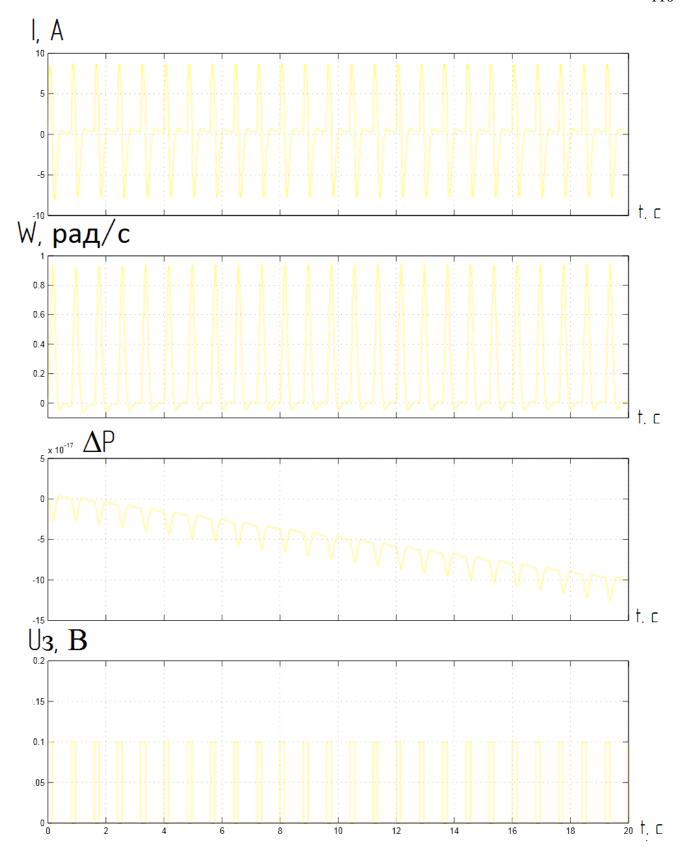


Рис.4.20 Циклы разгона и торможения при θ =180°

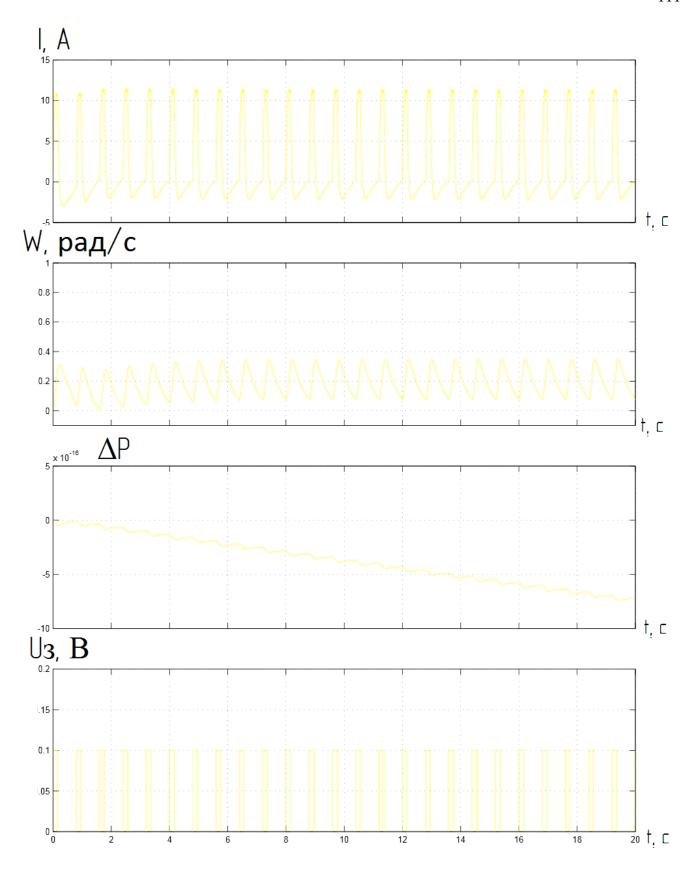
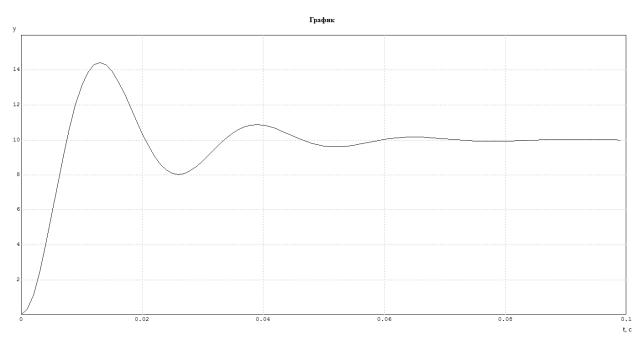


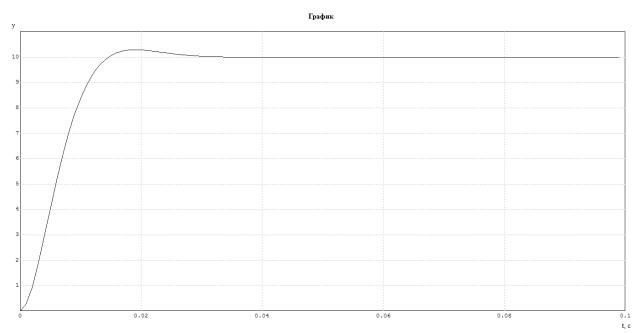
Рис.4.21 Циклы разгона и торможения при θ =360°

4.2.3 Исследование влияния параметрических изменений электропривода на его характеристики

Для исследования влияния параметрических изменений электропривода на его характеристики использовалась модель, изображенная на рис. 3.6.



X=1 подчиненное регулирование изменение сопротивления



X=1 подчиненное регулирование с упреждающей коррекцией изменение сопротивления Рис. 4.22 Изменение сопротивления при подчиненном регулировании

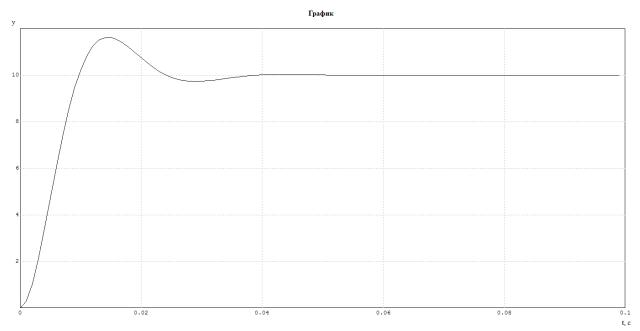
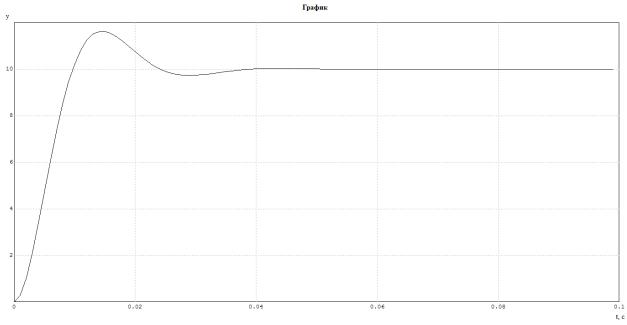
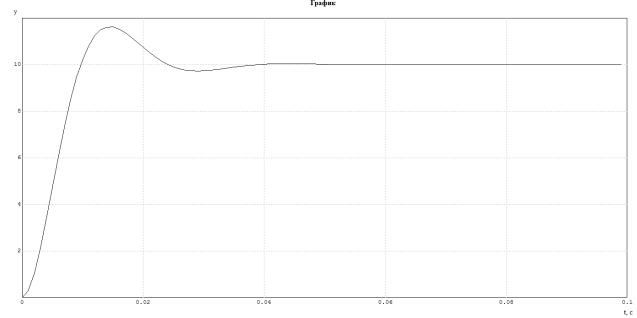


Рис. 4.23 Изменение х для всех режимов (R подчиненное регулирование)

При изменении сопротивления при подчиненном регулировании рис. 4.22 видно, что время переходного процесса при подчиненном регулировании составляет 0.08с, а при подчиненном регулировании с упреждающей коррекцией время переходного процесса 0.03с. Амплитуда переходного процесса в системе с упреждающей коррекцией меньше амплитуды переходного процесса при подчиненном регулировании.



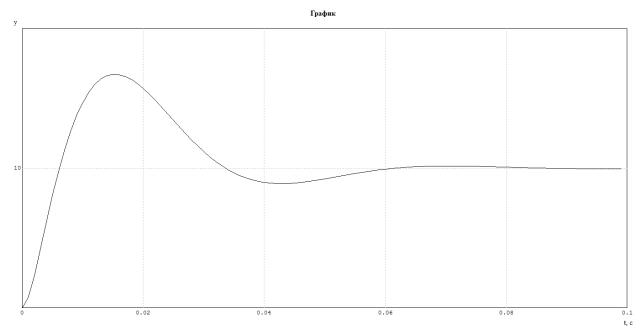
Изменение T'э в системе подчиненного регулирования T'э=Tэ



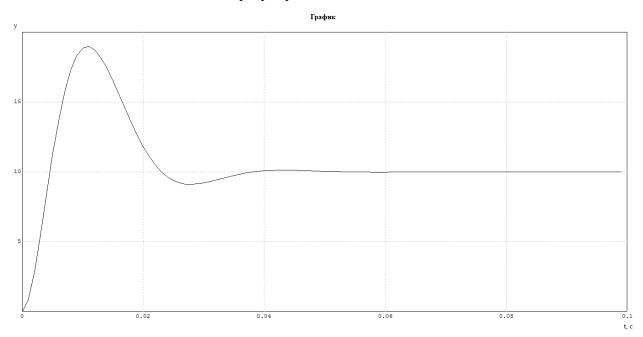
С упреждающей коррекцией изменение Т'э в системе подчиненного регулирования Т'э=Тэ

Рис. 4.24. Изменение настроечного значения Т'э регулятора.

При изменении настроечного значения регулятора при Т'э=Тэ в системе подчиненного регулирования и в системе с упреждающей коррекцией изменений не наблюдается, а при изменении Т'э=1.5Тэ (рис. 4.25) видно, что в системе с упреждающей коррекцией время переходного процесса меньше, чем при подчиненном регулировании, а амплитуда переходного процесса наоборот больше.



Изменение Т'э в системе подчиненного регулирования Т'э=1.5Тэ



С упреждающей коррекцией изменение Т'э в системе подчиненного регулирования Т'э=1.5Тэ

Рис. 4.25. Изменение настроечного значения Т'э регулятора.

Изменяя настроечное значение Т'э можно выбрать оптимальные режимы работы двигателя в структуре с упреждающей коррекцией.

На рис. 4.26 показаны графики переходных процессов в системе с упреждающей коррекцией при изменении коэффициента усиления:

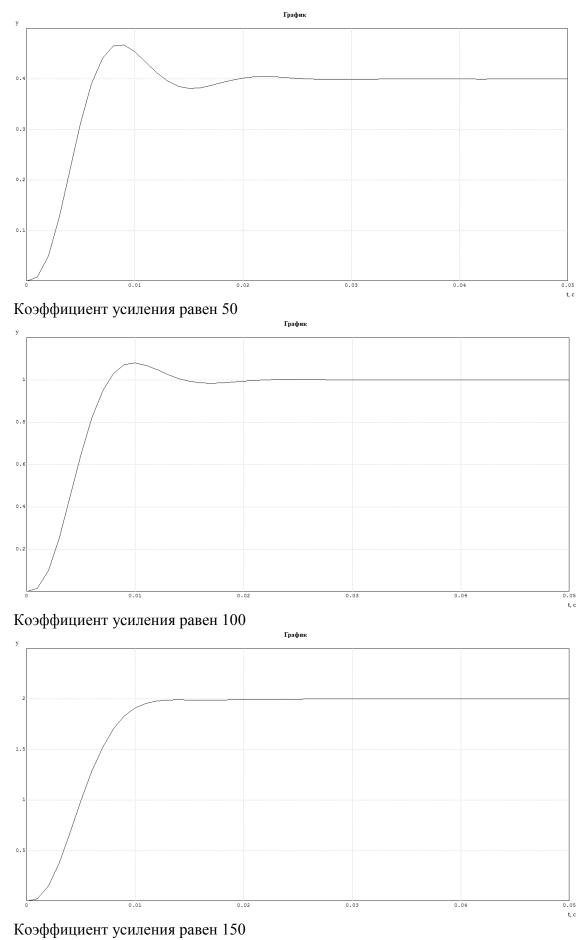


Рис. 4.26 Изменение коэффициента усиления

Изменение коэффициента усиления положительно сказывается на структуре переходных процессов в системе с упреждающей коррекцией. Исследование влияния параметрических изменений позволяет нам правильно настроить структуру на технический оптимум и обеспечить быстродействие и заданные режимы работы вентильного двигателя.

Фотографии экспериментальной установки представлены ниже:



Рис. 4.27 Плата управления вентильным двигателем.



Рис. 4.28 Вид спереди



Рис. 4.29 Вид сзади

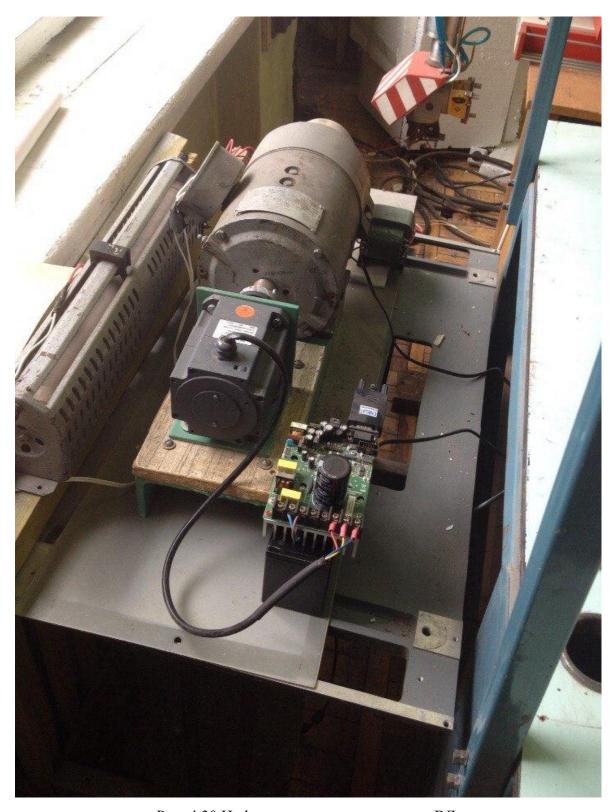


Рис. 4.30 Цифровая система управления ВД.

Выводы по главе 4:

Разработанная на основе моделирования система управления ВД используется при обучении студентов в Ульяновском государственном техническом университете в виде лабораторного стенда. Результаты испытаний показали, что использование указанного блока позволяют:

- 1. Повысить плавность движения автономного объекта на низких скоростях;
- 2. Оперативно подзаряжать аккумулятор автономного транспортного средства:
 - 3. Снизить стоимость системы управления;
- 4. Повысить быстродействие системы управления за счет применения упреждающей коррекции.
 - 5. Обеспечить режим эффективного рекуперативного торможения.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В диссертационной работе выполнены комплексные научно-технические исследования по разработке электропривода автономных объектов с низкой чувствительностью к параметрическим изменениям и модели ЭПВД.

В результате разработаны новые схемные решения, направленные на повышение технико-экономических показателей электропривода:

- 1. Разработан электропривод с вентильным двигателем, отличающийся низкой чувствительностью к изменяющимся параметрам.
- 2. Разработана математическая модель исследуемого электропривода.
- 3. Повышены технико-экономические показатели автономного транспортного средства за счет оптимизации режима рекуперации энергии при торможении ЭПВД.
- 4. Разработаны вычислители координат на основе первичных датчиков.
- 5. Получены результаты моделирования и экспериментальных исследований системы управления вентильным двигателем подтверждающие эффективность предлагаемых решений.
- 6. Разработаны математические модели и синтезирована система управления ВД по углу положения ротора, реализующие электропривод автономного объекта на основе вентильного двигателя.
- 7. Разработана система управления ВД, позволяющая снизить влияние параметрических изменений электропривода на динамические показатели системы за счет применения упреждающей коррекции.

Практическим результатом разработки системы управления является создание опытного образца автономной грузоподъемной тележки в ОАО «УНИПТИ-МАШ» и создание лабораторно-исследовательского стенда для изучения ВД в различных режимах работы, который применяется на кафедре: «Электропривод и АПУ» Ульяновского государственного технического университета для обучения студентов.

Рекомендации

- 1. Результаты проведенного научного исследования рекомендуется использовать на предприятиях электротранспортной отрасли, что позволит повысить быстродействие электропривода автономного транспортного средства и его технико-экономический показатели.
- 2. Предложенные подходы к технической реализации электропривода автономного транспортного средства с вентильным двигателем могут быть использованы предприятиями, занимающимися разработкой и выпуском систем управления для вентильных двигателей.

Перспективы дальнейшей разработки темы

Дальнейшая разработка темы может быть направлена на создание быстродействующего электропривода с вентильным двигателем для автономных объектов различного назначения. Представляет интерес также исследование спецфакторов и радиационной стойкости на свойства электропривода с вентильным двигателем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Адкинс, В.А. Общая теория электрических машин [Текст]: пер. с англ. / В.А. Адкинс. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1960. 272 с.
- 2. Аракелян, А.К. Вентильные электрические машины в системах регулируемых электроприводов [Текст]: Учеб. Пособие для вузов: В 2 т. Т.1 / А.К. Аракелян, А.А. Афанасьев. М.: Высш. шк., 2006. 546 с.: ил.
- 3. Аракелян, А.К. Вентильные электрические машины в системах регулируемых электроприводов [Текст]: Учеб. Пособие для вузов: В 2 т. Т.2 / А.К. Аракелян, А.А. Афанасьев. М.: Высш. шк., 2006. 518 с.: ил.
- 4. Афанасьев, А.Ю. Моментный электропривод [Текст]: Учеб. пособие/ А.Ю. Афанасьев Казань: Казан. гос. техн. Ун-т, 1997. 250 с.: ил.
- 5. Ахматов, М.Г. Синхронные машины [Текст] / М.Г. Ахматов М.: Высш. шк., 1984. 135 с.
- 6. Балагуров, В.А. Бесконтактные двигатели постоянного тока с постоянными магнитами [Текст] / В.А. Балагуров, В.М. Гридин, В.К. Лозенко. М.: Энергия, 1975. 128с.: ил.
- 7. Балковой, А.П. Прецизионный электропривод с вентильными двигателями [Текст] / А.П. Балковой, В.К. Цаценкин. М.: Издательский дом МЭИ, 2010. 328с.: ил.
- 8. Батоврин, С.А. Датчики положения ротора и синхронные тахогенераторы для бесконтактного моментного привода [Текст] / С.А. Батоврин и др./ Электротехника 1991. № 8. С. 52-58.
- 9. Башарин, А.Г. Управление электроприводом [Текст]: Учеб. Пособие для вузов / А.Г. Башарин, В.А. Новиков, Г.Г. Соколовский. Д.: Энергоиздат, 1982. 392с.: ил.
- 10. Беспалов, В.Я. Электрические двигатели в XXI веке [Текст] / В.Я. Беспалов // Тр. III Международной (XIV Всероссийской) науч.-техн. конф. по автоматизированному электроприводу «АЭП-2001» / под ред. С.В. Хватова. Нижний Новгород: Вектор-ТиС, 2001. С. 17.

- 11. Боровиков, М.А. Расчет быстродействующих систем автоматизированного электропривода и автоматики [Текст] / М.А. Боровиков. Саратов: Изд-во Саратовского университета, 1980. 390 с.
- 12. Ботвинник, М.М. Управляемая машина переменного тока [Текст] / М.М. Ботвинник, Ю.Г. Шакарян. М.: Наука, 1969. 140 с.
- Браславский, И.Я. Энергосберегающий асинхронный электропривод: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений [Текст] / И.Я. Браславский,
 З.Ш. Ишматов, В.Н. Поляков; под ред. И.Я. Браславского. М.: Издательский центр «Академия», 2004. 256 с.
- Бут, Д.А. Модификации вентильно-индукторных двигателей и особенности их расчетных моделей [Текст] / Д.А. Бут. // Электричество. 2000. №7. С. 34-44.
- 15. Бут, Д.А. Бесконтактные электрические машины [Текст]: Учебное пособие для электромех. и электроэнерг. спец. Вузов / Д.А. Бут. Высшая школа, 1990. 416 с.: ил.
- 16. Вейнгер, А.М. Регулируемый синхронный электропривод [Текст]: Учеб. Пособие / А.М. Вейнгер. Энергоатомиздат, 1985. 340 с.: ил.
- 17. Виноградов, А.Б. Векторное управление электроприводами переменного тока [Текст] / А.Б. Виноградов / ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». Иваново, 2008. 298 с.
- Вольдек, А.И. Электрические машины [Текст]: учебник для студентов высш. техн. заведений / А.И. Вольдек. 3-е изд., перераб. Л.: Энергия, 1978. 832 с.
- Воронин, С.Г. Математическая модель для определения координат в электроприводе с вентильным двигателем постоянного тока [Текст] / С.Г. Воронин, А.Р. Кузьмичев. // Электричество. 2000. №3. С. 34-38.
- 20. Воронин, С.Г. Управление коммутацией вентильного двигателя по сигналам ЭДС вращения / С.Г. Воронин. // Электричество. 2000. №9. С. 53-59.

- 21. Высоцкий, В.Е. Система автоматизированного проектирования бесконтактных вентильных двигателей [Текст] / В.Е. Высоцкий, В.Е. Верещагин, П.В. Тулупов // Электричество. 2003. №10. С. 16-35.
- 22. Высоцкий, В.Е. Математическое моделирование и оптимальное проектирование вентильных электрических машин [Текст] / В.Е. Высоцкий, Ю.В. Зубков, П.В. Тулупов. М.: Энергоатомиздат, 2007. 340 с.
- 23. Герман-Галкин, С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0 [Текст]: Учебное пособие / С.Г. Герман-Галкин СПб.: КОРОНА принт, 2001. 320 с.
- 24. Голландцев, Ю.А. Исследование вентильных двигателей [Текст]: Учебн. Пособие / Ю.А. Голландцев, И.Е. Овчинников. Л.: ЛИАП, 1983.
- 25. Горячев, О.В. Цифровые электрические следящие приводы переменного тока с асинхронными трёхфазными двигателями для систем наведения и стабилизации [Текст] / О.В. Горячев. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2010. – 211 с.: ил.
- 26. Джанхотов, В.В. Исследование и разработка электроприводов на базе вентильных двигателей с управлением от сигнального процессора для шагающего робота [Текст] / В.В. Джахонтов. Диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Санкт-Петербург, 2004.
- 27. Дианов, А.Н. Разработка и исследование системы бездатчикового управления вентильным двигателем [Текст] / А.Н. Дианов. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. 05.09.03 Москва, 2004.
- Доманов, В. И. Управление и диагностика вентильного двигателя [Текст] / В.И. Доманов, А.В. Доманов // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2011. №6. С. 56-59.
- 29. Егоров, А.В. Анализ электромеханических свойств вентильного электропривода [Текст] / А.В. Егоров, С.П. Постнов, А.С. Улюмджиев // Территория нефтегаз. 2011. С. 84-90.
- 30. Ермолин, Н.П. Электрические машины малой мощности [Текст]: Учеб. Пособие / Н.П. Ермолин. М.: Высш. школа, 1962. 504 с.: ил.

- 31. Зиннер, Я.Я. Вентильные двигатели постоянного и переменного тока [Текст]: Учеб. Пособие / Я.Я. Зиннер, А.И. Скороспешкин. М.: Энергоиздат, 1981.
- 32. Иванов, Г.Г. Характеристики вентильного двигателя, работающего при постоянном коэффициенте мощности [Текст] / Г.Г. Иванов // Бесконтакт, электр. машины (Рига). 1982. №21. С. 50-55.
- 33. Иванов-Смоленский, А.В. Электрические машины [Текст]: учеб. для вузов по напр. подготовки диплом. спец. «Электротехника, электромеханика и электротехнологии»: В 2-х т. / А.В. Иванов-Смоленский. 2-е изд., перераб. и доп. М.: МЭИ, 2004. Т. 1. 652 с. : ил.
- 34. Иванов-Смоленский, А.В. Электрические машины [Текст]: учеб. для вузов по напр. подготовки диплом. спец. «Электротехника, электромеханика и электротехнологии»: В 2-х т. / А.В. Иванов-Смоленский. 2-е изд., перераб. и доп. М.: МЭИ, 2004. Т. 2. 532 с.: ил.
- 35. Иванов-Смоленский, А.В. Электромагнитные поля и процессы в электрических машинах и их физическое моделирование [Текст] / А.В. Иванов-Смоленский. М.: Энергия, 1969. 304 с.
- 36. Извеков, В.И. Вентильные электрические двигатели [Текст] Учебное пособие по курсу «Специальные электрические машины» / В.И. Извеков, В.А. Кузнецов. М.: Изд-во МЭИ, 1998. 60 с.
- 37. Ильинский, Н.Ф. Основы электропривода [Текст]: учеб. пособие для студ. Вузов / Н.Ф. Ильинский. – М.: МЭИ, 2000. – 164 с.
- 38. Кислицын, А.Л. Синхронные машины [Текст]: Учеб. Пособие / А.Л. Кислицын. Ульяновск, УлГТУ, 2000. 108 с.
- 39. Ключев, В.И. Теория электропривода [Текст]: Учеб. для вузов. 2-е изд. перераб. и доп. / В.И. Ключев. М.: Энергоатомиздат, 2001. 704 с.
- 40. Ковчин, С.А., Теория электропривода [Текст]: учебник для вузов / С.А. Ковчин, Ю.А. Сабинин. СПБ.: Энергоатомиздат. Санкт-Петербург: отдние, 2000. 496 с.: ил.

- 41. Копылов, И.П. Асинхронизированный вентильный двигатель с поддержанием неизменного результирующего магнитного потока [Текст] / И.П. Копылов, Ю.П. Сонин, И.В. Гуляев // Электротехника. 2000. №8. С. 59-62.
- 42. Копылов, И.П. Асинхронизированный вентильный двигатель с ортогональным управлением [Текст] / И.П. Копылов, Ю.П. Сонин, И.В. Гуляев, А.А. Вострухин // Электротехника. 2002. №9. С. 2-5.
- 43. Копылов, И.П. Асинхронизированный вентильный двигатель с поддержаниемнеизменного результирующего магнитного потока [Текст] / И.П. Копылов, Ю.П. Сонин, И.В. Гуляев, Г.М. Тутаев // Электротехника. 2000. №8. С. 59-62.
- 44. Копылов, И.П. Математическое моделирование электрических машин [Текст]: Учеб. для вузов. 3-е изд. перераб. и доп. / И.П. Копылов. М.: Высш. шк., 2001. 327 с.: ил.
- 45. Копылов, И.П. Электромеханическое преобразование энергии в вентильных двигателях [Текст] / И.П. Копылов, В.Л. Фрумин. М.: Энергоатомиздат, 1986. 168 с.
- 46. Костенко, М.П. Электрические машины. Специальная часть [Текст] / М.П. Костенко. Л: Госэнергоиздат, 1949. 708 с.
- 47. Коськин, Ю.П. Введение в электромеханотронику [Текст] / Ю.П. Коськин. Санкт-Петербург : Энергоатомиздат, С.-Петерб. отд-ние, 1991. 192 с. : ил.
- 48. Кругликов, А.П. Автоматизированный вентильный электропривод постоянного тока [Текст]: Учеб. Пособие / А.П. Кругликов. Алма-Ата, КазПИ, 1985. 224 с.
- 49. Кузнецов, В.А. Дискретная математическая модель вентильно-индукторного двигателя [Текст] / В.А. Кузнецов, А.В. Матвеев // Электричество. 2000. N = 8. C.22-27.
- 50. Кулешов, Е.В. Магнитоэлектрический синхронный генератор на базе асинхронной машины для автономной ветроэлектрической установки [Текст] / Е.В. Кулешов. Автореферат дис., кандидата технических наук. Владивосток. 2001. 20 с.

- 51. Курдя, В.В. Схемы электроснабжения много двигательного электропривода повышенной частоты [Текст] / С.Ф. Степанов, В.В. Курдя, И.И. Артюхова // Проблемы электроэнергетики: межвуз. науч. сб. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2006. С. 86-90.
- 53. Левин, А.В. Автономные системы электроснабжения [Текст] / А.В. Левин,
 H.Н. Лаптев // Энергетика. 2003. №1(9). С. 12-14.
- 54. Локтева, И.Л. Принципы построения систем управления обобщенной машиной переменного тока [Текст] / И.Л. Локтева, Г.Б. Онищенко, Т.В. Плотникова, Ю.Г. Шакарян / Автоматизированный электропривод / под общ. ред. И.И. Петрова, М.М. Соколова, М.Г. Юнькова. М.: Энергия, 1980. С. 280-284.
- 55. Лохнин, В.В. Магнитоэлектрические бесконтактные генераторы для транспортных средств [Текст] / В.В. Лохнин. Известия ВУЗов. Электромеханика. 1982. №2. С. 238-240.
- 56. Микеров, А.Г. Электромеханические датчики и электронные компоненты управляемых вентильных двигателей [Текст]: учеб. пособие / А.Г. Микеров; СПбГЭТУ (ЛЭТИ). СПб.: ГЭТУ (ЛЭТИ), 1999. 59 с. : ил. Библиогр.: с. 58.
- 57. Микеров, А.Г. Цифровая коррекция статических характеристик исполнительных вентильных двигателей [Текст] / А.Г. Микеров, Д.В. Самохвалов // Гироскопия и Навигация. 2004. №1 (44). С. 126-132.
- 58. Микеров, А.Г. Статические и динамические характеристики бесконтактного моментного привода с электродвигателями серии ДБМ [Текст]: сборник трудов / А.Г. Микеров, А.В. Яковлев // В сб.: Применение постоянных маг-

- нитов в электромеханических системах. Межвед. сб. трудов, №147. М.: МЭИ, 1987.
- 59. Микеров, А.Г. <a href="http://library.eltech.ru/cgi-bin/irbis64r-81/cgiirbis-64.exe?Z21ID=&I21DBN=GK&P21DBN=GK&S21STN=1&S21RE-10&S21FMT=fullw&C21COM=S&S21CNR=20&S21P01=0&S21P02=0&S21P03=M=&S-21COLORTERMS=0&S21STR=Управляемые вентильные двигатели малой мощности [Текст]: учеб. пособие / А.Г. Микеров; СПбГЭТУ. СПб. : ГЭТУ, 1997. 64 с. : ил. Библиогр.: с. 63.
- 60. Михалев, А.С. Следящие системы с бесконтактными двигателями постоянного тока [Текст] / А. С. Михалев, В. П. Миловзоров. М.: Энергия, 1979. 160 с.
- 61. Мишин, Н.В. Автоматизированный электропривод автономного транспортного средства [Текст] / В.И. Доманов, Н.В. Мишин, А.В. Доманов // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. − 2012. − №6. − С.33-35.
- 62. Мишин, Н.В. Автономные электромеханические системы [Текст] / Н.В. Мишин // Материалы 1 Крымской студенческой научно-технической конференции. Севастополь, 2014.
- 63. Мишин, Н.В. Автономные электромеханические системы [Текст]/ Н.В. Мишин, В.И. Доманов, А.В. Доманов // Вестник Ульяновского государственного технического университета. 2013. №1. С. 37-42.
- 64. Мишин, Н.В. Анализ работы вентильного двигателя автономных объектов [Текст] / В.И. Доманов, Н.В. Мишин, А.В. Доманов // Электроника и электрооборудование транспорта. 2013. №1. С. 36-40.
- 65. Мишин, Н.В. Выбор датчика положения ротора для вентильного двигателя. [Текст] / Н.В. Мишин // Материалы 18 Всеукраинской студенческой научнотехнической конференции. Севастополь, 2013.
- 66. Мишин, Н.В. Высокоэффективный сварочный инвертор [Текст] / Н.В. Мишин // Сборник аннотаций проектов Молодежного инновационного форума Приволжского федерального округа. Ульяновск: УлГТУ, 2010. 404 с.

- 67. Мишин, Н.В. Контроль и управление вентильным двигателем [Текст] / Н.В. Мишин // Материалы международной научно технической конференции «Проблемы повышения эффективности электромеханический преобразователей в электроэнергетических системах» Севастополь, 2013.
- 68. Мишин, Н.В. Моделирование электротехнологических процессов с учетом характеристики объекта [Текст] / Н.В. Мишин, К.Е. Карпухин // Проблемы электротехники, электроэнергетики и электротехнологии. Сборник трудов. Тольятти, 2012. 83-88 с.
- 69. Мишин, Н.В. Оценка энергоэффективности системы управления вентильным двигателем автономного объекта [Текст] / Н.В. Мишин // Материалы 18 Всеукраинской студенческой научно-технической конференции. Севастополь, 2013.
- 70. Мишин, Н.В. Повышение энергоэффективности вентильного двигателя [Текст] / Н.В. Мишин, Ю.А. Кравцов, В.И. Доманов // Материалы международной научно технической конференции «Проблемы повышения эффективности электромеханический преобразователей в электроэнергетических системах» Севастополь, 2012.
- 71. Мишин, Н.В. Режимы работы вентильного электропривода автономных объектов [Текст] / В.И. Доманов, Н.В. Мишин, Н.В. Доманов // Труды 7 Международной конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2012. Иваново, 2012. 288-291 с.
- 72. Мишин, Н.В. Синтез и моделирование автономных электромеханических систем [Текст] / В.И. Доманов, Н.В. Мишин, А.В. Доманов, А.В. Сергеев // Электроника и электрооборудование транспорта. 2013. №1. С. 35-39.
- 73. Мишин, Н.В. Системы управления электроприводом [Текст] / В.И. Доманов, Н.В. Мишин // Сборник лабораторных работ для студентов обучающихся по направлению 140400 «электроэнергетика и электоротехника». Ульяновск: УлГТУ, 2013.

- 74. Мишин, Н.В. Универсальные инверторные источники тока [Текст] / В.И. Доманов, Н.В. Мишин // Материалы 17 Всеукраинской студенческой научно-технической конференции Севастополь, 2012. c.84-85.
- 75. Мишин, Н.В. Управление и диагностика автономного электропривода с вычислителями координат [Текст] / В.И. Доманов, Н.В. Мишин, А.В. Доманов // Электроника и электрооборудование транспорта. 2014. №6. С.26-29.
- 76. Мишин, Н.В. Анализ электропривода автономного объекта [Текст] / В.И. Доманов, Н.В. Мишин, Д.С. Халиуллов // Известия самарского научного центра российской академии наук. 2014. Том 16, номер 4(3) С. 600-602.
- 77. Мишин, Н.В. Синтез электроприводов с низкой чувствительностью к параметрическим возмущениям [Текст] / В.И. Доманов, Н.В. Мишин, А.В. Доманов // Электроника и электрооборудование транспорта. 2015. №1. с. 41-43.
- 78. Мишин, Н.В. Электропривод автономного объекта с вентильным двигателем. Патент на изобретение № RU2537957C2 / В.И. Доманов, А.В. Доманов, Н.В.Мишин.
- 79. Мишин, Н.В. Однофазный полумостовой транзисторный инвертор. Патент на изобретение № RU2470451C2 / В.И. Доманов, А.В. Мишин, Н.В.Мишин.
- 80. Мустафа, Мустафа Насраллах Исследование вентильных двигателей со статической коррекцией характеристик для электроприводов малой мощности [Текст]: дис. . канд. техн. наук : 05.09.03 / М.Н. Мустафа; Науч. рук. д-р техн. наук А.Г. Микеров ; Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет им. В.И. Ульянова (Ленина) «ЛЭТИ». СПб. : КопиСервис, 2001. 201 с. : ил.
- 81. Овчинников, И.Е. Вентильные электрические двигатели и привод на их основе (малая и средняя мощность) [Текст]: курс лекций / И.Е. Овчинников: СПб.: КОРОНА-Век, 2007. 336 с.
- 82. Овчинников, И.Е. Электромеханические и мехатронные системы [Текст]: учеб. пособие / И. Е. Овчинников. СПб. : КОРОНА-Век. (Учебное пособие. Для высших учебных заведений). Ч. 1 : Полупроводниковые устройства

- в цепях электрических машин. Коллекторные и бесконтактные двигатели постоянного тока. Конструкции, характеристики, регулирование, динамика разомкнутых систем. 2012. 400 с. : ил
- 83. Овчинников, И.Е. Бесконтактные двигатели постоянного тока [Текст] / И.Е. Овчинников, Н.И. Лебедев. Л. : Наука. Ленингр. отд-ние, 1979. 270 с.: ил.
- 84. Онищенко, Г.Б. Асинхронные вентильные каскады и двигатели двойного питания [Текст] / Г.Б. Онищенко, И.Л. Локтева. М.: Энергия, 1979. 200 с.
- 85. Осин, И.Л. Электрические машины. Синхронные машины [Текст]: учеб. пособие / И. Л. Осин, Ю. Г. Шакарян; под ред. И. П. Копылова. М.: Высш. шк., 1990. 304 с.: ил.
- 86. Попов, А.Н. Новые исследования в теории электропривода постоянного тока [Текст] / А.Н. Попов. – М.: Энергоатомиздат, 2003. Т. 2: Двухмассовые системы, автоматическое регулирование и оптимальное управление. – 464 с.
- 87. Портной, Ю.Т. Об увеличении эффективности систем частотного управления электроприводами [Текст] / Ю.Т. Портной, А.С. Савин // Тр. ВНИИ электромеханики, 1974. с. 41. С. 29-35.
- 88. Самохвалов, Д.В. Коррекция статических характеристик электропривода с вентильным двигателем малой мощности и микропроцессорным управлением [Текст] / Д.В, Самохвалов Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Санкт-Петербург, 2010.
- 89. Сипайлов, Г.А. Электрические машины: Специальный курс [Текст] / Г.А. Сипайлов, Е.В. Кононенко, К.А. Харьков. М.: Высш. шк., 1987. 287 с.
- 90. Соколовский, Г.Г. Особенности использования бесконтактных моментных приводов в системах управления скоростью [Текст] / Г.Г. Соколовский, Ю.В. Постников // Электротехника. 1990. № 4.
- 91. Соколовский, Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием: учебник для студ. высш. учеб. заведений [Текст] / Г.Г. Соколовский. М.: Издательский центр «Академия», 2006. 272 с.

- 92. Столов, Л.И. Моментные двигатели постоянного тока [Текст] / Л.И. Столов, А.Ю. Афанасьев. М.: Энергоатомиздат, 1989. 223 с. : ил.
- 93. Страхов, С.В. Переходные процессы в электрических цепях, содержащих машины переменного тока [Текст] / С.В. Страхов. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1960. 247 с.
- 94. Терехов, В.М. Системы управления электроприводов [Текст]: учебник для студентов вузов / В.М.Терехов, О.И.Осипов; под ред. В.М.Терехова 2-е изд., стер. М.: Издательский центр «Академия», 2006. 304 с.
- 95. Терехов, В.М. Элементы автоматизированного электропривода [Текст]: Учеб. Пособие / В.М. Терехов – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 224 с.
- 96. Тонкаль, В.Е. Многофазные автономные инверторы напряжения с улучшенными характеристиками [Текст] / Е.В. Тонкаль. – Киев, «Наук. Думка», 1980. – С.3-38
- 97. Третьяков, В.С. Оптимальное частотное управление синхронным электроприводом при питании от автономного источника энергии [Текст] / В.С. Третьяков, А.М. Вейнгер, И.М. Серый [и др.] // Электротехника. − 1977. − №6. − С. 34-37.
- 98. Тутаев, Г.М. Математическая модель двигателя двойного питания при векторном управлении Текст. / Г.М. Тутаев, А.Н. Ломакин // Изв. вузов. Электромеханика. 2007. № 5. С. 8-14.
- 99. Уайт, Д.С. Электромеханическое преобразование энергии [Текст]: пер. с англ. [Текст] / Д.С. Уайт, Г.Х. Вудсон. [Текст]. М.; Л.: Энергия, 1964. 528 с.
- 100. Усынин, Ю.С. Системы управления электроприводов [Текст]: Учеб. пособие для вузов [Текст] / Ю.С. Усынин. Челябинск: ЮУРГУ, 2001. 358 с.
- 101. Хрущев, В.В. Электрические машины систем автоматики: учебник для вузов. Второе издание, переработанное и дополненное [Текст] //В.В. Хрущев Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние,1985.

- 102. Черных, И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink [Текст] / И.В. Черных М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. 288 с.
- 103. Чиликин, М.Г. Общий курс электропривода [Текст]: Учебник для вузов / М.Г. Чиликин, А.С. Сандлер. М.: Энергоиздат, 1981. 576 с.
- 104. Шевченко, С.Б. Способы снижения потерь в асинхронном двигателе при векторном управлении [Текст] / С.Б. Шевченко // Электроприводы переменного тока: тр. Международной четырнадцатой науч.-техн. конф. Екатеринбург: ГОУ ВТО УГТУ-УПИ, 2007. С. 153-156.
- 105. Шипилло, В.П. Автоматизированный вентильный электропривод [Текст]: Учеб. пособие / В.П. Шипилло. М., Энергия, 1969. 400 с.
- 106. Юськив, М.Л. Электрооборудование внутризаводского транспорта [Текст]М.Л. Юськив. М.: Энергоатомиздат, 1988.
- 107. A.N. Dianov, A.S. Anuchin, V.F. Kozachenko. Initial Rotor Position Detection Of PM Motors // EPE-PEMC 2004 conference, Riga. Paper 75138.
- 108. Aaltontn M. Direckt Torkue Control of AC motor drives Text. / M. Aaltontn, P. Tiitinen, J. Laku, S. Heikkilla // ABB Review. 1995. № 3. P. 19-24.
- 109. Abraham L. Wechselrichter zur Drehzahlsteuerung von Kafiglaufermotoren Text.
 / L. Abraham, K. Heumann, F. Koppelmann // AEG-Mitt., 1964,Bd. 54, N 1/2, S.89-106.
- 110. Alecksey Anuchin, Anton Dianov, Vladimir Kozachenko., Adaptive Efficient Control for Switch-Reluctance Drives with DCDC-regulator for Inverter Supply // EPE-PEMC 2004 conference, Riga. Paper 71119.
- 111. Betz R.E., Cook B.J. A digital current controller for three phase voltage source inverters // Technical report: EE9702, January 1997.
- 112. Blaschke F. Das Prinzip der Feldorientierung die Grundlage fur die TRANS-VEKTOR-Regelung von Drehfeldmaschinen Text. / F. Blaschke // Siemens-Zeitschrift. 1971. Bd. 45 H. 10. S. 757-760.

- 113. Blaschke, F. The principle of field orientation as applied the new TRANS-VEKTOR closed loop control system for rotating field machines // Siemens Rev., 1972, Vol. 34, May. p. 217-220FreeScale.
- 114. Cerovsky Zdenek. Optimalni regulace napeti asynchronnfho motoru napajeneho promennym kmitoctemText. / Zdenek Cerovsky // «Elektrotechn. obz.», 1973, 62, № 5, 282-288.
- 115. Cerovsky Zdenek. Optimalni zpusoby rizeni asyncronniho stroje v ustalenych stavech Text. / Zdenek Cerovsky, Viktor Valouch // Elektrotechn. obz. 1986, 75, № 9, 503-512.
- 116. Chalmers B.J. Optimum supply conditions for an induction motor Text. / B.J. Chalmers, B.R. Sarkar // «Int. J. Elec. Eng. Educ.», 1970, 8, № 2, 141 143.
- 117. Chen Zhiqian, Tomita Mutuwo, Doki Shinji, Okuma Shigeru. New Adaptive Sliding Observers for Position- and Velocity-Sensorless Controls of Brushless DC Motors // IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.47, No.3, pp.582-591,2000.
- 118. Deepak D. Low-Stress Switching for Efficiency Text. / D. Deepak // IEEE Spectrum. 1996. December. P. 30-33. Drives Conf., 1999, p. 785 787.
- 119. DSP CONTROLLED DRIVES WITH EMBEDDED PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTORS FOR BIPED WALKING ROBOT. Alexander G. Mikerov, Alexander V. Yakovlev, Valentine V. Djanhotoff.
- 120. Floter W. Die Transvektor-Regelung fur den feldorientierten Betrieb einer Asynchronmaschine Text. / W. Floter, H. Ripperger // Siemens-Zeitschrift. 1971. Bd. 45 H. 10. S. 761-764.
- 121. FreeScale. PMSM Vector Control with Single-Shunt Current-Sensing Using MC56F8013/23. DesignReferenceManual. DocumentNumber: DRM102 Rev. 0; 04/2008.
- 122. Fukunda S.Y. Constant margin-cengle control of commutatorless motor using microcomputer Text. / S.Y. Fukunda, S. Sasoka// IEEE Trans. Ind. Appl. 1987. P. 855.

- 123. Garces L. Parameter Adaptation for the Speed-Controlled static AC Drive with Squirrel-Cade Induction Motor Text. / L. Garces // IEEE Trans, on Ind. Appl., 1980. V. IA-16, No. 2. March/April. P.173-178.
- 124. H.Kim, K-K. Huh, M.Harke, J.Wai, R.D. Lorenz, T.MJahns. Initial Rotor Position Estimation for an Integrated Starter Alternator IPM Synchronous Machine // Research report.
- 125. Heumann K. Das Verhalten des Kafiglaufermotors bei veriinderlicher Speisefrequenz und Stromregelung Text. / K. Heumann, K. G. Jordan // AEG-Mitt., 1964,Bd. 54, N 1/2, S. 107-116.
- 126. Holtz J. Pulsewidth modulation a survey Text. / J. Holtz // Proc. Of the PESC'92.1. P.ll-18.
- 127. Hung K.T. A rotor flux error-based, adaptive tuning approach for feedforward field oriented induction machine drives, in Conf Text. / K.T. Hung, R.D. Lorenz // Rec. 1990 IEEE-IAS. Annual Meet. Oct. 1990. P. 589-594.
- 128. Johnson J. P., Ehsani M., Guzelgunler Y. Review of sensorless methods for brushless DC motor // IEEE IAS Annual Meeting, pp. 143-150,1999.
- 129. Kim Hyunbae, Harke M.C., Lorenz R.D. Sensorless control of interior permanent magnet machine drives with zero-phase-lag position estimation // In Proc. Of IEEE IAS Annual Meeting, Pittsburgh, Oct 11-19,2002.
- 130. Kirschen Daniel S. Optimal efficiency control of an induction motor drive Text. / Daniel S. Kirschen, Donald W. Novotny, Thomas A. Lipo // IEEE Trans. Energy Consers. 1987, 2, № 1. P. 70-76.
- 131. Ledwich G. Transient loss minimization for induction motors with variable speed drive Text. / G. Ledwich // J. Elec. and Electron. Eng. Austral. 1987, 7, № 3. P. 190-195.
- 132. Li K.Y. G. Analysis and operation of an invertor-fed variablespeed induction motor Text. / K. Y. G. Li // «Proc. Instn Electr. Engrs» 1969, 116, № 9, 1571-1580.

- 133. Modeling and High-Performance control of electric machines. / J.Chiasson. // IEEE Press Series on Power Eng. 2005. J.Wiley&Sons Inc., Hoboken, New Jersey
- 134. Moreira J.C. A simple and robust adaptive controller for detuning correction in field ariented induction machines Text. / J.C. Moreira, K.T. Hung, T.A. Lipo and R.D. Lorenz // IEEE Trans. Ind. Appl. 1992. Nov / Dec. Vol. 28. №. 6. P. 1359-1366.
- 135. Park Min Ho. Microprocessor-based optimal-efficiency drive of an induction motor Text. / Min Ho Park, Sui Se-ung Ki // IEEE Trans. Ind. Electron. 1984, 31, № 1, P. 69-73.

Приложения

«Утверждаю»:

Генеральный директор

Открытого акционерного общества

«Ульяновский научно-исследовательский и

проектно-технологический институт машиностроения» (ОАО «УНИПТИМАЩ»), почётный машиностроитель РФ,

кандидат технический наук, доцент

В.Е. Быстрицкий

В.Е. Быстрицкий 2016г.

AKT

об использовании результатов диссертационной работы Мишина Николая Владимировича «Разработка и исследование автономного электропривода с низкой чувствительностью к параметрическим изменениям», представленной на

соискание учёной степени кандидата технических наук.

Мы, нижеподписавшиеся, заведующий отделом №40 OAO «УНИПТИМАШ» Халитов М.А. и заведующий отделом №43 OAO «УНИПТИМАШ» Белов А.С., составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы соискателя Мишина Н.В. использованы в документации на создание опытного образца автономной грузоподъёмной тележки.

Использование предлагаемого электропривода позволяет:

- снизить электропотребление;
- реализовать рекуперативное торможение;
- стабилизировать динамические показатели электропривода в различных режимах работы.

Зав. отделом

TIOM Rammel

Халитов М.А.

Зав. отделом

Белов А.С.



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования

«УЛЬЯНОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по научной работе УлГТУ

Н.Г. Ярушкина 2015 г.

AKT

о внедрении результатов диссертационной работы Мишина Н.В. «РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ АВТОНОМНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА С НИЗКОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬЮ К ПАРАМЕТРИЧЕСКИМ ИЗМЕНЕНИЯМ»

в учебном процессе

Мы, нижеподписавшиеся, заведующий кафедрой «Электропривод и автоматизация промышленных установок» кандидат технических наук, доцент Доманов В.И. и декан энергетического факультета кандидат технических наук, доцент Дубов А.Л. составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы соискателя Мишина Н.В. внедрены в разделы лабораторных работ дисциплины «Системы управления электроприводом» по направлению подготовки 140400»Электроэнергетика и электротехника».

Заведующий кафедрой Электропривод и автоматизация промышленных установок

Доманов В.И.

Декан энергетического факультета

Дубов А.Л.