

На правах рукописи

ЛАШКЕВИЧ МАКСИМ МИХАЙЛОВИЧ



**РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ
ЭЛЕКТРОТРАНСМИССИИ С ТЯГОВЫМИ ВЕНТИЛЬНО-
ИНДУКТОРНЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ**

Специальность 05.09.03 – электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва 2013

Работа выполнена на кафедре «Автоматизированного электропривода» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования "Национального исследовательского университета "МЭИ".

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Козаченко Владимир Филиппович

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор, за-
ведующий кафедрой Электротехники и
промышленной электроники Московского
государственного технического универ-
ситета им. Баумана
Красовский Александр Борисович

кандидат технических наук, начальник
центра надежности и режимов работы
энергетических сетей ОАО НТЦ ФСК
ЕЭС
Дроздов Андрей Владимирович

Ведущая организация:

ОАО «Научно-производственная корпо-
рация «Космические системы мониторин-
га, информационно-управляющие и элек-
тромеханические комплексы» имени А.Г.
Иосифьяна».

Защита диссертации состоится 22 ноября 2013 года в 16 час. 00 мин. в аудитории М-611 на заседании диссертационного совета Д 212.157.02 при Московском энергетическом институте по адресу: 111250, Москва, Красноказарменная ул., д.13, корп. М.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО "НИУ МЭИ".

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью, просим отправлять по адресу: 111250, г. Москва, Красноказарменная ул., д.14, Ученый Совет ФГБОУ ВПО «НИУ «МЭИ»

Автореферат разослан « » октября 2013г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 212.157.02

к.т.н., доцент

Цырук С.А

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы.

Работа направлена на создание цифровой распределенной системы управления электротрансмиссии с тяговыми вентильно-индукторными приводами для пневмоколесных машин. Область применения такой электротрансмиссии может быть различной, начиная от грузовиков, троллейбусов и заканчивая многоколесными специализированными тягачами, вездеходами. Под электротрансмиссией в данной работе понимается также и гибридная трансмиссия последовательного типа, где двигатель внутреннего сгорания (ДВС) приводит во вращение генератор, а далее передача энергии к колесам выполняется электрическим путем.

Для тягового применения в настоящее время используются различные двигатели переменного тока вместе с соответствующими силовыми преобразователями. Классические двигатели постоянного тока также все еще имеют свою нишу, но уже большей частью по историческим причинам, а не из-за технической целесообразности. Сравнивая различные электродвигатели переменного тока с точки зрения применения в электротяге, можно выделить следующие преимущества и недостатки каждого из типов двигателей:

Асинхронный двигатель. Относительно прост, надежен, дешев, очень хорошо исследован и освоен в производстве. Имеет проблемы с отводом тепла от ротора, обладает не лучшими массогабаритными показателями.

Синхронный двигатель с постоянными магнитами имеет лучшие массогабаритные показатели, КПД. Хорошо исследован. Дорог и сложен в производстве, существует проблема надежного крепления магнитов при больших частотах вращения. Малая зона постоянства мощности, существует риск перенапряжений при отключении преобразователя в зоне искусственного ослабления поля.

Вентильно-индукторный двигатель с самовозбуждением (SRD). Самый простой, дешевый и технологичный в изготовлении, хорошие массогабаритные показатели, хорошо изучен, имеет большую зону постоянства мощности. Так как имеет однополярное питание, требует специализированного силового преобразователя. Имеет заметные пульсации момента и вибрацию, с которыми разработчики борются различными методами.

Вентильно-индукторный двигатель с независимым возбуждением (ВИД НВ). Дешев, имеет хорошие массогабаритные показатели, имеет большую зону постоянства мощности, малые пульсации момента. Относительно сложен в сборке (при использовании так называемой «опущенной» обмотки возбуждения). Не найдено примеров применения в качестве тягового электропривода.

Из данных сравнительных характеристик видно, что ВИД НВ интересен для применения в качестве недорогого тягового электропривода. Большая зона постоянства мощности за счет наличия независимого возбуждения, отсутствие пульсаций момента при векторном управлении и распределенной обмотке якоря делают его особенно привлекательным для электротяги. Исследование этого типа двигателя, создание системы управления для него, построение на основе данного привода электротрансмиссии является актуальной задачей, решаемой в диссертации.

Диссертационная работа выполнялась в рамках НИР по созданию нового тягового электропривода на базе ВИД НВ для гибридной электротрансмиссии многоколесных транспортных средств. НИР объединил усилия большого количества научных групп, предприятий. Проектирование тяговых двигателей и генератора выполнялось научной группой Русакова А.М. (кафедра «Электротехнические комплексы автономных объектов» НИУ «МЭИ»); проектирование и производство микропроцессорных систем управления, разработка алгоритмов управления двигателями и электротрансмиссией в целом – научной группой Козаченко В.Ф. (каф. АЭП НИУ «МЭИ», ООО "НПФ Вектор", г. Москва) с непосредственным участием автора диссертации; проектирование и производство силовых тяговых преобразователей – научной группой Острирова В.Н. (кафедра АЭП НИУ «МЭИ», ООО "НПП Цикл+", г.Москва); изготовление опытных образцов двигателей, стенда для их испытания – ОАО «Сарапульский электрогенераторный завод», г. Сарапул; тягового генератора – Тушинский машиностроительный завод, г. Москва; изготовление бортовой системы управления (БИУС) – ООО «Технопрактика», г. Москва; изготовление макетного образца гибридного транспортного средства – ООО «ВИЦ» г. Нижний Новгород; испытания проводились на полигоне Научно-исследовательского и испытательного центра бронетанковой техники (НИИЦ БТ), г. Кубинка.

Цель диссертационной работы состоит в синтезе алгоритмов управления вентильно-индукторным двигателем с независимым возбуждением для тягового применения, алгоритмов обеспечения согласованной работы тягового привода и других устройств электротрансмиссии, проверки всех разработанных алгоритмов моделированием и экспериментально.

Достижение поставленной цели потребовало решения **следующих задач**:

- Сравнения ВИД НВ с другими типами двигателей для определения его преимуществ и недостатков, области применения.
- Разработки оптимальной структуры управления ВИД НВ применительно к задачам электротяги.
- Исследования на компьютерной модели разработанной структуры управления.
- Разработки и отладки программного обеспечения для системы управления электродвигателем для встраиваемого микроконтроллера тягового преобразователя.
- Разработки специализированного программного обеспечения для персонального компьютера, обеспечивающего мониторинг динамических процессов в тяговых электроприводах и трансмиссии в целом, позволяющего проводить параметрирование и настройку преобразователей
- Проведения испытаний образцов вентильно-индукторных электродвигателей, обработки результатов испытаний.
- Проведения испытаний электротрансмиссии на основе ВИД НВ на макете транспортного средства.
- Доработки программного обеспечения, модели двигателя и системы управления по результатам испытаний.

Методы исследования. Для решения поставленных в работе задач использовались:

- теория электропривода и цифровых систем управления;
- методы численного моделирования (Simulink MATLAB) с элементами программирования на языке высокого уровня Си;
- компьютерные методы экспериментальных исследований опытных образцов ВИД НВ с использованием датчиков физических величин;
- Разработанное в рамках диссертационной работы специализированное программное обеспечение для осциллографирования процессов, происходящих в электротрансмиссии при испытаниях макетного образца транспортного средства.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Разработана система управления ВИД НВ с зависимым управлением током возбуждения от тока статора и её компьютерная модель.
2. Разработаны алгоритмы, обеспечивающие автономную, согласованную работу всех устройств электротрансмиссии.
3. Разработан алгоритм уменьшения потерь в инверторах напряжения за счет оптимизации коммутаций силовых ключей в векторной ШИМ.
4. Разработана методика испытаний опытных образцов ВИД НВ, позволяющая экспериментально получить зависимость момента двигателя от тока статора и тока возбуждения.
5. Уточнена компьютерная модель ВИД НВ путем учета вихревых токов контура возбуждения, выявленных на испытаниях привода.

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов подтверждена компьютерным моделированием, экспериментальными исследованиями макета привода на лабораторном стенде, экспериментальными исследованиями опытного образца двигателя, ходовыми испытаниями макета гибридного транспортного средства с разработанной системой управления.

Основные положения и результаты, выносимые на защиту:

1. Способ и система управления ВИД НВ, отличающаяся зависимым управлением током возбуждения в функции тока статора и содержащая элементы для обеспечения согласованной работы с другими устройствами электротрансмиссии.
2. Алгоритм уменьшения потерь инвертора напряжения за счет оптимизации коммутаций ключей в векторной ШИМ.
3. Методика испытаний опытных образцов ВИД НВ, позволяющая экспериментально получить зависимость момента двигателя от тока статора и тока возбуждения.
4. Структура компьютерной модели ВИД НВ, учитывающая вихревые токи контура возбуждения ВИД НВ.
5. Комплекс программ для параметрирования, диагностики, сбора и визуализации информации по работе тяговых двигателей и электротрансмиссии в целом.
6. Результаты экспериментальных исследований разработанных алгоритмов и систем управления тяговыми ВИД НВ и электротрансмиссией на их основе.

Основные практические результаты диссертации состоят в разработке компьютерной модели ВИД НВ и его системы управления; в технической реализации системы управления в контроллере преобразователя тягового двигателя; определении характеристик опытных экземпляров тяговых ВИД НВ мощ-

ностью 35кВт; обеспечении ходовых испытаний макета транспортного средства на базе восьми ВИД НВ мощностью 35кВт; в разработке алгоритмов, обеспечивающих автономную согласованную работу всех устройств электротрансмиссии. В работе показана и подтверждена целесообразность использования ВИД НВ для тягового применения.

Соответствие диссертации паспорту специальности.

Диссертация соответствует паспорту специальности 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы.

Апробация работы. Основные результаты работы обсуждались на заседании кафедры «Автоматизированного электропривода» Московского энергетического института, а также на XX Международной научно-технической конференции «Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика», г. Алушта – 2013.

Публикации. Основное содержание диссертационной работы опубликовано в 5 печатных трудах, в том числе в издании, входящем в перечень рекомендованных ВАК РФ по направлению «Энергетика», получен патент.

Структура и объем работы.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 34 пунктов. Содержание работы изложено на 154 страницах машинописного текста, включает 72 рисунка и приложение.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы.

В первой главе произведено сравнение ВИД НВ с другими типами электродвигателей, подробно рассмотрены преимущества и недостатки электродвигателей разных типов применительно к задачам электротяги. Обоснована целесообразность применения ВИД НВ в качестве тягового электродвигателя.

Вентильно-индукторный двигатель с независимым возбуждением (ВИД НВ) также известен как одноименнополюсный индукторный двигатель с аксиальным возбуждением и уже рассматривался во многих работах. Свойства данной машины приближены к классической синхронной машине с возбуждением со стороны ротора и скользящим контактом. Однако конструктивно в рассматриваемой машине обмотка возбуждения расположена на статоре, а скользящий контакт отсутствует. На Рис. 1 схематично показана геометрия ротора и магнитный поток обмотки возбуждения, а на Рис. 2 изображено взаимодействие магнитных потоков статора и ротора, при этом ротор на рисунке установлен в согласованное положение (момент равен нулю).

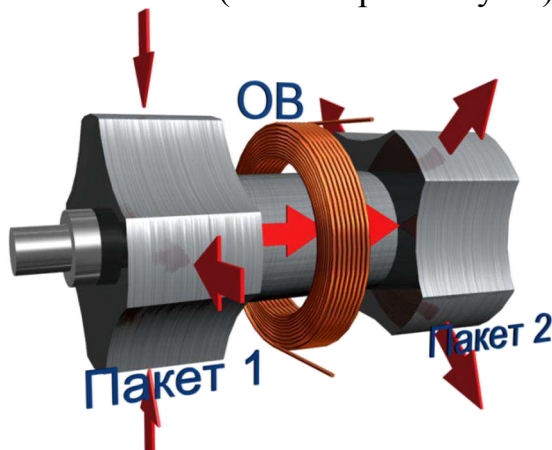


Рис. 1. Геометрия ротора и магнитный поток обмотки возбуждения.

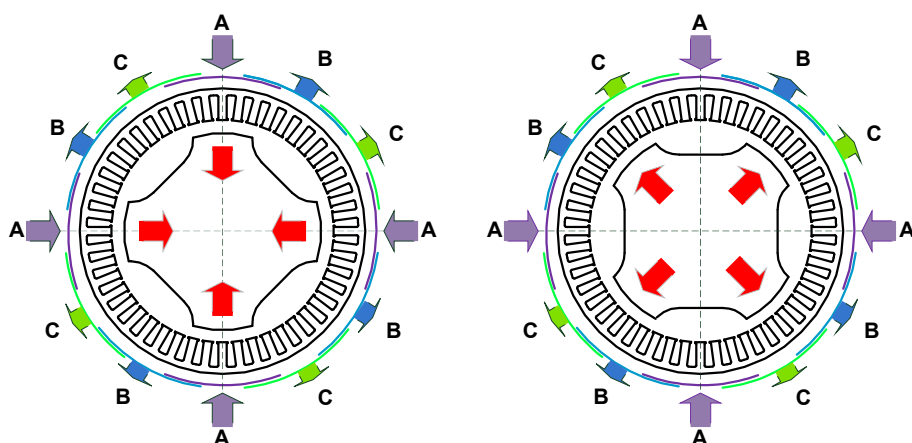


Рис. 2. Взаимодействие магнитных потоков статора и ротора: ротор установлен в точке синхронизации (нулевой момент).

Машина состоит из двух пакетов, между которыми установлена обмотка возбуждения. Ротор и статор выполнены из шихтованного железа, постоянные магниты отсутствуют. Для уменьшения пульсаций момента обмотка статора тягового двигателя выполнена трехфазной распределенной. Витки обмотки статора охватывают сразу оба пакета машины. Следует отметить, что машина подразумевает разнополярное питание, электромагнитный момент активный и образован за счет взаимодействия поля, созданного током обмотки возбуждения с полем, созданным обмотками статора. По принципу работы эта машина отличается от классических вентильно-индукторных двигателей с самовозбуждением (SRD), в которых момент реактивный. С точки зрения управления машина эквивалентна синхронной машине с контактными кольцами, позволяя независимо регулировать ток статора и ток возбуждения.

Преимущества ВИД НВ: отсутствие скользящего контакта; относительная простота и низкая стоимость изготовления; управляемое возбуждение, широкий диапазон постоянства мощности; отсутствие перемагничивания ротора, а, следовательно, и отсутствие потерь в нем – большая часть потерь выделяется на статоре, а с него отводить тепло проще вследствие хорошей теплопроводности; применение для управления машиной тех же алгоритмов, которые классически используются для синхронных машин (векторное управление); использование стандартного трехфазного инвертора в управляющем преобразователе; нет риска повреждения силового преобразователя из-за возникновения завышенной ЭДС двигателя при работе в зоне ослабления; за счет распределенной обмотки статора пульсации момента на валу и вибрации практически отсутствуют.

Имеется более чем 10 летний опыт успешной промышленной эксплуатации приводов ВИД НВ мощностью 315-1250 кВт с сосредоточенной катушечной обмоткой статора, разработанных в России (Русаков А.М., Остриров В.Н., Козаченко В.Ф., Дроздов А.В., Алямкин Д.И.). Эти двигатели используются для объектов ЖКХ в качестве привода сетевых насосов, дутьевых вентиляторов, дымососов. В диссертации показано, что применительно к тяговому приводу целесообразен переход от сосредоточенной к распределенной обмотке статора и существенное сокращение числа зубцов на роторе (до 4-х), что минимизирует пульсации момента и шумы, снижает частоту токов в обмотках статора, расширяя диапазон регулирования скорости.

Несмотря на обилие преимуществ, ВИД НВ имеет ряд недостатков. В данном типе двигателей следует применять специальные меры для предотвращения замыкания магнитного потока возбуждения по подшипниковым щитам, в обход магнитопровода статора. Также существует проблема, связанная с отво-

дом тепла от обмотки возбуждения, расположенной между пакетами ротора – площади контакта её со статором может быть недостаточно, чтобы отводить выделяющееся в ней тепло. Требуется принимать специальные конструктивные меры для улучшения теплоотдачи, либо для уменьшения потерь в обмотке.

Несмотря на указанные недостатки ВИД НВ (которые могут быть конструктивно устранены при дальнейшем развитии данного привода), этот тип электродвигателя является перспективным для тягового применения, требует дальнейшего изучения и синтеза системы управления, оптимальной для этой сферы применения.

Далее в главе диссертации сформулированы цели и задачи работы.

Во второй главе предложен типовой состав оборудования электротрансмиссии для гибридного колесного транспортного средства на базе ВИД НВ. На Рис. 3 приведен пример архитектуры гибридной трансмиссии последовательного типа с индивидуальным приводом колес.

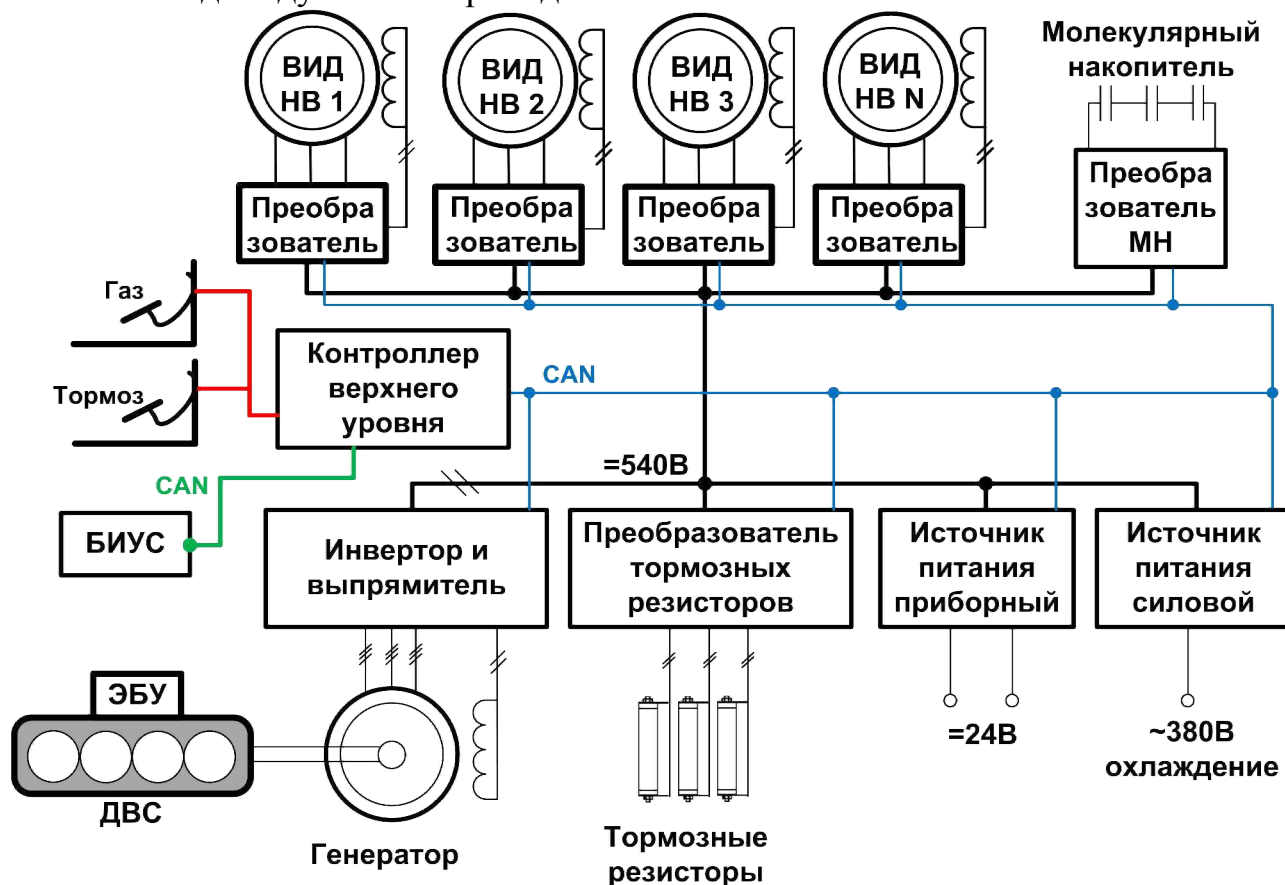


Рис. 3. Пример архитектуры гибридной трансмиссии последовательного типа с индивидуальным приводом колес.

В состав трансмиссии входят:

- ВИД НВ – несколько вентильно-индукторных двигателей с независимым возбуждением, по числу колес.
- Преобразователь для ВИД НВ – инвертор напряжения с микропроцессорным управлением. Преобразователи подключаются к общему звену постоянного тока.
- Молекулярный накопитель (суперконденсатор, ионистор). Вместо молекулярного накопителя может использоваться аккумуляторная батарея, например, литий-ионного типа.

- Преобразователь молекулярного накопителя - DC/DC преобразователь, обеспечивающий двунаправленный обмен энергией между накопителем и звеном постоянного тока.
- Двигатель внутреннего сгорания (ДВС), приводящий во вращение тяговый генератор.
- Преобразователь генератора, содержащий выпрямитель и (опционально) инвертор для возможности рассеивания энергии торможения в ДВС, а также обеспечения стартерного режима ДВС.
- Тормозные резисторы – резисторы для приема энергии торможения.
- Преобразователь тормозных резисторов для управления уровнем рассеиваемой в резисторах энергии.
- Источники питания приборный и силовой – опционально могут быть установлены для служебных нужд, системы охлаждения.
- Контроллер верхнего уровня (КВУ) – осуществляет управление всей электротрансмиссией, обрабатывает педали газа и тормоза, селектора направления движения, осуществляет связь с БИУС.
- БИУС – бортовая информационно-управляющая система. Осуществляет отображение текущих параметров пользователю, заведует включением/выключением различных режимов работы, устройств по выбору пользователя, управляет светотехникой, навигацией и т.п.

Те или иные блоки могут отсутствовать в зависимости от требований, предъявляемых к транспортному средству, однако общий подход сохраняется – трансмиссия рассматривается как совокупность автономно работающих силовых преобразователей объединенных по локальной промышленной шине.

Далее в работе производится выбор базовой системы управления для ВИД НВ. Выбор осуществляется между системой управления, реализующей автокоммутацию фаз двигателя по датчику положения ротора с токоограничением и векторной системой управления – для реализации предложена векторная система управления. Приведена ее структура, в которой на вход подаются задания токов I_q , I_d , I_f – моментобразующего тока статора, тока статора для ослабления поля, тока возбуждения.

Производится сравнительный анализ различных возможностей управления тяговым приводом от системы управления верхнего уровня: задание частоты вращения, задание уровня тока, задание мощности, задание момента. Обосновывается выбор способа управления заданием момента привода, как наиболее рационального.

Синтезируется структура, осуществляющая преобразование задания момента в задания токов I_q , I_d , I_f , необходимых для векторной структуры управления. Самым главным вопросом при синтезе этой структуры является совместное управление током статора I_q и током возбуждения I_f . В работе показывается, что традиционный режим ослабления поля, когда до определенной частоты ток возбуждения I_f сохраняется постоянным, а после определенной частоты вращения начинает уменьшаться, не подходит. Единственно-возможным для проектируемых ВИД НВ является пропорциональное изменение тока статора и тока возбуждения: осуществление программной имитации машины последовательного возбуждения. Таким образом, синтезируемая структура должна из задания момента $M_{\text{зад}}$, полученного от системы верхнего уровня, сформировать

ровать пропорциональные друг другу задания токов $i_{q_зад}$ и $i_{f_зад}$, что в относительных единицах выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} i_{q_зад}^* = \text{sign}(M_{зад}^*) \cdot \sqrt{|M_{зад}^*|} \\ i_{f_зад}^* = \sqrt{|M_{зад}^*|} \end{cases} \quad (1)$$

При больших заданиях момента может сложиться ситуация, когда регуляторы токов не смогут воспроизвести задание тока по оси q из-за нехватки напряжения на инверторе. В этом случае фактическое значение тока статора окажется меньше заданного – будет нарушена пропорциональность между током статора и током возбуждения, что ухудшит характеристики привода. Для противодействия этому необходимо формировать задание тока возбуждения выбирая минимум из текущего тока статора и задания возбуждения, рассчитанного из значения момента:

$$i_{f_зад}^* = \min\left(i_q^*, \sqrt{|M_{зад}^*|}\right) \quad (2)$$

В синтезируемую структуру заложены дополнительные функции, в том числе осуществляющие согласованную работу тяговых двигателей с другим оборудованием электротрансмиссии:

- Ограничения заданного момента при выходе напряжения в звене постоянного тока преобразователя за допустимые пределы (подробнее будет рассматриваться далее).
- Ограничения максимальной частоты вращения привода для обеспечения безопасности. Для этого постобработкой ограничено задание момента при достижении приводом большой частоты вращения. Предложено ограничивать только тяговый момент, но не тормозной. Это позволяет останавливать привод с любой начальной скорости, например, при спуске под уклон.

Еще одна решенная задача – расширение диапазона регулирования частоты вращения вверх за счет управления током по оси d . Ток оси d не влияет на момент двигателя, однако создание отрицательного тока оси d позволит уменьшить прикладываемое к двигателю напряжение, не уменьшив при этом момент. А значит, при нехватке напряжения на инверторе на высокой частоте вращения создание отрицательного тока по оси d позволит реализовать заданный момент, несмотря на первоначальную нехватку напряжения. Такой метод называется ослаблением поля двигателя током статора и успешно применяется для синхронных машин с постоянными магнитами, для которых этот метод является единственно возможным при работе на высокой скорости. Для ВИД НВ этот метод нужен лишь для увеличения максимальной мощности в зоне высоких скоростей.

На Рис.4 показана синтезированная в соответствии с вышеизложенным структура для предварительной обработки задания момента.

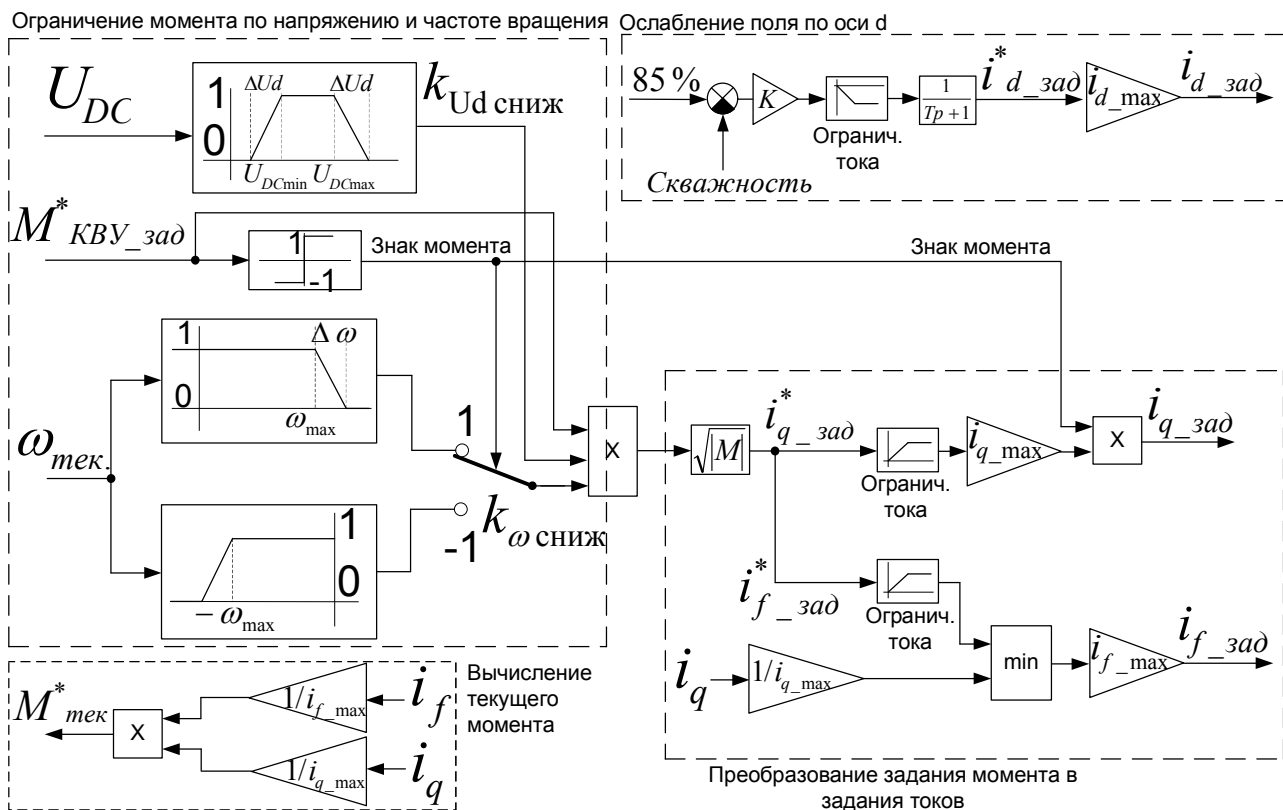


Рис.4. Структура предварительного обработки задания момента

$M_{КВУ_зад}^*$ – заданный момент в относительных единицах, поступает через интерфейс связи от КВУ персонально каждому приводу. Ограничение момента по напряжению и частоте вращения происходит за счет вырабатывания двух коэффициентов ослабления задания момента:

$k_{Ud_сниз}$, равного единице в номинальном диапазоне изменения напряжения звена постоянного тока U_{DC} , линейно уменьшающегося до нуля при понижении напряжения ниже уставки U_{DCmin} и повышении напряжения выше уставки U_{DCmax} .

$k_{\omega_сниз}$, равного единице в номинальном диапазоне частоты вращения, линейно уменьшающегося до нуля при понижении частоты вращения ниже $-\omega_{max}$ при отрицательном задании момента и повышении частоты вращения выше ω_{max} при положительном задании момента.

Далее полученные коэффициенты ослабления момента умножаются на переданный через интерфейс связи заданный момент $M_{КВУ_зад}^*$, после чего результат подается на структуру преобразования задания момента в задания токов.

Структура ослабления поля за счет создания тока по оси d контролирует текущий процент использования напряжения инвертором, выраженный величиной «Скважность». Если она становится выше 85%, т.е. практически весь запас по напряжению на инверторе исчерпан, формируется отрицательное задание тока оси d, повышаясь с ростом скважности. На 85% задание тока оси d равно нулю, а к 100% повышается до максимального. Чтобы исключить колебательный процесс, который может появиться из-за быстрой реакции регуляторов тока на изменение задания тока по оси d, задание пропущено через инерционное звено первого порядка с постоянной времени, на порядок большей времени реакции регуляторов тока.

Синтезированная структура является надстройкой над традиционной векторной системой управления и обеспечивает возможность успешного применения ВИД НВ в электротяге.

Далее в главе рассматриваются разные подходы к построению взаимосвязи между различными устройствами электротрансмиссии. Обосновывается принцип обеспечения согласованной работы всего оборудования электротрансмиссии, базирующийся на программном изменении функционирования устройств в зависимости от уровня напряжения в звене постоянного тока. Каждое устройство пытается реализовать свое задание, но в определенном коридоре напряжений звена постоянного тока (ЗПТ). Если напряжение приближается к границе, то устройство начинает автоматически сбрасывать свое задание. Выбраны следующие координаты управления каждым устройством (из показанных на Рис. 3) – задания, которое устройство получает от контроллера верхнего уровня:

- Преобразователь тягового двигателя: задание момента.
- Преобразователь генератора: задание напряжения ЗПТ.
- Преобразователь молекулярного накопителя: задание напряжения ЗПТ.
- Преобразователь тормозных резисторов: нет задания от КВУ. Работает полностью автономно.
- Источники питания: нет задания от КВУ. Работают полностью автономно.

Далее для визуализации принципа согласования работы устройств обратимся к Рис. 5, где показаны зоны работы в зависимости от напряжения постоянного тока для каждого из устройств. На рисунке приведены шесть диаграмм, для каждого из типов устройств, где по оси ординат отложено напряжение в звене, а по оси абсцисс – регулируемая алгоритмом величина, уменьшение которой приводит к уменьшению отдаваемой/принимаемой устройством мощности. Для двигателя и генератора это момент, для тормозных резисторов это скважность (прикладываемое к резисторам напряжение), для источников питания и молекулярного накопителя это непосредственно мощность.

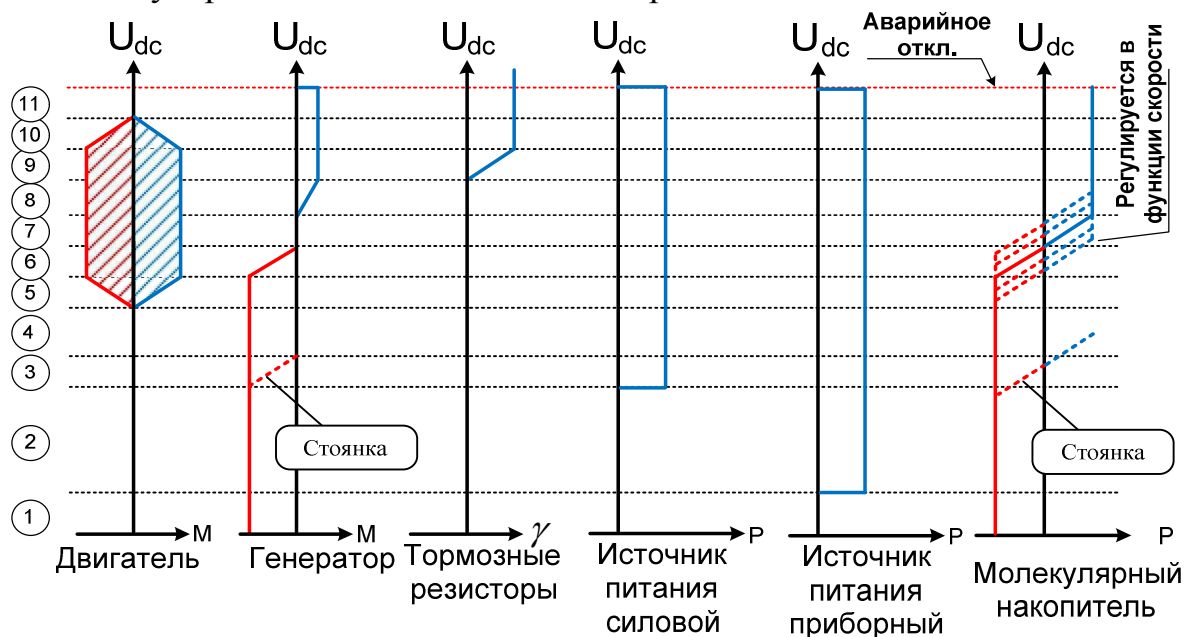


Рис. 5. Работа устройств электротрансмиссии в зависимости от напряжения звена постоянного тока: принцип максимальной автономности

Так, в обычном режиме движения транспортного средства напряжение в звене постоянного тока находится в зоне, отмеченной на рисунке номером 6. В

этой зоне генератор от верхнего края зоны 6 до нижнего края зоны 6 линейно увеличивает свой момент (мощность, отбираемую от ДВС), поддерживая таким образом напряжение ЗПТ в границах зоны 6. Эта функция реализована непосредственно в контроллере преобразователя генератора и реализуется автономно, например, за счет управления возбуждением генератора. Контролер верхнего уровня может лишь управлять уставной заданного напряжения. Точно также в этой зоне стабилизирует напряжение преобразователь молекулярного накопителя (аккумулятора). Тяговые двигатели в зоне 6 могут реализовывать любой заданный контроллером верхнего уровня момент, как положительный, так и отрицательный. При потреблении двигателями большей энергии, чем могут выдать генератор и преобразователь накопителя, напряжение в звене постоянного тока будет понижаться. Когда напряжение попадает в зону 5, тяговые двигатели линейно снижают свой момент (а значит и мощность), независимо от того, какой момент задан контроллером верхнего уровня. Генератор и накопитель энергии в зоне 5 уже отдают свою максимальную мощность. Такой алгоритм не позволит тяговым двигателям опустить напряжение в звене постоянного тока слишком сильно, что привело бы к невозможности генератору и преобразователю накопителя развить полную мощность и привело бы к отключению источников питания, также работающих от напряжения звена постоянного тока. Таким образом, при интенсивном потреблении энергии (разгон транспортного средства) напряжение стабилизируется в зоне 5, где потребляемая двигателями энергия и отдаваемая генератором и накопителем выравниваются.

При рекуперативном торможении напряжение в звене постоянного тока начнет повышаться, так как двигатели начинают отдавать энергию торможения. Начиная с нижнего края зоны 7 преобразователь молекулярного накопителя начинает автоматически принимать энергию торможения. На верхней границе напряжения зоны 7 он выходит на полную мощность приема энергии. Если двигатели генерируют большую мощность, чем может принять накопитель, напряжение продолжит расти. В зоне 8 преобразователь генератора, если он оснащен блоком инвертора, начнет увеличивать свой двигательный момент, вращая ДВС и рассеивая энергию торможения (режим торможения дизелем). Если этой мощности (накопитель + генератор в двигательном режиме) будет недостаточно, то напряжение будет повышаться дальше, где в зоне 9 к рассеянию энергии подключатся тормозные резисторы. В случае же продолжения роста напряжения еще выше, в зоне 10 тяговые двигатели будут снижать свой момент, пока генерируемая и принимаемая мощности не сравняются. Источники питания при этом работают автономно и отдают ту мощность, какую расходуют их потребители.

Таким образом, следуя приведенным алгоритмам, все устройства электротрансмиссии будут автоматически регулировать уровень своей мощности в зависимости от напряжения в звене постоянного тока. Контроллер верхнего уровня может задавать любые моменты на каждый тяговый двигатель, не заботясь о режимах работы генератора, накопителя, тормозных резисторов и уровне напряжения. Система автоматически перераспределяет все потоки энергии, не требуя специального высокоскоростного интерфейса связи. Даже при отказе/сбое штатного интерфейса связи, например, у преобразователя генератора,

накопителя, тормозных резисторов – они могут выполнять свои функции автономно, не ухудшая показателей работы.

Все описанные выше алгоритмы реализованы в контроллерах системы управления электротрансмиссией. Так, функция снижения момента тягового двигателя в зависимости от напряжения звена постоянного тока была показана в структуре Рис.4.

В главе предложен ряд мер по повышению энергоэффективности тяговых приводов за счет уменьшения потерь в инверторах преобразователей. Первый метод основан на изменении частоты ШИМ в зависимости от уровня тока статора двигателя. Второй метод направлен на уменьшение динамических потерь IGBT ключей и основан на возможности реализовать в векторной ШИМ одно и то же выходное напряжение двумя разными способами (за счет использования разных нулевых векторов). На Рис. 6 показаны два варианта коммутации силовых ключей шестиключевого инвертора напряжения на одном периоде векторной ШИМ, которые при соответствующих скважностях дают одинаковое выходное напряжение, но используют разный нулевой вектор.

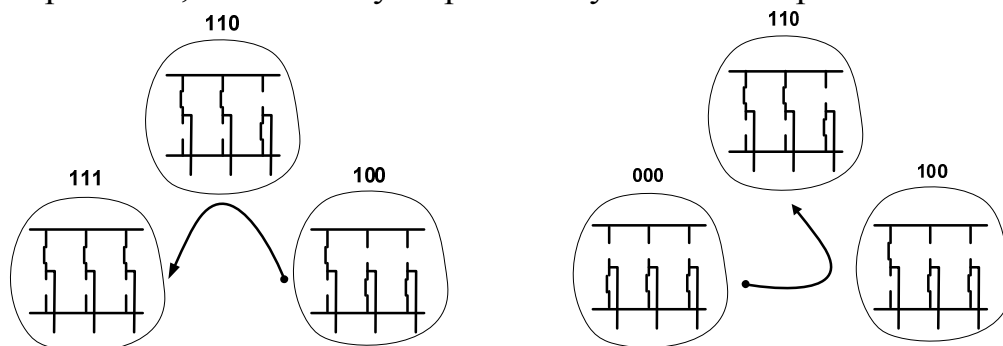


Рис. 6. Две различные схемы перебора базовых векторов инвертора при использовании различных нулевых векторов (111 и 000)

Так, на рисунке слева не коммутируется первая стойка инвертора, а на рисунке справа не коммутируется последняя. Алгоритм снижения потерь анализирует токи фаз инвертора и не коммутирует ту стойку, где ток больше.

В третьей главе разрабатывается компьютерная модель тягового двигателя и его системы управления для проверки работоспособности синтезированных структур управления. Целью моделирования является проверка работоспособности и устойчивости системы управления в различных режимах: при работе без достижения ограничений по току, напряжению, частоте вращения; при работе в условиях нехватки питающего напряжения; при работе в условиях ограничения максимальной частоты вращения; при рекуперации в условиях работы блока ограничения напряжения в звене постоянного тока.

Приводится уточненная модель ВИД НВ: в процессе испытаний (описанных в последней главе) обнаруживается новое свойство двигателей – влияние вихревых токов на контур возбуждения, в результате чего поток машины регулируется медленно. Показано, как дорабатывается уже существующая математическая модель двигателя в соответствии с полученными результатами. На Рис. 7 показана структурная схема линейной модели ВИД НВ с учетом контура вихревого тока. Приводятся соответствующие результаты моделирования в пакете MATLAB/Simulink, подтверждающие работоспособность структур управления во всех основных режимах.

процессы при работе электротрансмиссии. Эти программные средства активно использовались при проведении экспериментальных исследований.

Пятая глава описывает обширные экспериментальные исследования разработанной системы управления, двигателя ВИД НВ, ходовые испытания макета транспортного средства. Сначала система управления испытывается на лабораторном макете привода, состоящем из преобразователя мощностью 7.5 кВт и прототипа тягового ВИД НВ с сосредоточенными обмотками фаз. Преобразователь содержит контроллер с разработанным ПО. Испытания подтверждают базовую работоспособность ПО и алгоритмов управления. Также на лабораторном стенде проверяется алгоритм снижения потерь в инверторе за счет оптимизации векторной ШИМ: уменьшение динамических потерь в ключах составило 16%, что совпадает с результатами моделирования.

Следующие испытания проводятся на заводе-изготовителе тяговых двигателей в г. Сарепул. Двигатели ВИД НВ мощностью 35 кВт управляются от специализированного силового преобразователя аналогичной мощности, также содержащего контроллер с разработанным ПО. Система управления и двигатели испытываются на холостом ходу во всем диапазоне частот вращения. Обнаруживается проблема вихревых токов контура возбуждения ВИД НВ, замедляющая регулирование потока возбуждения машины. Разрабатывается методика испытаний тяговых двигателей при заторможенном роторе и ПО поддержки испытаний. Полученные экспериментальные зависимости электромагнитного момента ВИД НВ от тока статора и тока возбуждения сравниваются с данными разработчика двигателей – Рис. 8, слева. Сравнение опытных данных с расчетными показывает практически полную идентичность характеристик, тем самым подтверждаются расчетные данные разработчиков двигателя.

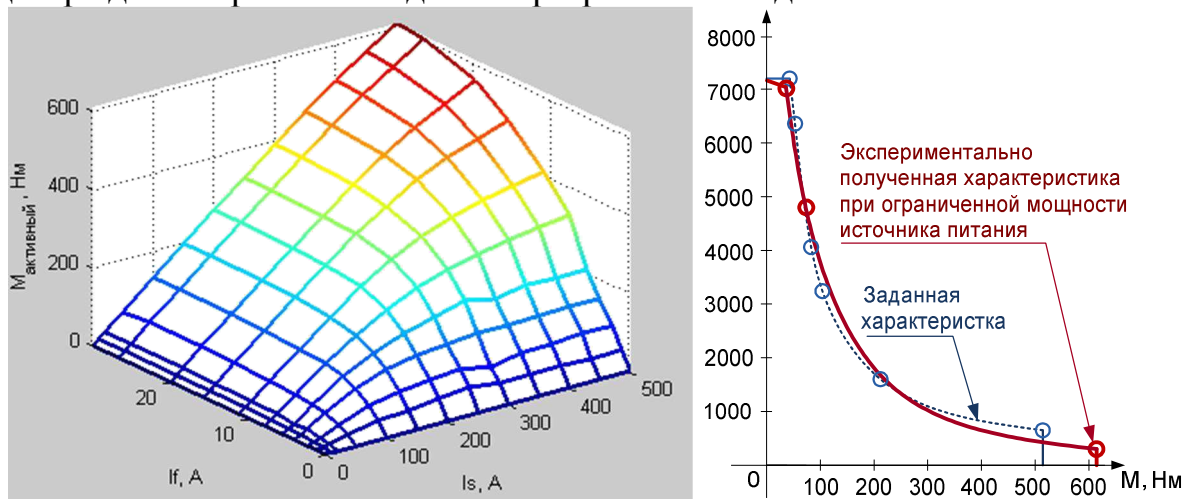


Рис. 8. Слева: Экспериментально полученная поверхность зависимости момента ВИД НВ 35кВт от амплитуды тока статора I_s и тока возбуждения I_f при оптимальной фазе тока статора.

Справа: Экспериментально полученная тяговая характеристика ВИД НВ 35кВт при питании от источника ограниченной мощности в сравнении с заданной

Третий вид экспериментальных исследований – испытания электротрансмиссии в целом на макете транспортного средства (Рис. 9).



Рис. 9. Внешний вид макета транспортного средства, на котором испытывалась разработанная электротрансмиссия

- Масса – 22т
- Макс. скорость – 97 км/ч
- Угол преод. подъема – 30°
- Возможность разворота на месте
- Функции АБС, ПБС

Описываются параметры макетного образца транспортного средства: масса 22 тонны, восемь двигателей ВИД НВ по 35 кВт (на каждое колесо), ДВС мощностью 300 кВт, приводящий во вращение генератор типа ВИД НВ с сосредоточенными обмотками, молекулярный накопитель энергии мощностью 80 кВт, источники питания. В процессе испытаний получены следующие результаты:

- Макетный образец достиг максимальной скорости 97 км/ч на взлетно-посадочной полосе аэродрома.
- Преодолен подъем 30 градусов на бетонном покрытии.
- Успешно проверены все специальные режимы: движение «от молекулярного накопителя» с заглушенным ДВС, запуск ДВС от генератора, режим «торможения дизелем», накопление энергии торможения в молекулярный накопитель, танковый разворот машины на месте.
- Измерена топливная экономичность: она оказалась почти в полтора раза лучше, чем у прототипа с механической трансмиссией.

По результатам ходовых испытаний построена тяговая характеристика двигателей ВИД НВ, показанная в сравнении с заданной в ТЗ на Рис. 8, справа. Экспериментальная характеристика в некоторой зоне проходит ниже заданной вследствие ограниченной мощности источника питания, а не ограничений двигателя или преобразователя. Большой максимальный момент достигнут вследствие увеличения токов на 10% по сравнению с расчетными, так как номинального момента не хватало для преодоления подъема 30 градусов из-за сильной пробуксовки передних четырех колес. Видно, что получен широкий диапазон работы в зоне постоянства мощности равный 10:1.

На Рис. 10 представлена одна из осциллограмм, в которой комплексно продемонстрирована работа всей электротрансмиссии. На ней происходит разгон макетного образца до 60 км/ч и последующее электрическое и механическое торможение. Осциллограмма получена при помощи разработанного ПО для персонального компьютера из данных, пересылаемых силовыми преобразователями. На осциллограмме в верхней части приведены частоты вращения тяговых двигателей, мощности, токи статора и возбуждения, текущий момент. При этом графики всех 8-ми двигателей наложены друг на друга. На нижней части осциллограммы приведена частота вращения ДВС, заряд молекулярного накопителя в процентах, напряжение на звене постоянного тока, мощность молекулярного накопителя, мощность тягового генератора.

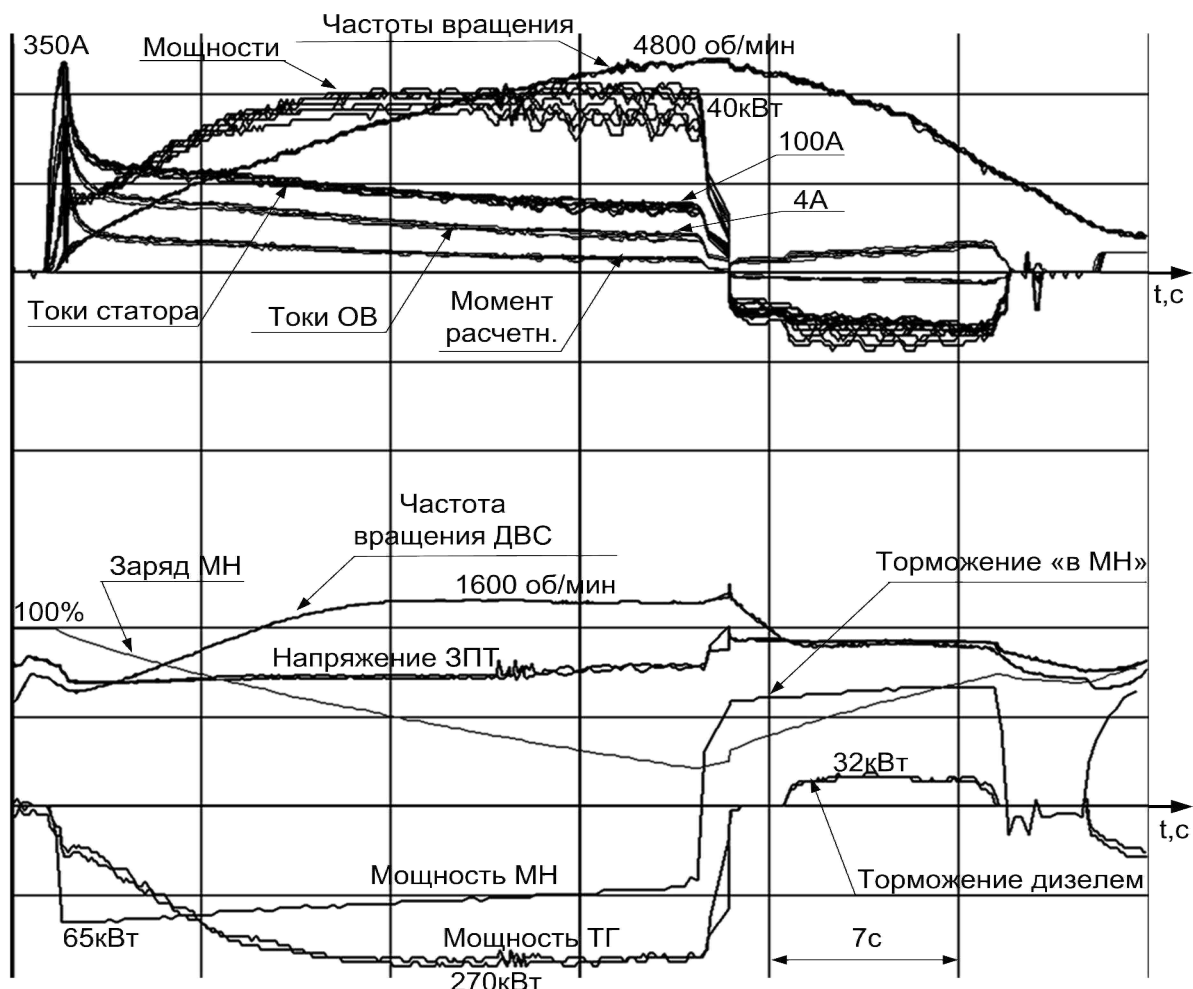


Рис. 10. Осциллограмма разгона макетного образца и последующее торможение

При разгоне мощности накопителя и генератора отрицательны, что говорит об отдаче ими энергии, а мощность двигателей положительна, что говорит о потреблении энергии. Мощность накопителя составляла 65 кВт, генератора 265-270 кВт. При торможении знаки мощности меняются – двигатели отдают энергию, накопитель и генератор принимают энергию. При этом накопитель мгновенно переходит из режима отдачи энергии в режим приема, а генератор, из-за инерционности контура возбуждения, сначала плавно снижает отдаваемую мощность, а затем переходит в двигательный режим. При этом мощность приема энергии накопителем составляет 65 кВт, а генератором 32 кВт рассеиваемой в ДВС мощности. На данной осциллограмме комплексно продемонстрирована работа всей электротрансмиссии:

- Пропорциональное изменение тока статора и тока возбуждения тяговых двигателей. Так, в начале разгона значения тока статора и возбуждения были равны 350 А и 15 А, в конце разгона 100 А и 4 А соответственно.
- Автоматическое снижение момента двигателей при снижении напряжения в звене постоянного тока. Это позволяет двигателям всегда отбирать всю доступную мощность, а напряжению находиться в допустимом диапазоне. При трогании с места напряжение в звене постоянного тока «просело» с 540 до 510 В и сохранялось на данном уровне в процессе всего разгона, при этом генератор повышал свою мощность с разгоном ДВС.
- Автоматическое снижение момента двигателей при повышении напряжения в звене постоянного тока. После окончания разгона водитель применил электрическое торможение, в результате чего напряжение в звене постоянного

тока поднялось до 600 В за счет рекуперации энергии и ограничивалось на этом уровне алгоритмами управления тяговыми двигателями. При этом молекулярный накопитель и генератор (который работал в двигательном режиме) забирали такую мощность, которую имели возможность забрать.

- Осциллограммы токов и мощностей всех восьми тяговых двигателей наложены друг на друга и с определенной долей погрешности совпадают. Это говорит о единой настройке преобразователей, датчиков положения, малом разбросе параметров двигателей.
- Можно проследить за автоматической работой генератора, молекулярного накопителя. Они автоматически переходили из режима отдачи энергии в режим приема энергии, изменяли свою мощность в соответствии с разработанными алгоритмами согласованной работы устройств по напряжению ЗПТ.

Далее в главе описываются проблемы, с которыми пришлось столкнуться в процессе испытаний и методы их устранения: наличие вихревых токов в контуре возбуждения ВИД НВ, введение автоматической калибровки датчиков напряжения постоянного тока, улучшение устойчивости на большой частоте вращения двигателей, устранение перенапряжений генератора ВИД НВ при резком сбросе нагрузки.

В заключении обобщены основные результаты работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработана структура системы управления тяговым ВИД НВ с зависимым управлением током возбуждения от тока статора, программно **имитирующая машину последовательного возбуждения**. Структура проверена моделированием в пакете MATLAB/Simulink и подтверждена экспериментальными исследованиями. Получен **диапазон работы привода в зоне постоянства мощности равный 10:1**.
2. Разработаны и проверены экспериментально алгоритмы, обеспечивающие согласованную и автономную работу всех устройств электротрансмиссии на основе изменения поведения устройств в зависимости от текущего напряжения в звене постоянного тока.
3. **Разработана компьютерная модель тягового ВИД НВ**, учитывающая влияние вихревых токов контура возбуждения, выявленных при испытаниях опытных образцов ВИД НВ.
4. Синтезированы энергосберегающие алгоритмы, уменьшающие потери в инверторе за счет оптимизации векторной ШИМ. Согласно моделированию и лабораторным испытаниям на макете привода **динамические потери в ключах инвертора уменьшаются на 16%**.
5. Разработано низкоуровневое программное обеспечение для микроконтроллера силового преобразователя, реализующее синтезированные для управления ВИД НВ алгоритмы.
6. Разработан комплекс специальных программных средств исследования привода и электротрансмиссии, позволяющий производить параметрирование и **осциллографирование работы всех устройств**, входящих в распределенную систему управления электротрансмиссии.
7. **Разработана методика испытаний тяговых ВИД НВ**, структура экспериментального стенда. Проведены экспериментальные исследования разрабо-

танной СУ и опытных образцов тяговых двигателей ВИД НВ мощностью 35кВт. Получена экспериментальная зависимость выходного момента двигателя от тока статора и тока возбуждения, тяговая характеристика, согласующаяся с теоретическим расчетом.

8. **Проведены ходовые испытания макета 8-и колесного транспортного средства** массой 22 тонны на основе электротрансмиссии с ВИД НВ. На макете проверены все разработанные алгоритмы и программное обеспечение в составе электротрансмиссии. Макетный образец показал максимальную **скорость 97 км/ч**, преодолел **подъем 30 градусов**, продемонстрировал режим разворота на месте и высокую топливную экономичность. Все заложенные в систему управления идеи себя оправдали, хотя и потребовали некоторых доработок по ходу испытаний.

Вывод. Двигатели ВИД НВ с разработанной системой управления и тяговые привода на их основе доказали свою перспективность в электрической тяге. Имеет смысл продолжать исследования в этой области: экспериментально получить тяговую характеристику ВИД НВ на лабораторном стенде, вычисляя КПД двигателя и преобразователя во всех точках, провести испытания на нагрев. С точки зрения улучшения системы управления стоит приложить усилия для синтеза бездатчикового векторного управления двигателями с возможностью определения положения ротора вплоть до нулевой частоты вращения.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Лашкевич М. М. Применение регулятора тока нулевой последовательности для векторного управления трехфазным двигателем // **Электричество – М.: ЗАО "Знак", 2013. - №1. – с.40-42.**
2. Пат. 2428784 РФ, МПК H02P6/18, H02P21/13. Способ бездатчиковой оценки углового положения ротора многофазного электродвигателя // Ионов Алексей Александрович (RU), Зеленин Дмитрий Вадимович (RU), Козаченко Владимир Филиппович (RU), Алямкин Дмитрий Иванович (RU), Лашкевич Максим Михайлович (RU) - опубл. 10.09.2011.
3. Алямкин А.И., Козаченко В.Ф., Лашкевич М.М. и др. Разработка мощного синхронного электропривода с бездатчиковым векторным управлением // Тематический выпуск «Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика» научно-технического журнала «ЭЛЕКТРОИНФОРМ». – Львов: ЕКОинформ, 2009. – С. 104 – 105.
4. Алямкин Д.И., Лашкевич М.М., Средства мониторинга и отладки сложных многопроцессорных приводов, объединенных промышленной сетью // Специальный выпуск «Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика», вестника Национального технического университета «Харьковский политехнический институт» – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2013. – С. 462 – 463.
5. Козаченко В.Ф., Лашкевич М.М., Вентильно-индукторный электропривод с независимым возбуждением для тягового применения // **Электротехнические и компьютерные системы — 2011.— № 03(79).— С. 103—108**

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО
ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
"НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ "МЭИ"

На правах рукописи

ЛАШКЕВИЧ МАКСИМ МИХАЙЛОВИЧ

**РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ
ЭЛЕКТРОТРАНСМИССИИ С ТЯГОВЫМИ ВЕНТИЛЬНО-
ИНДУКТОРНЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ**

Специальность 05.09.03 – электротехнические комплексы и системы

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Козаченко В.Ф.

Москва 2013

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|---|------------|
| Введение | 3 |
| Глава 1. Обзор и сравнение различных типов электродвигателей для применения в качестве тяговых | 12 |
| Глава 2. Разработка алгоритмов и структур управления ВИД НВ | 26 |
| 2.1 Состав целевой электротрансмиссии | 26 |
| 2.2 Параметры опытного тягового двигателя ВИД НВ и его преобразователя | 28 |
| 2.3 Выбор типа системы управления для ВИД НВ | 33 |
| 2.4 Структура векторной системы управления | 37 |
| 2.5 Выбор координаты управления приводом | 39 |
| 2.6 Разработка структуры предварительной обработки задания | 43 |
| 2.7 Взаимодействие системы управления тяговым приводом с другим оборудованием электротрансмиссии | 53 |
| 2.8 Уменьшение потерь в инверторе специальными методами ШИМ | 60 |
| Глава 3. Моделирование ВИД НВ и его системы управления | 66 |
| 3.1 Моделирование векторной системы управления и структуры предварительной обработки задания момента | 66 |
| 3.2 Доработка модели ВИД НВ по результатам экспериментальных исследований | 71 |
| 3.3 Моделирование алгоритма снижения потерь в инверторе | 79 |
| Глава 4. Разработка программного обеспечения | 83 |
| 4.1 Обзор аппаратного состава тягового преобразователя и его контроллера | 83 |
| 4.2 Разработка программного обеспечения для контроллера преобразователя | 86 |
| 4.3 Создание программных средств для исследования привода | 92 |
| Глава 5. Экспериментальные исследования | 100 |
| 5.1 Испытания основных алгоритмов ПО на лабораторном макете привода | 100 |
| 5.2 Испытания опытных образцов тяговых двигателей | 107 |
| 5.3 Испытания электротрансмиссии с двигателями ВИД НВ на макете транспортного средства | 126 |
| Заключение | 148 |
| Список литературы | 150 |
| Приложение 1 | 154 |
| Акт внедрения | 154 |

Введение

Данная работа направлена на создание системы управления электротрансмиссии с тяговыми вентильно-индукторными приводами для пневмоколесных машин. Основное внимание уделяется изучению свойств вентильно-индукторных двигателей, синтезу алгоритмов управления ими, а также взаимосвязанной работе тяговых приводов с остальными элементами электротрансмиссии. Область применения такой трансмиссии может быть различной, начиная от гибридных грузовиков, троллейбусов и заканчивая многоколесными специализированными тягачами, военной техникой.

Для тягового применения в настоящее время используются различные двигатели переменного тока вместе с соответствующими силовыми преобразователями (чаще всего на основе инвертора напряжения). Классические двигатели постоянного тока также все еще имеют свою нишу, но уже большей частью по историческим причинам, а не из-за технической целесообразности [7]. Сравнивая различные электродвигатели переменного тока с точки зрения применения в электротяге, можно выделить следующие преимущества и недостатки каждого из типов двигателей (более подробно см. Глава 1):

- Асинхронный двигатель. Относительно прост, надежен, дешев, очень хорошо исследован и освоен производством. Имеет проблемы с отводом тепла от ротора, обладает не лучшими массогабаритными показателями.
- Синхронный двигатель с контактными кольцами. Имеет большую зону постоянства мощности благодаря возможности управлять током возбуждения. Хорошо исследован, освоен производством. Обладает плохими массогабаритными показателями и плохой надежностью из-за наличия контактных колец.
- Синхронный двигатель с постоянными магнитами. Лучшие массогабаритные показатели, КПД. Хорошо исследован. Дорог и сложен в производстве, существует проблема надежного крепления

магнитов при больших частотах вращения. Малая зона постоянства мощности, существует риск перенапряжений при отключении преобразователя в зоне ослабления поля.

- Вентильно-индукторный двигатель с самовозбуждением (SRD). Самый простой, дешевый и технологичный в изготовлении, хорошие массогабаритные показатели, хорошо изучен, имеет большую зону постоянства мощности. Так как имеет однополярное питание, требует специализированного силового преобразователя. Имеет заметные пульсации момента и вибрацию.
- Вентильно-индукторный двигатель с независимым возбуждением (ВИД НВ). Дешев, имеет хорошие массогабаритные показатели, имеет большую зону постоянства мощности. Относительно сложен в сборке (при использовании так называемой «опущенной» обмотки возбуждения). **Изучен относительно слабо. Не найдено примеров применения в качестве тягового электропривода.**

Актуальность работы. Из данных сравнительных характеристик видно, что вентильно-индукторный двигатель с независимым возбуждением интересен для применения в качестве недорогого тягового электропривода. Большая зона постоянства мощности за счет наличия независимого возбуждения, отсутствие пульсаций момента делают его особенно привлекательным для электротяги. Исследование этого типа двигателя, системы управления для него, построение на основе данного привода электротрансмиссии является **актуальной задачей**.

Диссертационная работа выполнялась в рамках НИР по созданию нового тягового электропривода на базе ВИД НВ для гибридной электротрансмиссии многоколесных транспортных средств. НИР объединил усилия большого количества научных групп, предприятий. Проектирование тяговых двигателей и генератора выполнялось научной группой Русакова А.М. (кафедра «Электротехнические комплексы автономных объектов» НИУ «МЭИ»); проектирование и производство микропроцессорных систем

управления, разработка алгоритмов управления двигателями и электротрансмиссией в целом – научной группой Козаченко В.Ф. (каф. АЭП НИУ «МЭИ», ООО "НПФ Вектор", г. Москва) с непосредственным участием автора диссертации; проектирование и производство силовых тяговых преобразователей - научной группой Острирова В.Н. (кафедра АЭП НИУ «МЭИ», ООО "НПП Цикл+", г.Москва); изготовление опытных образцов двигателей, стенда для их испытания – ОАО «Сарапульский электрогенераторный завод», г. Сарапул; тягового генератора – Тушинский машиностроительный завод, г. Москва; изготовление бортовой системы управления (БИУС) – ООО «Технопрактика», г. Москва; изготовление макетного образца гибридного транспортного средства – ООО «ВИЦ» г. Нижний Новгород; испытания проводились на полигоне Научно-исследовательского и испытательного центра бронетанковой техники (НИИЦ БТ), г. Кубинка.

Перед автором стояла задача разработки системы управления для двигателя, а также сопряжение алгоритмов управления двигателем с работой остальных устройств электротрансмиссии.

Главная идея и цель работы состоит в синтезе специальных алгоритмов управления ВИД НВ и электротрансмиссией, реализованных на современной микропроцессорной технике, которые должны позволить достичь оптимальной работы электродвигателя и обеспечить согласованное функционирование всех элементов электротрансмиссии в целом.

Реализация идеи позволит создать на базе ВИД НВ электротрансмиссию, которая должна иметь определенные преимущества (надежнее, проще в изготовлении и т.п.) по сравнению с электротрансмиссиями на основе других двигателей. Также данная работа направлена на более детальное изучение самих вентильно-индукторных электродвигателей с независимым возбуждением, чтобы выявить их преимущества и недостатки при применении в качестве тягового электропривода.

Достижение поставленной цели требовало решения **следующих задач:**

- Сравнения вентильно-индукторного двигателя с другими типами двигателей для определения его преимуществ и недостатков, области применения.
- Разработки структуры управления для данного типа двигателя применительно к задачам электротяги.
- Исследования на компьютерной модели электропривода разработанной структуры управления.
- Разработки программного обеспечения для системы управления электродвигателем на языке программирования Си для встраиваемого микроконтроллера тягового преобразователя.
- Разработки программного обеспечения для персонального компьютера, позволяющего иметь полный доступ к системе управления электропривода во время его работы, выполнять параметрирование, настройку, производить осциллографирование.
- Испытания образцов вентильно-индукторного электропривода, обработки результатов испытаний.
- Проверки работы электротрансмиссии на основе ВИД НВ на макете транспортного средства.
- Доработки программного обеспечения, модели двигателя и системы управления по результатам испытаний.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Разработана система управления ВИД НВ с зависимым управлением тока возбуждения от тока статора и её компьютерная модель.
2. Разработаны алгоритмы, обеспечивающие согласованную работу всех устройств электротрансмиссии.
3. Разработан алгоритм уменьшения потерь инвертора напряжения за счет оптимизации коммутаций ключей в векторной ШИМ.

4. Разработана методика испытаний опытных образцов ВИД НВ, позволяющая экспериментально получить зависимость момента двигателя от тока статора и тока возбуждения.
5. Уточнена компьютерная модель ВИД НВ путем учета вихревых токов контура возбуждения, выявленных на испытаниях привода.

Методы исследования. Для решения поставленных в работе задач использовались:

- теория электропривода и цифровых систем управления;
- методы численного моделирования (Simulink MATLAB) с элементами программирования на языке высокого уровня Си;
- компьютерные методы экспериментальных исследований опытных образцов ВИД НВ с использованием датчиков физических величин.
- Разработанное в рамках данной работы специализированное программное обеспечение для осциллографирования процессов, происходящих в электротрансмиссии при испытаниях макетного образца транспортного средства.

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов подтверждена компьютерным моделированием, экспериментальными исследованиями макета привода на лабораторном стенде, экспериментальными исследованиями опытного образца двигателя, ходовыми испытаниями макета гибридного транспортного средства с разработанной системой управления.

Основные положения и результаты, выносимые на защиту:

1. Способ и система управления ВИД НВ, отличающаяся зависимым управлением тока возбуждения от тока статора и содержащая элементы для обеспечения согласованной работы с другими устройствами электротрансмиссии.
2. Алгоритм уменьшения потерь инвертора напряжения за счет оптимизации коммутаций ключей в векторной ШИМ.

3. Методика испытаний опытных образцов ВИД НВ, позволяющая экспериментально получить зависимость момента двигателя от тока статора и тока возбуждения.
4. Структура линейной модели ВИД НВ, учитывающая вихревые токи контура возбуждения ВИД НВ.
5. Комплекс программ для параметрирования, диагностики, сбора и визуализации информации по работе тяговых двигателей и электротрансмиссии в целом.
6. Результаты экспериментальных исследований разработанных алгоритмов и систем управления тяговыми ВИД НВ и электротрансмиссией на их основе.

Основные практические результаты диссертации состоят в технической реализации системы управления в контроллере преобразователя тягового двигателя; определении характеристик опытных экземпляров тяговых ВИД НВ мощностью 35кВт; обеспечении ходовых испытаний макета транспортного средства на базе восьми ВИД НВ мощностью 35кВт; в разработке компьютерной модели ВИД НВ и его системы управления; в разработке алгоритмов обеспечивающих автономную согласованную работу всех устройств электротрансмиссии.

Апробация работы. Основные результаты работы обсуждались на заседании кафедры «Автоматизированного электропривода» Московского энергетического института, а также на XX Международной научно-технической конференции «Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика», г. Алушта – 2013.

В первой главе произведено сравнение ВИД НВ с другими типами электродвигателей. Подробно рассмотрены все преимущества и недостатки электродвигателей разных типов применительно к задачам электротяги. Обоснована целесообразность применения ВИД НВ в качестве тягового электропривода и дальнейшего исследования этого типа двигателей.

Сформулированы цели и задачи работы.

Во второй главе рассмотрен типовой состав оборудования электротрансмиссии для гибридного колесного транспортного средства: ДВС, генератор, накопитель энергии (батарея, суперконденсатор), двигатели, тормозные резисторы, вспомогательное оборудование. Приведены заложенные при проектировании параметры тягового двигателя ВИД НВ и его преобразователя, которые впоследствии были изготовлены в качестве опытных образцов для проведения испытаний.

Выбран тип системы управления. Выбор происходил между системой управления, реализующей автокоммутацию фаз двигателя по датчику положения ротора с токоограничением и векторной системой управления – для реализации выбрана векторная система управления. Приведена структура векторной системы управления.

Произведен анализ различных возможностей управления заданием привода (координат управления приводом): задание частоты вращения, задание уровня тока, задание мощности, задание момента. Обосновывается выбор управления заданием момента привода.

Синтезируется структура, осуществляющая преобразование задания момента в задания токов I_q , I_d , I_f , необходимых для векторной структуры управления. Кроме того в синтезируемую структуру закладываются функции осуществления согласованной работы тяговых двигателей с другим оборудованием электротрансмиссии.

Обосновывается и описывается принцип обеспечения согласованной работы всего оборудования электротрансмиссии, базирующийся на программном изменении функционирования оборудования в зависимости от уровня напряжения в звене постоянного тока. Приводится графическая иллюстрация с примером конкретной настройки уставок уровней напряжения.

Описывается методы улучшения ШИМ инвертора напряжения направленные на уменьшение потерь в инверторе. Первый метод основан на изменении частоты ШИМ в зависимости от уровня тока статора двигателя,

второй метод показывает, как уменьшить потери за счет оптимизации векторной ШИМ шестиключевого инвертора напряжения.

В третьей главе строится модель тягового двигателя и его системы управления для проверки работоспособности синтезированных структур управления. Приводятся результаты моделирования, подтверждающие базовую работоспособность структур управления. Отдельно описывается модель для проверки работы алгоритма снижения потерь в инверторе за счет применения оптимизированного метода векторной ШИМ. Приводятся результаты данного моделирования.

В четвертой главе описывается разработка программного обеспечения. Приводится описание аппаратной части как контроллера, так и преобразователя. Описывается строение низкоуровневого программного обеспечения для микроконтроллера силового преобразователя ВИД НВ, реализующего синтезированные структуры управления. Описываются базовые принципы построения ПО на языке C/C++ для микроконтроллера силового преобразователя. Далее показано проектирование дополнительных программных средств для персонального компьютера, предназначенных для отладки и исследования привода: программы параметрирования контроллера преобразователя и цифрового осциллографа.

Пятая глава описывает обширные экспериментальные исследования разработанной системы управления и двигателя ВИД НВ. Сначала система управления испытывается на лабораторном макете привода, состоящем из преобразователя на 7.5 кВт и одного из первых образцов двигателя ВИД НВ. Преобразователь содержит контроллер с разработанным ПО.

Следующие испытания проводятся на заводе-изготовителе тяговых двигателей в г. Сарапул. Двигатели мощностью 35 кВт управляются от специализированного силового преобразователя аналогичной мощности, также содержащего контроллер с разработанным ПО. Система управления и двигатели испытываются на холостом ходе во всем диапазоне частот вращения. Далее в главе описывается эксперимент по определению момента

двигателя на заторможенном роторе при разных сочетаниях тока статора и тока возбуждения. Тем самым подтверждаются расчетные данные конструкторов двигателя.

Третий вид экспериментальных исследований – испытания электротрансмиссии в целом на макете транспортного средства. В главе подробно описываются все параметры макетного образца транспортного средства: восемь двигателей ВИД НВ по 35 кВт каждый, дизель-генератор, молекулярный накопитель энергии, контроллер верхнего уровня. Приводятся осциллограммы, демонстрирующие основные режимы работы электротрансмиссии. Описываются проблемы, с которыми пришлось столкнуться в процессе испытаний и методы их устранения. Проводится большой анализ полученных результатов, делаются выводы, заключение о применимости разработанной системы управления и ВИД НВ.

В конце главы приводится доработка математической модели ВИД НВ: в процессе испытаний обнаруживается новое свойство двигателей, не учтенное сначала, но существенно влияющее на поведение машины, особенно в случае тягового применения – это влияние вихревых токов на контур возбуждения. Показано, как дорабатывается математическая модель двигателя в соответствии с полученными результатами. Исправление модели позволит в дальнейшем более корректно учитывать поведение ВИД НВ как объекта управления и получать при моделировании привода более реалистичные результаты.

В заключении обобщены основные результаты работы.

Состав диссертации: введение, пять глав, заключение, список литературы, количество страниц 153, рисунков 72, число наименований используемой литературы 34 и приложения.

Глава 1. Обзор и сравнение различных типов электродвигателей для применения в качестве тяговых

Традиционно в качестве тягового электропривода использовался привод на основе двигателя постоянного тока. С появлением и удешевлением IGBT транзисторов появилась возможность создания конкурентоспособного тягового привода переменного тока. На заре развития полупроводниковой силовой техники много научных работ было посвящено доказательству преимущества привода переменного тока перед приводом постоянного тока. В настоящее время работы посвящаются уже выбору того или иного привода переменного тока с выделением его положительных качеств относительно других типов приводов. Можно выделить пять основных типов двигателей переменного тока, конкурирующих между собой в качестве тяговых. Это: асинхронный двигатель, синхронный двигатель с контактными кольцами, синхронный двигатель с постоянными магнитами, вентильно-индукторный двигатель с самовозбуждением (ВИД СВ), вентильно-индукторный двигатель с независимым возбуждением (ВИД НВ).

Асинхронный двигатель. Является наиболее изученным, распространенным типом двигателя. На Рис. 1.1 схематично показана геометрия его магнитопровода.

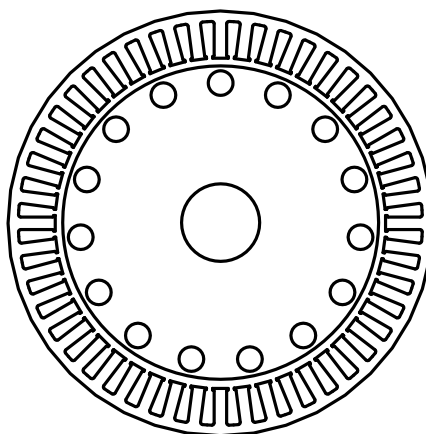


Рис. 1.1. Геометрия магнитопровода асинхронного двигателя.

Рекомендуется в качестве тягового привода во многих работах [4], [21]. Сложность и технологичность изготовления такого двигателя средняя – самые трудоемкие операции это изготовление распределенной обмотки

статора и отливка проводников ротора. Однако в силу распространенности асинхронного привода в промышленности, на многих предприятиях его производство освоено и не представляет проблем. Несмотря на это использование в качестве тягового обычного серийного общепромышленного асинхронного двигателя нерационально. Для обеспечения хороших показателей в тяговом применении требуется специальное проектирование такого двигателя по оригинальным методикам [11]: повышение частоты питающего тока, уменьшение габаритов, применение специальных систем охлаждения, оптимизация геометрии магнитопровода машины. В этом случае возможно конструирование асинхронного двигателя, обладающего большим диапазоном постоянства мощности. Так, в [11] приводится пример тягового асинхронного двигателя мощностью 60кВт с максимальной частотой вращения 5000 об/мин, длительно-допустимым моментом на валу 700Нм, максимальным моментом 1800Нм и сохранением гиперболы мощности в диапазоне частот вращения ротора 1:16. При этом наружный диаметр составляет 42см. Основным минусом асинхронного привода является тот факт, что большая часть потерь выделяется в роторе, а отвод тепла от него затруднен. И если для серийной общепромышленной машины это не представляет большой проблемы, так как машина работает с небольшими (номинальными) уровнями скольжения и имеет относительно свободные габариты, то для тяговой машины это проблема становится более актуальной. Кроме сложности отвода тепла потерь ротора невозможно также контролировать температуру ротора, чтобы обеспечить своевременную защиту от перегрева. Для предсказания температуры ротора приходится пользоваться математическими моделями, дающими лишь приблизительную, косвенную оценку температуры. Для улучшения отвода тепла от ротора и лобовых частей статора иногда применяют жидкостное (масляное) охлаждение внутреннего пространства двигателя, когда охлаждающая жидкость впрыскивается из форсунок, находящихся по окружности статора. Но такая система охлаждения часто

приносит с собой большое количество проблем, сильно увеличивающих сложность конструкции и уменьшающая надежность привода. Так, на высоких частотах вращения (3000 об/мин и более) становятся заметны гидродинамические потери, вызванные перемешиванием масляного тумана внутри машины, что требует дополнительных мер по повышению гладкости поверхности статора и ротора. Требуется обеспечивать полную герметичность внутреннего пространства машины. При некачественной, засоренной охлаждающей жидкости возможно забивание подающих форсунок, а также сливных отверстий. При изготовлении новых машин требуется тщательное очищение их внутреннего пространства от посторонних объектов (остатки изоляции, металлическая крошка и т.п), которые могут попасть в охлаждающую жидкость и впоследствии забить форсунки. Также необходимо следить за совместимостью материалов, применяемых для построения машины, с охлаждающей жидкостью. Кроме того, для обеспечения возможности впрыска охлаждающее масло выбирают достаточно жидким, но такие сорта масла обладают свойством гидрофильности, со временем набирают в себе влагу и ухудшают сопротивление изоляции электрических машин.

Синхронный двигатель с контактными кольцами приведен лишь для сравнения и практически не применяется в качестве тягового. На Рис. 1.2 схематично показана геометрия его магнитопровода.

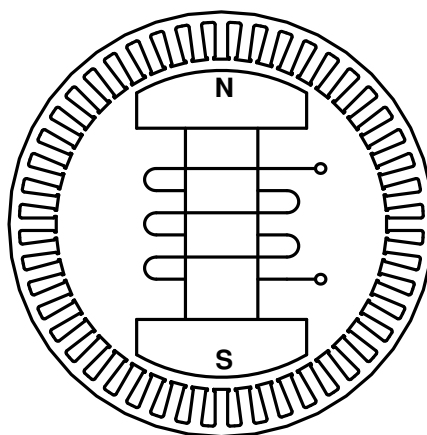


Рис. 1.2. Геометрия магнитопровода синхронной машины с контактными кольцами.

С точки зрения управления это очень удобная машина, так как имеет обмотку возбуждения, позволяющую в явном виде управлять полем машины, формируя тяговую характеристику с большой зоной постоянства мощности. Но из-за наличия контактных колец габариты машины увеличиваются, надежность понижается, машины требуют периодического обслуживания и не могут конкурировать с остальными рассмотренными типами машин переменного тока.

Синхронный двигатель с постоянными магнитами (иногда называемый вентильным двигателем) имеет самый высокий КПД по сравнению с остальными типами машин, лучшие удельные массогабаритные показатели. На Рис. 1.3 схематично показана геометрия его магнитопровода.

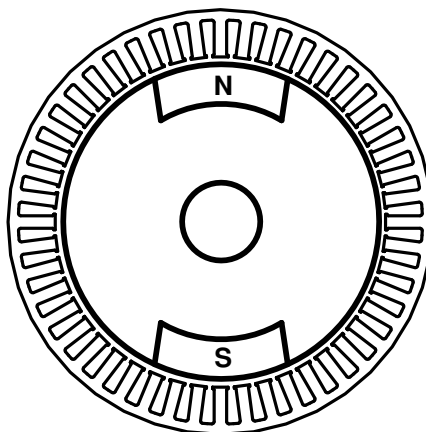


Рис. 1.3. Геометрия магнитопровода синхронной машины с постоянными магнитами на роторе.

Явнополюсная структура машины позволяет синтезировать сравнительно простой наблюдатель положения ротора для низких частот вращения, вследствие чего может быть использована векторная бездатчиковая, а не датчиковая система управления [32]. Существует также возможность изготовления разновидности синхронного двигателя с постоянными магнитами – «безжелезного» двигателя, обладающего лучшей динамикой и наименьшей массой. При всех этих достоинствах машина имеет один существенный недостаток – поле возбуждения, создаваемое постоянными магнитами, не регулируется. Это приводит к тому, что преобразователь для такого двигателя приходится проектировать с

завышенной установленной мощностью – одновременно и на большой ток, и на высокое напряжение [11]. Частично решает эту проблему ослабление поля машины за счет приложения размагничивающего тока статора, направленного по оси d . Однако при внезапном отключении силового преобразователя при работе в зоне ослабления поля большая ЭДС двигателя может вывести из строя его инвертор напряжения [34], [30]. Проблема особенно актуальна для синхронных машин, имеющих сравнительно большую мощность. Существуют методы, в какой-то степени уменьшающие недостаток плохой регулировки потока возбуждения. Первый метод – использование реактивного момента явнополюсной синхронной машины с постоянными магнитами. При этом 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 [31]. Предлагаются также специальные конструкции ротора [28], которые за счет наличия специальной механики изменяют эффективный воздушный зазор. Все эти методы в какой-то мере улучшают ситуацию, однако проблема отсутствия регулировки поля все равно актуальна. Также к недостаткам синхронной машины с постоянными магнитами традиционно относится дороговизна и трудоемкость их изготовления. Редкоземельные магниты дороги, очень сложны в монтаже, хрупки, а также ограничивают перегрев машины вследствие риска их размагничивания, а также имеют свойство размагничиваться со временем.

Еще одним недостатком синхронных машин с постоянными магнитами является малая индуктивность статорных обмоток, из-за чего для обеспечения приемлемого уровня пульсаций тока приходится либо использовать высокую частоту ШИМ силового преобразователя (отрицательно влияет на его КПД и тепловой режим), либо устанавливать дроссели (иногда имеют габариты, сравнимые с габаритами самой машины).

Вентильно-индукторный двигатель с самовозбуждением (ВИД СВ).

Магнитная геометрия четырехфазного двигателя показана на Рис. 1.4.

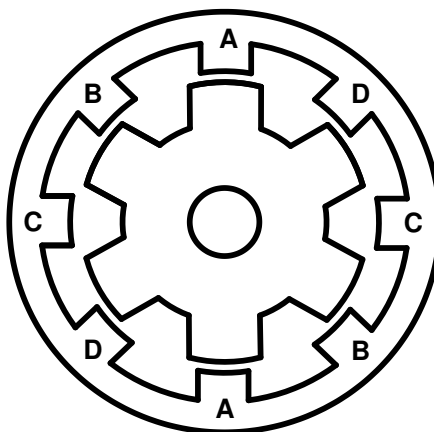


Рис. 1.4. Геометрия магнитопровода вентильно-индукторного двигателя с самовозбуждением (ВИД СВ, SRD).

В иностранной литературе известен как SRM (Switched Reluctance Motor) или SRD (Switched Reluctance Drive). Подробно такой тип двигателей описан в [20]. Имеет простейшую и технологичную конструкцию в виде пассивного явнополюсного ротора и явнополюсного статора с сосредоточенными обмотками. Движение происходит за счет подачи в соответствующую катушку статора однополярного импульса тока, в результате чего ротор стремится повернуться в положение, соответствующее наименьшему магнитному сопротивлению. Отсутствие лобовых частей вследствие применения сосредоточенных обмоток позволяет уменьшить стоимость двигателя. Механическая характеристика такого привода при правильном управлении близка к требуемой – реализуется принцип постоянства мощности в широком диапазоне частот вращения одновременно с относительно хорошим КПД. В ряде работ [4], [23] такой привод считают наиболее перспективным для тягового применения.

У привода имеется ряд недостатков:

- Необходимость специализированного силового преобразователя для однополярного питания нужного количества фаз двигателя;

- Амплитуда токов фаз больше, чем у аналогичной машины с разнополярным питанием, что требует использования ключей инвертора на больший ток;
- Для каждой фазы требуется вывести начало и конец, в отличие от традиционного соединения фаз в звезду у машин с разнополярным питанием;
- Повышенный шум, вибрация, пульсации момента вследствие явнополюсной структуры магнитопровода.

Последний недостаток при соответствующей геометрии магнитопровода и использовании специального алгоритма управления можно в некоторой степени уменьшить [23]. Необходимо отметить, что есть решения с приводом SRD, имеющим соединение фаз в звезду и разнополярным питанием обмоток (парная коммутация), но они проигрывают по оптимальности использования двигателя решениям с независимым подключением фаз, а поэтому применяются редко.

Вентильно-индукторный двигатель с независимым возбуждением (ВИД НВ) также известен как одноименнополюсный индукторный двигатель с аксиальным возбуждением и уже рассматривался в работах [5, 8, 13, 26]. Свойства данной машины приближены к классической синхронной машине с возбуждением со стороны ротора и скользящим контактом. Однако конструктивно в рассматриваемой машине обмотка возбуждения расположена на статоре, а скользящий контакт отсутствует. На Рис. 1.5 схематично показана геометрия ротора и магнитный поток обмотки возбуждения, а на Рис. 1.6 изображено взаимодействие магнитных потоков статора и ротора, при этом ротор на рисунке установлен в согласованное положение (момент равен нулю).

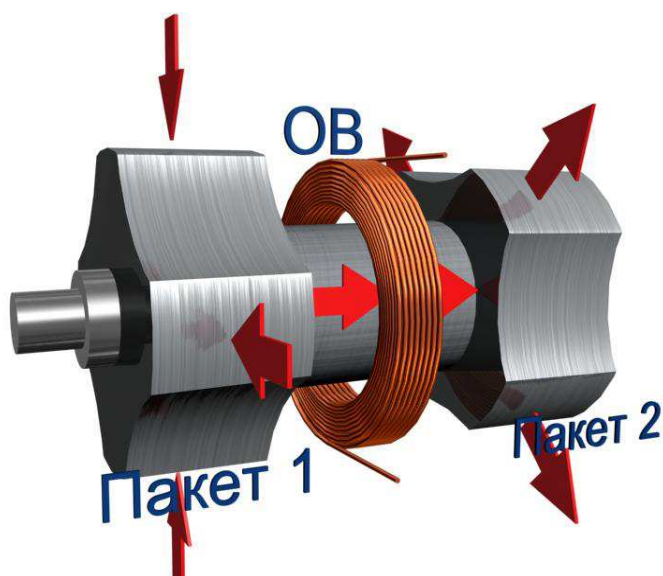


Рис. 1.5. Геометрия ротора и магнитный поток обмотки возбуждения.

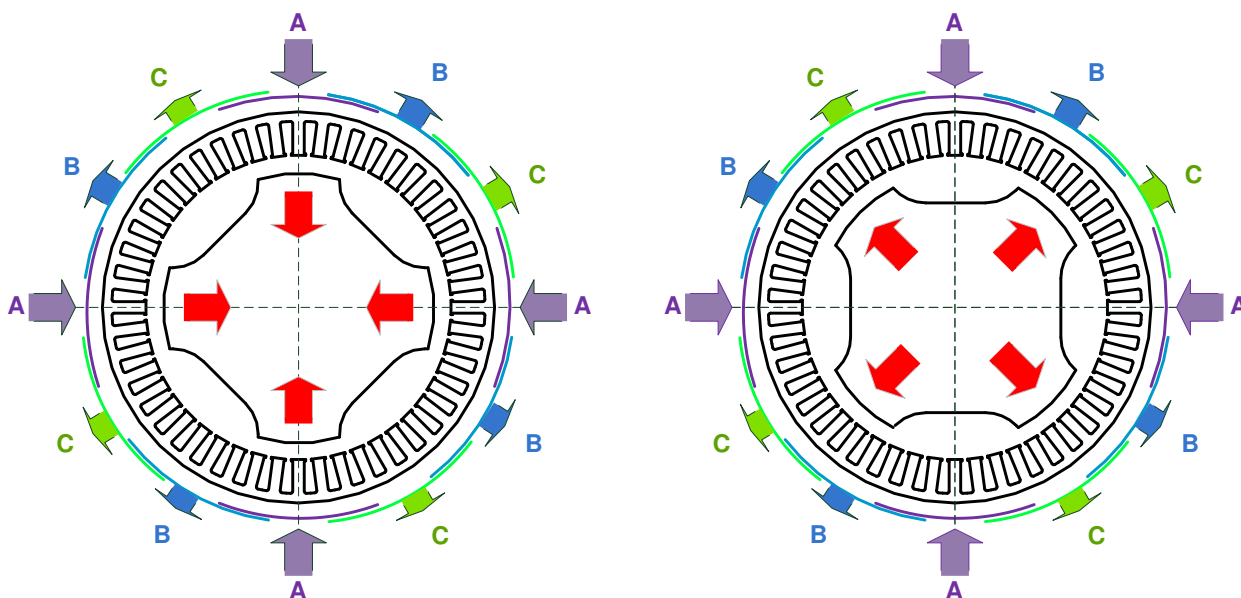


Рис. 1.6. Взаимодействие магнитных потоков статора и ротора: ротор установлен в точке синхронизации (нулевой момент).

Машина состоит из двух пакетов (передний и задний), между которыми установлена обмотка возбуждения. Ротор и статор выполнены из шихтованного железа, постоянные магниты отсутствуют. Обмотка статора распределенная, трехфазная. Витки обмотки статора охватывают сразу оба пакета машины. Упрощенно принцип работы можно описать следующим образом: ротор стремится повернуться в такое положение, при котором направления магнитного потока в статоре и роторе совпадут. При этом половина электромагнитного момента образуется в одном пакете, а половина – в другом. Следует отметить, что машина подразумевает разнополярное

питание, электромагнитный момент активный и образован за счет взаимодействия поля, созданного током обмотки возбуждения с полем, созданным обмотками статора. По принципу работы эта машина отлична от вентильно-индукторных двигателей с самовозбуждением (SRD), в которых момент реактивный. Несмотря на явнополюсный ротор, индуктивности по осям d и q одинаковы, реактивный момент (момент при отсутствии возбуждения) практически отсутствует. Геометрию ротора при проектировании стремятся заложить такую, при которой ЭДС, наводимая в обмотках статора, оказывается близкой к синусоиде. Тогда с точки зрения управления машина оказывается эквивалентна синхронной машине с контактными кольцами.

Таким образом, вентильно-индукторный двигатель с независимым возбуждением обладает следующими преимуществами:

- Отсутствие скользящего контакта.
- Относительная простота и низкая стоимость изготовления.
- Управляемое возбуждение, широкий диапазон постоянства мощности.
- Отсутствие перемагничивания ротора, а, следовательно, и отсутствие потерь в нем. Большая часть потерь выделяется на статоре, а с него отводить тепло проще вследствие хорошей теплопроводности.
- Применение для управления машиной тех же алгоритмов, которые классически используются для синхронных машин (векторное датчиковое и бездатчиковое управление).
- Использование стандартного трехфазного инвертора в управляющем преобразователе.
- Нет риска повреждения силового преобразователя из-за возникновения завышенной ЭДС двигателя при работе в зоне ослабления.
- Вследствие распределенной обмотки статора пульсации момента на валу и вибрации практически отсутствуют (при векторном управлении).

Разработки и исследования ВИП НВ ведутся на кафедрах АЭП, ЭКАО, ЭМ НИУ «МЭИ» уже более 12 лет, методика проектирования таких машин развивается научной группой Русакова А.М. (кафедра «Электротехнические комплексы автономных объектов» НИУ «МЭИ»).

Существуют варианты ВИД НВ с сосредоточенной обмоткой [13], [5] и зубцами на статоре Рис. 1.7.

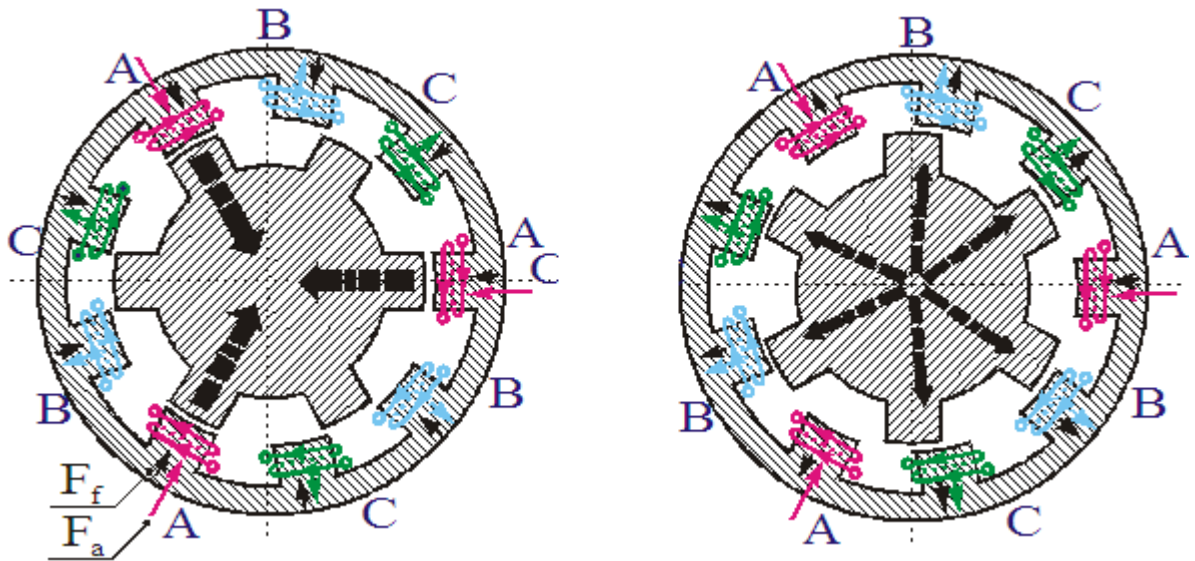


Рис. 1.7. Геометрия магнитопровода ВИД НВ с сосредоточенной обмоткой статора.

Имеется большой опыт эксплуатации таких машин в сфере ЖКХ в диапазоне мощностей 315-1250 кВт. Сосредоточенная обмотка делает машины этого типа еще более простыми в изготовлении, но из-за явнополюсного статора в них присутствуют шумы, вибрации и некоторые пульсации момента на валу, что не очень хорошо для тягового привода. Кроме того, сосредоточенная обмотка приводит к необходимости большей частоты токов фаз по сравнению с распределенной, что также непригодно для большой частоты вращения тягового привода. Сфера применения ВИД НВ с сосредоточенной обмоткой – привода насосов, вентиляторов и т.п., где простота изготовления машины имеет первостепенное значение.

Несмотря на обилие преимуществ, в ВИД НВ есть ряд недостатков.

Так, обычно в таких двигателях нет различия индуктивности по осям d и q , что затрудняет синтез бездатчиковой системы управления для сверхнизких и нулевых частот вращения, как это может быть сделано для машины с

постоянными магнитами [32]. Таким образом, для качественной работы ВИД НВ в качестве тягового привода необходим датчик положения ротора.

Кроме того, следует применять специальные меры для предотвращения замыкания магнитного потока возбуждения по подшипниковым щитам, в обход магнитопровода статора (см. Рис. 1.8).

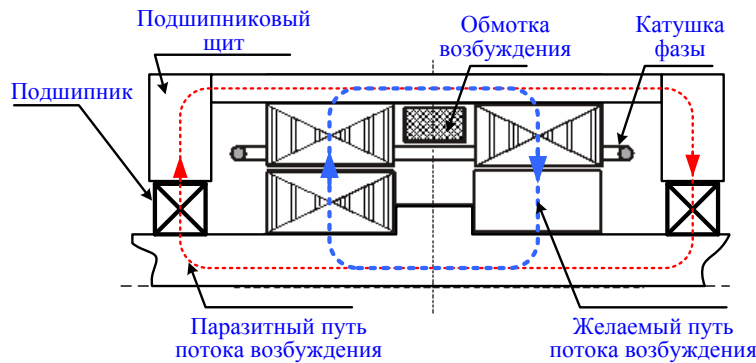


Рис. 1.8. Основной и паразитный путь замыкания потока обмотки возбуждения.

Наличие такого паразитного пути замыкания потока возбуждения может приводить к преждевременному выходу из строя подшипников качения [1]. Чтобы освободить подшипники от магнитного потока применяют различные немагнитные материалы в конструкции машины – немагнитный вал ротора, немагнитные подшипниковые щиты. Однако в тяговом применении крепление двигателя часто осуществляется через подшипниковый щит (мотор-колесо, мотор-редуктор). Вследствие этого немагнитный материал для щита должен также обладать необходимой механической прочностью, что сильно затрудняет выбор материала, выбор предприятия-производителя подшипниковых щитов, что в конечном счете приводит к удорожанию машины.

Существует проблема, связанная с размещением обмотки возбуждения. В [1] показано, что существует два различных способа размещения обмотки возбуждения – так называемые «поднятая» и «опущенная» обмотка возбуждения (см Рис. 1.9).

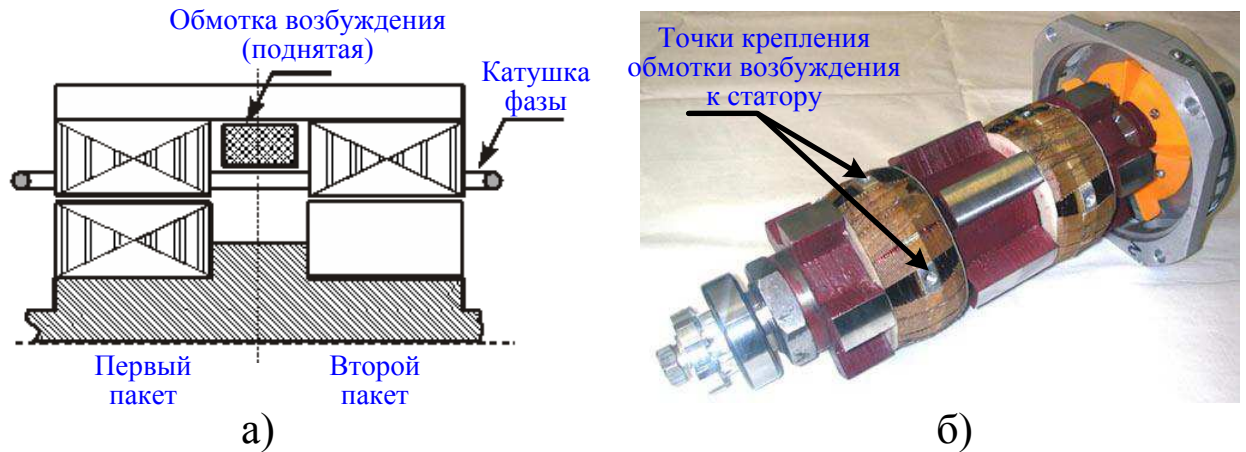


Рис. 1.9. Примеры конструкций вентильно-индукторных двигателей с независимым возбуждением:

- а) двухпакетный вентильно-индукторный двигатель с поднятой обмоткой возбуждения;**
- б) ротор четырехпакетного вентильно-индукторного двигателя с опущенной обмоткой возбуждения.**

В конструкции с «поднятой» обмоткой возбуждения она находится вплотную к железу спинки статора, над фазными обмотками (Рис. 1.9.а). В конструкции с «опущенной» обмоткой возбуждения (Рис. 1.9.б) она находится вблизи магнитопровода ротора, между пакетами. На рисунке приведен пример четырехпакетного ротора ВИД НВ с двумя обмотками возбуждения. Конструкция с «поднятой» обмоткой возбуждения более технологична и проста в сборке, «опущенная» обмотка делает машину более компактной. Соответственно, для тягового привода в целях уменьшения габаритов применяется конструкция ВИД НВ с «опущенной» обмоткой возбуждения, что вызывает две проблемы:

- Для возможности установки обмотки возбуждения ротор машины приходится изготавливать разборным (разделяющимся на пакеты). Это, помимо увеличения сложности изготовления, увеличивает сложность балансировки такого ротора – после этапа балансировки его приходится разбирать, чтобы одеть обмотку возбуждения, из-за чего балансировка может нарушиться.
- «Опущенная» обмотка возбуждения имеет плохую теплоотдачу – площади контакта её со статором (несколько крепежных болтов) может быть недостаточно, чтобы отводить выделяющееся в ней тепло на статор

путем теплопроводности в режимах максимального момента двигателя. Требуется принимать конструктивные меры для улучшения теплоотдачи, либо для уменьшения потерь в обмотке.

Вывод. У каждого из перечисленных типов двигателей имеются как достоинства, так и недостатки. Нельзя однозначно утверждать, что какой-то из перечисленных приводов имеет явные преимущества. Однако для тяговых приводов средней мощности (30-300кВт) можно выделить основные конкурирующие типы двигателей. Это асинхронный двигатель, ВИД СВ, ВИД НВ. Синхронный двигатель с постоянными магнитами неоправданно дорог при таких мощностях и имеет проблемы с построением силового преобразователя.

Каждый из типов двигателей развивается в своих научных группах и своих предприятиях. Однако ВИД НВ в качестве тягового электропривода изучен слабо. Несмотря на указанные его недостатки (которые могут быть конструктивно устранены при дальнейшем развитии данного привода), ВИД НВ является перспективным для тягового применения, требует дальнейшего изучения и синтеза системы управления, подходящей для тягового применения.

В результате основная цель данной работы сводится к следующему: разработка комплекса программно-алгоритмических средств для создания и исследования вентильно-индукторного электропривода с независимым возбуждением и распределенной обмоткой статора для тягового применения.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать систему управления ВИД НВ и её модель для отладки и исследования привода в различных режимах.
2. Разработать алгоритмы для обеспечения согласованной работы всех устройств электротрансмиссии.
3. Создать комплекс программно-аппаратных средств для реализации системы управления ВИД НВ на силовом тяговом преобразователе.

4. Создать комплекс программных средств для исследования привода в составе электротрансмиссии – осциллографирование происходящих процессов.
5. Разработать структуры экспериментальных стендов, методики испытаний тяговых ВИД НВ. Провести испытания опытных образцов двигателей в составе лабораторного стенда.
6. Проверить работу электротрансмиссии на основе ВИД НВ на макете транспортного средства.
7. Доработать и уточнить компьютерную модель двигателя по результатам испытаний.

Глава 2. Разработка алгоритмов и структур управления ВИД НВ

2.1 Состав целевой электротрансмиссии

Разрабатываемый привод с ВИД НВ может быть использован для различных тяговых применений: в рельсовых транспортных средствах, гусеничных, пневмоколесных. Наиболее перспективным является использование такого привода в пневмоколесных машинах большой массы (вездеходы, грузовики, тягачи, военная техника), так как именно в них наиболее важен широкий диапазон постоянства мощности – одновременно и высокий момент для преодоления подъемов, так и высокая частота вращения для движения по трассе. На Рис. 2.1 приведен пример архитектуры гибридной трансмиссии последовательного типа с индивидуальным приводом колес.

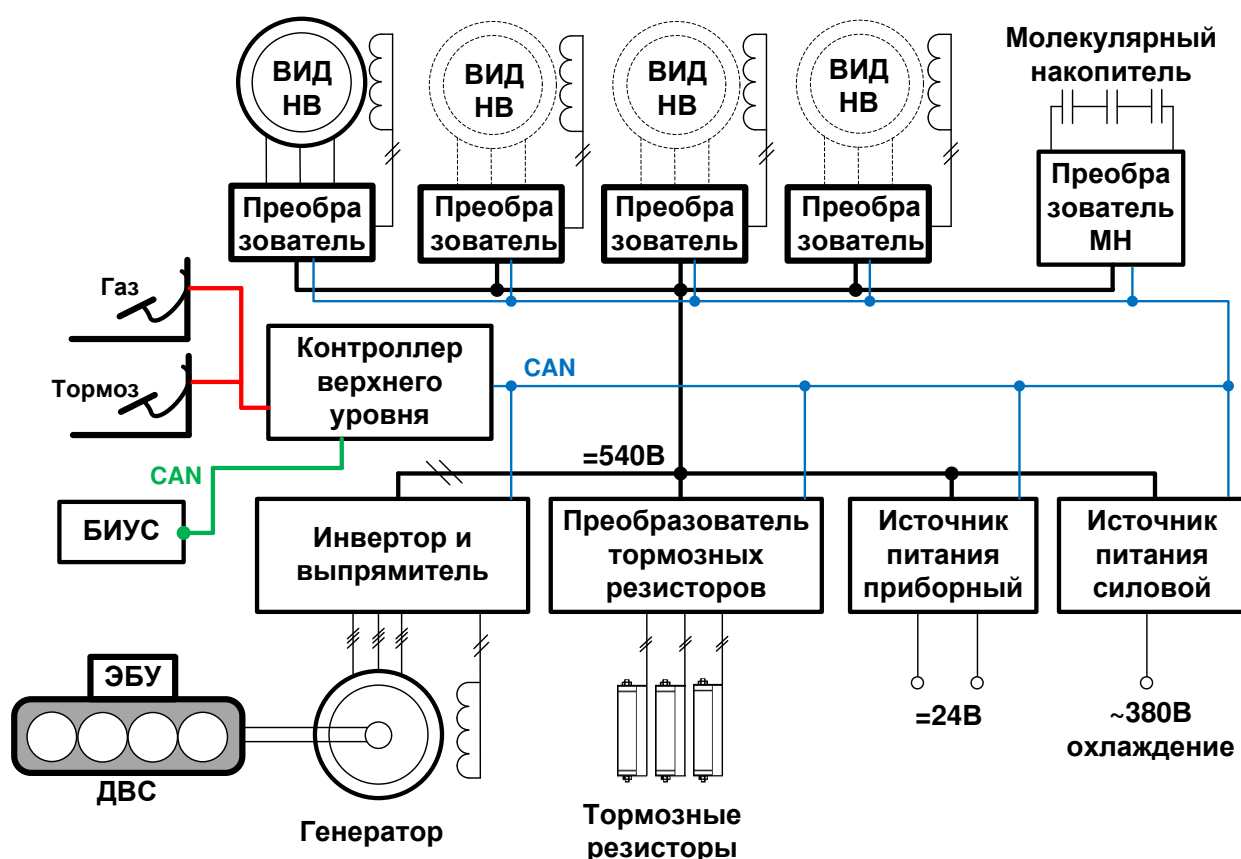


Рис. 2.1. Пример архитектуры гибридной трансмиссии последовательного типа с индивидуальным приводом колес.

В состав входят:

- ВИД НВ – несколько вентильно-индукторных двигателей с независимым возбуждением, по числу колес. Двигатель может располагаться как в колесе, так и на борту машины.
- Преобразователь для ВИД НВ – силовой инвертор с микропроцессорным управлением. По сути, является классическим преобразователем частоты на основе инвертора напряжения, но с отсутствующим выпрямителем по входу. Преобразователи подключаются к общему звену постоянного тока.
- Молекулярный накопитель (другие названия – суперконденсатор, ионистор). Опционально может присутствовать и являться источником энергии трансмиссии (основным или дополнительным). Вместо молекулярного накопителя может использоваться аккумуляторная батарея, например, литий-ионного типа.
- Преобразователь молекулярного накопителя является DC/DC преобразователем и используется для двунаправленного обмена энергией между накопителем и звеном постоянного тока.
- ДВС, приводящий во вращение вентильно-индукторный генератор с независимым возбуждением (ВИП НВ).
- Преобразователь для генератора, содержащий выпрямитель и (опционально) инвертор для возможности рассеивания энергии торможения в ДВС, а также обеспечения стартерного режима ДВС.
- Тормозные резисторы – резисторы для рассеивания энергии торможения. Могут быть выполнены как с воздушным, так и с водяным охлаждением.
- Преобразователь тормозных резисторов – содержит несколько IGBT ключей (по числу секций резисторов), которые подключают резисторы к звену постоянного тока по команде микроконтроллера в зависимости от напряжения на звене постоянного тока.

- Источник питания приборный, источник питания силовой – опционально могут быть установлены источники питания для обеспечения приборного питания 24В, заряда АКБ и силового питания 380В 50Гц переменного тока для подключения вентиляторов системы охлаждения.
- Контроллер верхнего уровня (КВУ) – осуществляет управление всей электротрансмиссией, обрабатывает педали газа и тормоза, селектора направления движения, осуществляет связь с БИУС.
- БИУС – бортовая информационно-управляющая система. Осуществляет отображение текущих параметров пользователю, заведует включением/выключением различных режимов, устройств по выбору пользователя, управляет светотехникой, навигацией и т.п.

Данная архитектура электротрансмиссии является одной из возможных. Те или иные блоки могут отсутствовать в зависимости от требований, предъявляемых к транспортному средству, может измениться компоновка силовых преобразователей (например, тормозные резисторы могут быть включены индивидуально в каждый преобразователь тягового двигателя и т.п.). Не смотря на это, общие принципы работы останутся прежними. Несколько иначе будет выглядеть архитектура электротрансмиссии при получении питания из контактной сети, однако в рамках данной работы будет рассматриваться применение ВИД НВ для гибридного транспортного средства с ДВС, так как автору работы была поставлена именно такая практическая задача. В дальнейшем все алгоритмы системы управления будут рассматриваться применительно к данной архитектуре электротрансмиссии.

2.2 Параметры опытного тягового двигателя ВИД НВ и его преобразователя

Для экспериментального исследования планируется изготовление нескольких опытных образцов тяговых двигателей ВИД НВ мощностью 35кВт, а также силовых преобразователей для них. Двигатель двухпакетный,

односекционный, с опущенной обмоткой возбуждения и распределенной обмоткой статора. Проектирование электродвигателя выполнялось научной группой Русакова А.М. (кафедра «Электротехнические комплексы автономных объектов» НИУ «МЭИ»);

Расчетные характеристики двигателя следующие:

Обмотка – распределенная, трехфазная

Число пакетов статора – 2

Число зубцов ротора – 4

Число зубцов статора – 27

Номинальная мощность – 35 кВт (от 650 об/мин до 7200 об/мин)

Максимальная частота вращения – 7200 об/мин

Максимальный момент на валу – 520 Нм

Напряжение питания – 380 В переменного тока

Максимальный фазный ток – 380 А

Максимальный ток обмотки возбуждения – 27 А.

Максимальная частота тока – 480 Гц

Коэффициент полезного действия – 0,92 (на частоте вращения около 1200 об/мин).

Охлаждение – жидкостное: «водяная рубашка».

Соппротивление катушки обмотки возбуждения – 1.75 Ом

Соппротивление фазы статора – 6.8 мОм.

Конструктивно двигатель объединен в одном корпусе с планетарным редуктором, имеющим передаточное отношение 4,13.

На Рис. 2.2 показана заданная тяговая характеристика проектируемого двигателя с постоянством мощности 35 кВт, которая должна быть реализована.

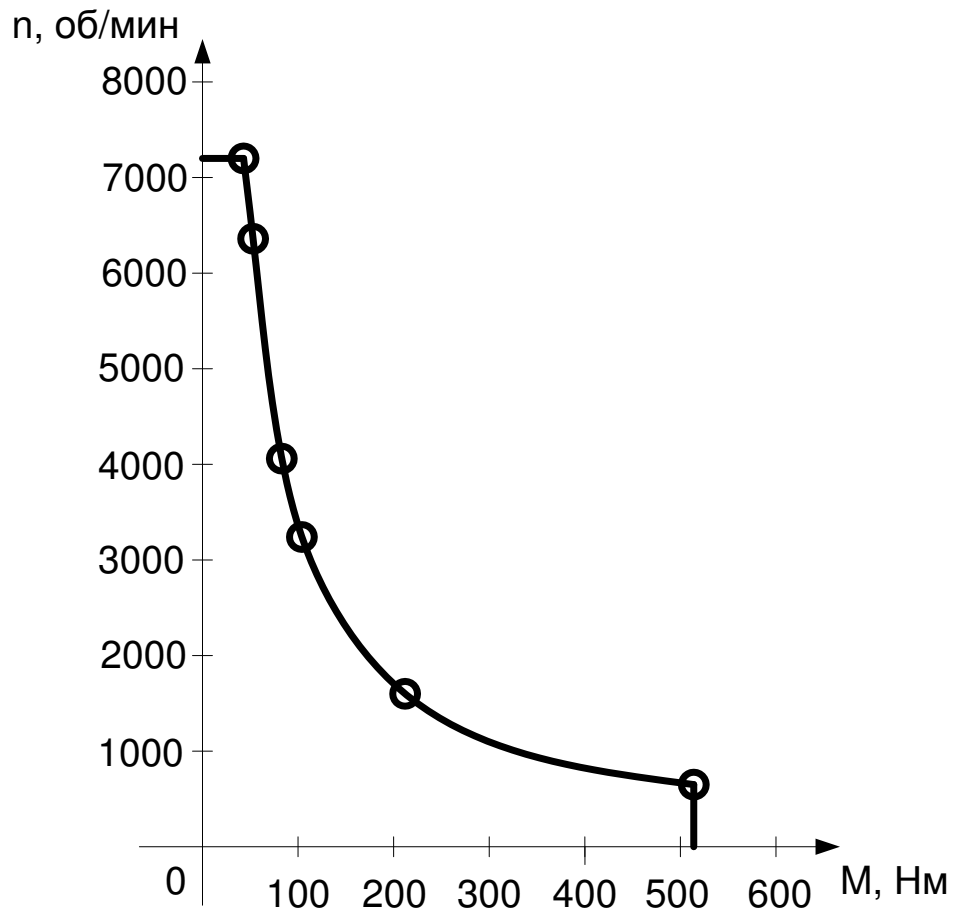
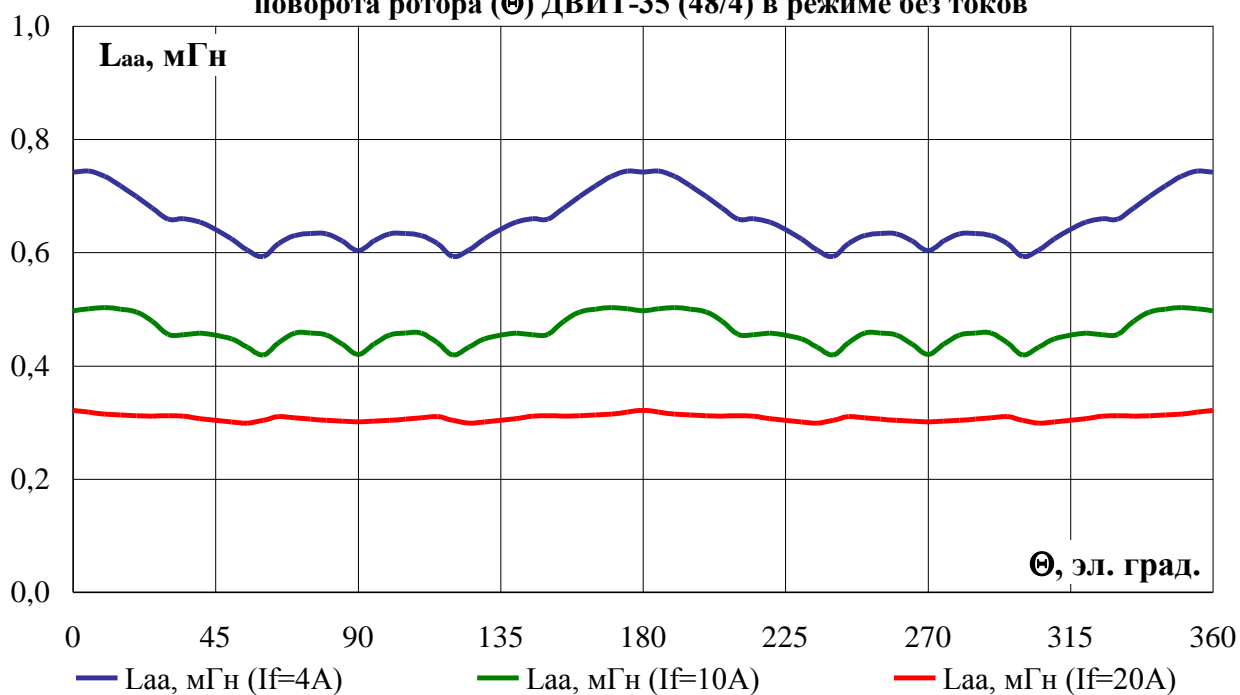


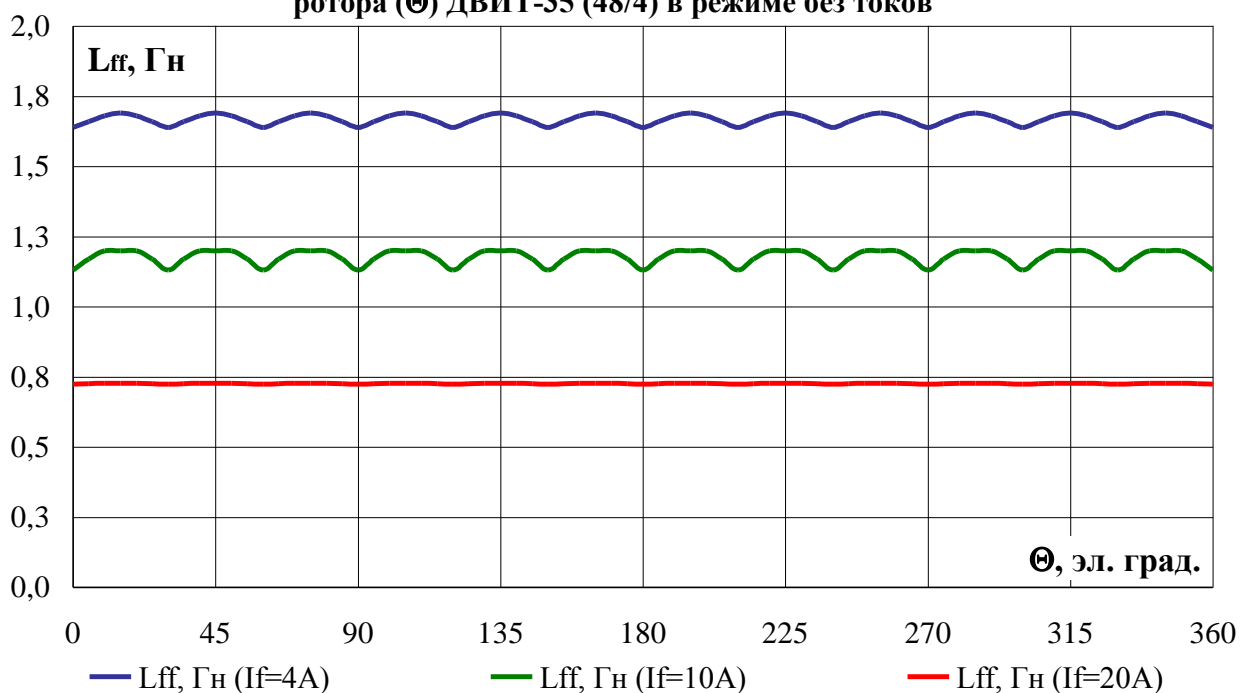
Рис. 2.2. Заданная тяговая характеристика опытного ВИД НВ мощностью 35кВт

В качестве исходных данных для построения линейной модели электродвигателя конструкторами ВИД НВ были предоставлены: все параметры фазных обмоток, их индуктивностей (собственная индуктивность фазы, собственная индуктивность ОВ) и взаимных индуктивностей (взаимная индуктивность фазы и ОВ от угла поворота ротора), а также изменения этих параметров при насыщении стали машины. Предоставленные зависимости индуктивностей приведены на Рис. 2.3.

Зависимость собственной индуктивности фазы (L_{aa}) от угла поворота ротора (Θ) ДВИТ-35 (48/4) в режиме без токов



Зависимость собственной индуктивности ОБ (L_{ff}) от угла поворота ротора (Θ) ДВИТ-35 (48/4) в режиме без токов



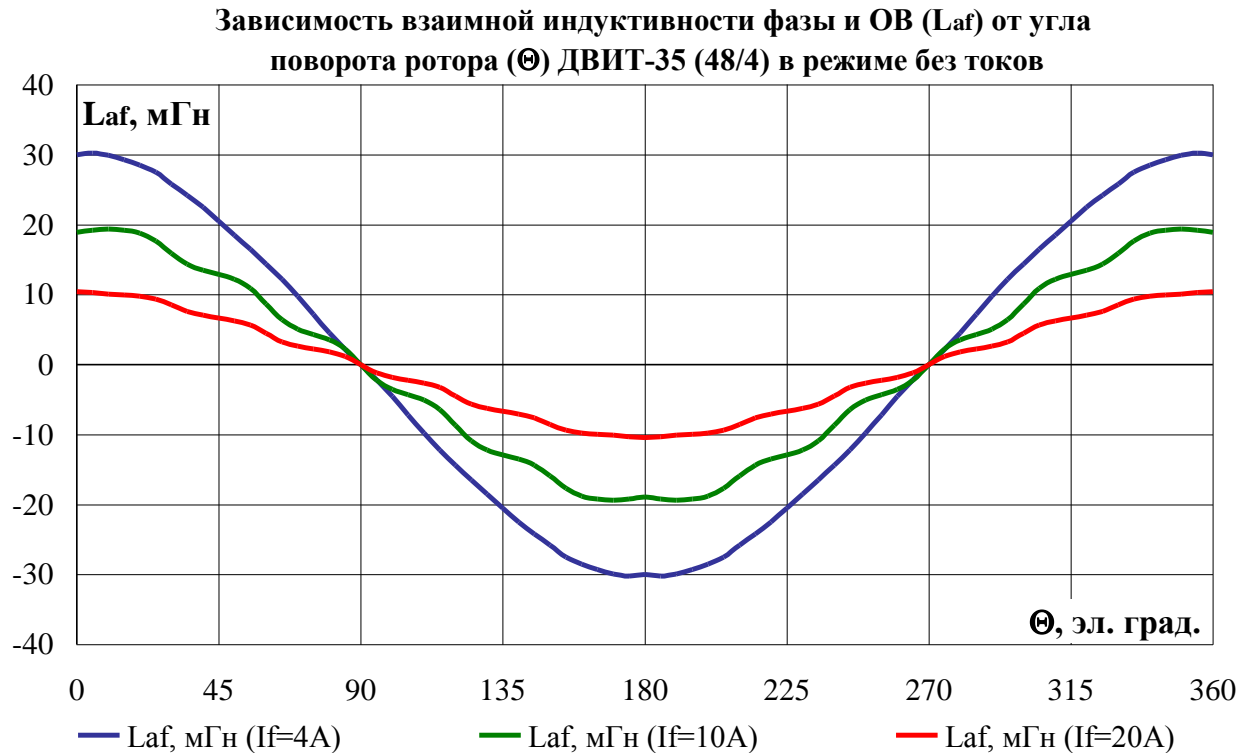


Рис. 2.3. Расчетные индуктивности и взаимные индуктивности опытного ВИД НВ мощностью 35кВт.

Кроме того, разработчиками двигателя был предоставлен расчетный график поверхности, определяющий зависимость электромагнитного активного момента двигателя (без учета потерь) от тока статора и тока возбуждения – Рис. 2.4.

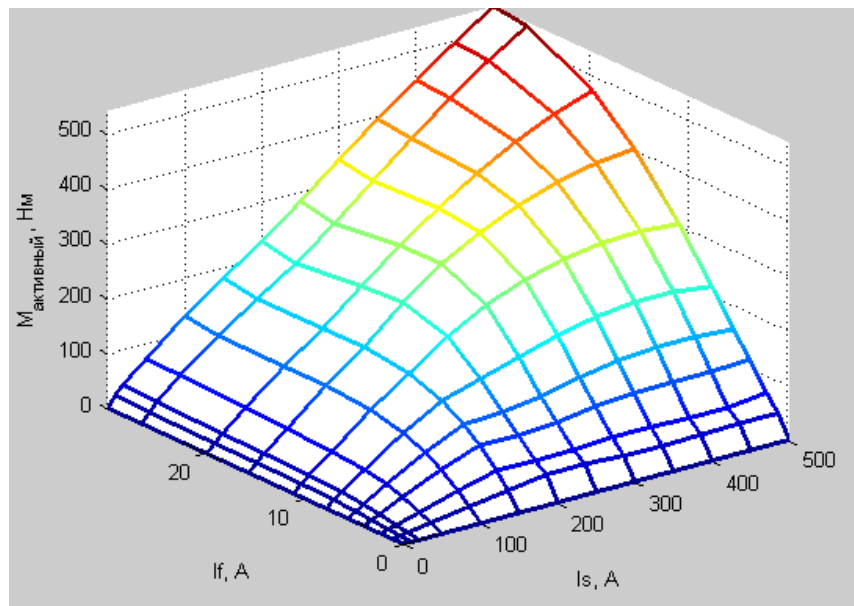


Рис. 2.4. Расчетная поверхность зависимости электромагнитного момента от амплитуды тока статора I_s и тока возбуждения I_f при оптимальной фазе тока статора

Специализированный преобразователь для двигателя проектируется научной группой Острирова В.Н. (кафедра АЭП НИУ «МЭИ», ООО "НПП Цикл+", г.Москва). Преобразователь содержит шестиключевой инвертор напряжения и полумостовой возбудитель. Напряжение звена постоянного тока преобразователя 540В, максимальный амплитудный ток статора 600А, максимальный ток возбуждения 40А. Управляться преобразователь должен от контроллера, разработанного научной группой Козаченко В.Ф. (каф. АЭП НИУ «МЭИ», ООО "НПФ Вектор", г.Москва) – МК17.3 на базе процессора TMS320F2810.

2.3 Выбор типа системы управления для ВИД НВ

При разработке системы управления двигателем существует множество возможностей, однако наиболее рационально отталкиваться от уже существующих проверенных систем управления, модифицировав их структуру в случае необходимости. В [8] рассматриваются две основные структуры управления для ВИД НВ. Это вентильный режим с автокоммутацией по датчику положения ротора и релейным поддержанием токов фаз, а также векторное датчиковое управление с ПИ-регуляторами тока и ШИМ. Оба этих способа управления имеют свои преимущества и недостатки. Более простые режимы управления, такие как скалярное, частотно-токовое не рассматриваются, так как ведут себя удовлетворительно только в установившемся режиме работы привода и не обеспечивают необходимого быстродействия для динамичного тягового привода.

Рассмотрим основные преимущества и недостатки вентильного и векторного режимов управления.

Вентильный режим с автокоммутацией по датчику положения ротора

Преимущества:

1. Простота реализации. От системы управления требуется только блок коммутации фаз в зависимости от угла положения ротора и блок токоограничения.

2. Хорошая динамика контура тока. За счет релейного управления токами фаз время отработки задания тока очень мало и ограничивается лишь физическим процессом нарастания тока, а не инерционностью системы управления (по сравнению с ПИ-регулятором).

Недостатки:

1. Неоднозначность настройки углов коммутации и уровня тока от частоты вращения и нагрузки. Известно, что угол включения и выключения фазы можно настраивать по совершенно различным методикам – одни направлены на уменьшение шума, другие уменьшения уровня тока, третьи на улучшение КПД. Причем углы коммутации для обеспечения выбранного оптимума должны изменяться как от частоты вращения (классически), так и от нагрузки. Вычисление или экспериментальное определение таких зависимостей представляет собой трудную задачу.
2. Сложность вычисления текущего момента на валу и отработки его задания. Для тягового привода система управления верхнего уровня должна управлять моментом привода и в обратной связи получать текущий момент (обосновано ниже). В случае с управлением по алгоритму автокоммутации связать математически значение момента на валу с уровнем тока статора и возбуждения очень сложно – в функцию войдет также частота вращения привода. Наиболее оптимально выполнить калибровку расчета момента на лабораторном стенде, но для этого нужен стенд с датчиком момента и прохождение всего диапазона частот вращения и нагрузок.
3. Шум и большие пульсации тока. При ограниченном быстродействии системы управления и ограниченной частоте коммутации силовых ключей инвертора релейное поддержания токов фаз обычно приводит к увеличенным пульсациям тока в обмотках и шуму по сравнению с применением ШИМ. Сам же алгоритм автокоммутации приводит к

пульсациям момента, так как углы коммутации чаще всего выбираются исходя из оптимума КПД или минимума тока статора, при этом форма момента двигателя часто получается пульсирующей.

Векторное датчиковое управление с ПИИ-регуляторами тока и ШИМ

Преимущества:

1. Линейность и однозначность настройки. По сравнению с режимом автокоммутации не требуется подбирать сложные нелинейные зависимости для обеспечения оптимальной работы.
2. Изменяемая частота ШИМ позволяет найти компромисс между шумом, пульсаций тока и потерями в преобразователе. Так, на высоких частотах вращения частота тока может достигать 500Гц и выше. Для качественного формирования синусоидального тока частота ШИМ при этом должна быть на порядок выше. Современные IGBT ключи 12-го класса легко позволяют получать частоту коммутации 10-15кГц при относительно невысоких токах (70-100А). При низкой частоте вращения для создания требуемого на валу момента уровень тока должен быть относительно большим (сотни ампер), однако требования к необходимой частоте ШИМ понижаются. Таким образом, чтобы снизить потери в преобразователе рационально снижать частоту ШИМ на больших токах и повышать при низких токах, обеспечивая тем самым оптимум между шумом, пульсациями тока и потерями в преобразователе.
3. Отсутствие пульсаций момента. Векторное управление оперирует синусоидальными величинами, в результате чего момент двигателя имеет минимум пульсаций по сравнению с режимом автокоммутации.

Недостатки:

1. Уменьшение устойчивости на высоких частотах вращения. При повышении частоты тока в приводе становятся сильнее заметны

задержки в системе управления: задержка АЦП по измерению токов, задержка ШИМ при воспроизведении заданного напряжения, задержка в модуле датчика положения, задержка на расчет процессором структуры управления и т.п. Все эти задержки приносят искажение фазы векторов, с которыми работает система векторного управления и уменьшает устойчивость. Кроме того, с ростом частоты в соответствии с математической моделью машины усиливается взаимосвязь между осями d и q , что также отрицательно сказывается на устойчивости.

2. Малая динамика контура тока для компенсации паразитных гармоник. В ряде случаев форма тока отличается от синусоидальной по ряду причин – искажения мертвого времени инвертора, несинусоидальность ЭДС машины и т.п. ПИ-регуляторы тока на высокой частоте вращения не успевают компенсировать нелинейные искажения, из-за чего токи фаз могут содержать заметные паразитные гармоники. Релейные регуляторы тока, применяемые в системе управления с автокоммутацией, гораздо лучше воспроизводят заданную форму тока.

Кроме того, судя по расчетным параметрам опытного электродвигателя, индуктивность фазы относительно мала (около $0,5\text{ мГн}$) – например, в асинхронных двигателях аналогичной мощности индуктивность рассеяния фазы составляет единицы мГн . Индуктивность фазы напрямую влияет на уровень пульсаций тока в обмотке фазы от коммутаций ключей инвертора напряжения. Уровень пульсаций тем меньше, чем выше частота коммутации ключей и чем больше индуктивность фазы. Сопротивлением фазы в данном случае можно пренебречь в силу его малости. В цифровой системе релейного поддержания тока частота коммутаций ключей традиционно оказывается ниже, чем при использовании ШИМ из-за ограниченного быстродействия аналоговых каналов измерения тока и ограниченного быстродействия цифровой системы управления. Это приводит к бóльшим пульсациям тока в

обмотке по сравнению с ШИМ. И если для асинхронных двигателей с относительно большой индуктивностью фазы эти пульсации не критичны, то для данного двигателя они могут оказаться значительны. Для борьбы с пульсациями тока пришлось бы усложнять систему управления, увеличивая пропускную способность аналоговых каналов и частоту дискретизации цифровой системы управления, чтобы обеспечить более высокую реакцию на изменение тока в фазе. В этом плане векторная система управления двигателем с использованием ШИМ оказывается также более предпочтительной.

Обобщая все преимущества и недостатки обеих систем управления, можно заключить, что векторная система управления с ШИМ более перспективна и оптимальна для тягового электропривода на базе ВИД НВ.

2.4 Структура векторной системы управления

Структура векторной системы управления стандартна и рассматривалась в [8], [5] и приведена на Рис. 2.5.

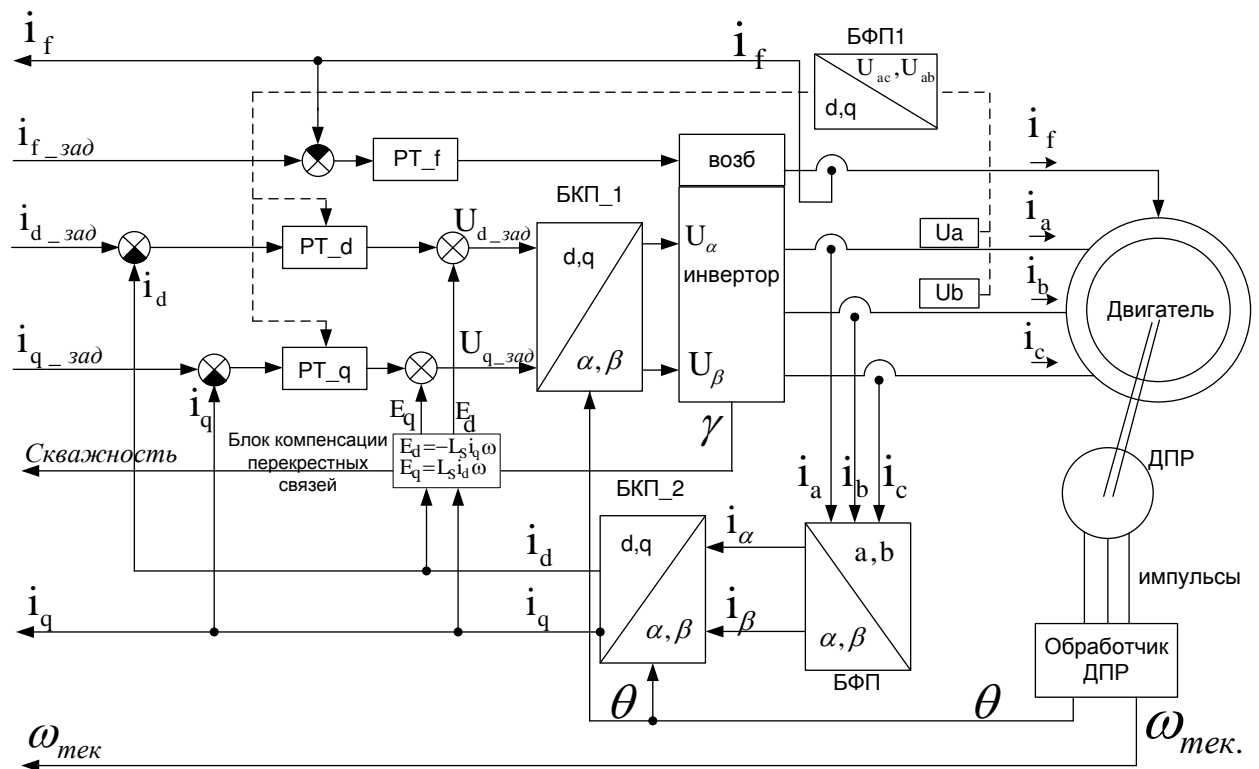


Рис. 2.5. Векторная система управления ВИД НВ

Приведем пояснение к работе структуры. Двигатель имеет три фазы, однако система управления строится в двухфазных осях координат. Для

этого все трехфазные величины (токи, напряжения) преобразуются к двухфазным с помощью блоков БФП и БФП1 (блок фазных преобразований). Большая часть системы управления функционирует во вращающейся системе координат, жестко связанной с ротором двигателя. Она имеет две оси: ось d , ориентированную по потоку ротора и ось q , перпендикулярную ей. Ток по оси q создает момент двигателя. Ток по оси d может использоваться для режима ослабления поля. Для преобразования от статических осей координат α и β , связанных со статором и неподвижных, к осям d q , служит блок координатных преобразований БКП, обеспечивающий поворот системы координат на требуемый угол.

Задание тока по оси q попадает на сумматор ПИ-регулятора тока по оси q , выходом которого является задание напряжения по оси q . В обратную связь регулятор получает текущий ток по оси q из блока БКП_2. Аналогично функционирует регулятор тока по ортогональной оси d .

Напряжения с регуляторов токов, суммируясь с выходом блока компенсации перекрестных связей, поступают на БКП_1 (поворот системы координат на угол Θ), а затем заводятся на инвертор напряжения, который при помощи ШИМ реализует заданный ему вектор напряжения. Измеренные значения токов фаз двигателя i_a , i_b , i_c поступают на вход блока фазных преобразований БФП. В этом блоке они преобразуются из трехфазной системы координат в двухфазную декартову систему координат α , β . Токи i_α , i_β поступают на блок координатных преобразований БКП_2, поворачивающих систему координат на угол Θ . На выходе блока оказываются фактические значения токов в системе координат d , q , ориентированной по потокосцеплению ротора. Эти значения используются в качестве сигналов обратных связей на входах регуляторов токов по осям d , q .

Для управления возбуждением также используется регулятор тока PT_f , который для простоты в силу большой индуктивности ОВ может быть релейным.

Датчик положения ротора (ДПР) выдает три канала дискретных импульсов от трех элементов Холла, срабатывающих при повороте магнитного ротора датчика положения. Всего датчик имеет 6 различных состояний: 0, 60, 120, 180, 240, 300 электрических градусов. Программный модуль «Обработчик ДПР» принимает указанные сигналы от датчика положения и линейно экстраполирует дискретное угловое положение, выдавая линейно изменяющееся угловое положение Θ .

Приведенная Рис. 2.5 структура векторного управления содержит три канала управления: $i_{q_зад}$, $i_{d_зад}$, $i_{f_зад}$. Далее необходимо синтезировать структуру, определяющую управление по этим трем каналам от задания системы управления верхнего уровня и выбрать, по какому каналу должен управляться привод целиком.

2.5 Выбор координаты управления приводом

Необходимо определить, какой координатой должен управляться привод. Существует четыре основных стратегии, каждая из которых обладает своими преимуществами и недостатками:

- 1) Задание частоты вращения привода;
- 2) Задание уровня тока;
- 3) Задание мощности;
- 4) Задание момента.

Каждая из этих стратегий имеет право на существование и обладает своими достоинствами и недостатками.

Задание частоты вращения привода

Преимущества:

1. Для скалярной системы управления (популярное решение для асинхронного привода) это единственно-возможный способ управления.
2. Большинство серийных преобразователей частоты имеют штатный регулятор частоты вращения и некоторые из них позволяют задавать

только частоту вращения. Таким образом, при использовании готового продукта управление частотой вращения может оказаться единственным возможным вариантом.

Недостатки:

1. Управление частотой вращения менее удобно и привычно для водителя пневмоколесных машин. В классических пневмоколесных транспортных средствах «педаль газа» задает мощность. Пересчет задания мощности от педали водителя в задание частоты вращения на стороне контроллера верхнего уровня затруднителен, так как для этого требуется точное значение текущего момента.
2. При повороте пневмоколесной машины двигатели правого и левого бортов должны вращаться с разной частотой вращения (функция дифференциала). В случае управления частотой вращения и индивидуальном приводе колеса системе управления верхнего уровня требуется обязательная информация о положении рулевого колеса водителя, чтобы рассчитать и задать верные частоты вращения для каждого электродвигателя.
3. В случае «жесткой» настройки регуляторов частоты вращения возможны автоколебания в тех или иных режимах движения, при начале движения и останове.
4. В случае если задание педали «газа» без какого-либо пересчета поступает непосредственно в качестве задания частоты вращения привода, то могут возникнуть сложности с режимом электрического торможения. Отпускание педали «газа» означает задание нулевой скорости, и при разрешенной рекуперации приведет к электрическому торможению с максимальным темпом замедления.

Задание уровня тока оси I_q

Преимущества:

1. Наиболее простой и естественный способ. Классически используется для приводов постоянного тока (задание тока якоря), вентильного привода.
2. Автоматически реализуется функция электрического дифференциала при индивидуальном приводе каждого колеса. При повороте машины двигатели могут вращаться с различной частотой, но одинаковое задание тока будет означать одинаковый момент внутреннего и наружного борта, а значит на машине не возникнет дополнительных крутящих сил при повороте (обеспечивается нейтральная поворачиваемость).

Недостатки:

1. Задание уровня тока лишь приблизительно соответствует заданию момента (в зависимости от способа управления возбуждением машины). Между током и моментом есть нелинейная зависимость. Из-за этого системе управления нельзя точно задать момент на каждом колесе, а значит качественно реализовать интеллектуальные системы помощи водителю – антиблокировочную и антипробуксовочную системы.

Задание мощности

Преимущества:

1. При непосредственном задании мощности каждого двигателя положение педали газа без какой-либо обработки можно сразу передавать на все двигатели в качестве задания мощности. Управление машиной с точки зрения водителя при этом максимально похоже на классическое управление пневмоколесной машиной с ДВС и механической трансмиссией.

Недостатки:

1. При одинаковом задании мощности на все двигатели функция автоматического дифференциала работает, но некачественно – при

разной частоте вращения правого и левого бортов моменты также будут отличаться. Борт, имеющий меньшую скорость, будет иметь больший момент.

2. Для реализации качественной антипробуксовочной и антиблокировочной систем в контроллере управления верхнего уровня потребуется пересчет задания момента в задание мощности, так как эти системы оперируют при своей работе моментами колес.

Задание момента

Преимущества:

1. Автоматически реализуется функция электрического дифференциала при индивидуальном приводе каждого колеса. При повороте машины двигатели могут вращаться с различной частотой, но при одинаковом заданном моменте не возникнет дополнительных крутящих сил при повороте (обеспечивается нейтральная поворачиваемость).
2. Задание момента каждому колесу удобно для системы управления верхнего уровня при реализации на ней систем помощи водителю – антипробуксовочной и антиблокировочной систем.

Недостатки:

1. Чтобы имитировать традиционное управление педалью газа – управление мощностью, потребуется пересчет задания педали газа (мощность) в момент двигателей с учетом текущей частоты вращения машины в контроллере верхнего уровня.
2. Учитывая большой диапазон изменения момента тягового привода (15-20 крат) в зависимости от скорости, требуется внимательно относиться к выбору типа цифровых данных для задания момента. Так, если использовать для задания момента двигателя 1 байт данных и иметь возможность задавать через него как положительный, так и отрицательный моменты, то на высокой скорости остается лишь 6 ступеней (дискрет) для регулирования момента.

Рассматривая все приведенные варианты, для вновь разрабатываемой системы управления наиболее перспективно выглядит вариант управления моментом двигателя. Так как контроллер верхнего уровня в архитектуре трансмиссии присутствует, пересчет задания педали газа, трактуемого как задание мощности, в задание моментов на колесах не должно вызывать затруднений.

2.6 Разработка структуры предварительной обработки задания

Выше для ВИД НВ была обоснована векторная система управления, а также выбрана координата, по которой управляется привод – задание момента. Следующим шагом является разработка структуры, которая из задания момента от контроллера верхнего уровня формировала бы задания для векторной системы управления: $i_{q_зад}$, $i_{d_зад}$, $i_{f_зад}$.

В простейшем случае $i_{d_зад}$ может быть принят равным нулю, так как этот ток отвечает за реактивную составляющую и не влияет на момент двигателя. Активный момент, согласно линеаризованной модели двигателя [8], определяется выражением:

$$M = L_m \cdot i_f \cdot i_q \quad (2.1)$$

Отсюда видно, что момент пропорционален произведению тока возбуждения на ток по оси q. Необходимо разработать стратегию управления этими токами в зависимости от заданного момента, так как один и тот же момент можно реализовать различным сочетанием токов.

Существует три известных стратегии управления токами, которые были разработаны еще для электропривода постоянного тока применительно к току якоря и току возбуждения.

Двухзонное регулирование

Метод основан на поддержании тока возбуждения номинальным до определенной частоты вращения с последующим ослаблением поля по мере роста частоты вращения. Ток якоря же регулируется в зависимости от заданного момента. Для тяговых электродвигателей сложно выбрать

величину, которую можно было бы назвать номинальным током возбуждения. Электродвигатель рассчитывается и проектируется таким образом, что реализовать максимальный момент он может только при одновременно максимальном токе статора и возбуждения, причем продолжительность его работы в таком режиме составляет короткое время – дальше наступает перегрев как обмоток статора, так и возбуждения. Таким образом, если считать за номинальный ток возбуждения максимально-допустимый, то данный алгоритм управления непригоден – при работе на низкой частоте вращения двигатель перегреется по обмотке возбуждения вне зависимости от того, был ли он нагружен или вращался на холостом ходе. Если же принять за номинальный ток возбуждения длительно допустимый по нагреву ток, то тогда в соответствии с этим алгоритмом нельзя будет развить максимальный момент, так как ток возбуждения будет для этого недостаточен. Вывод: для двигателей, предназначенных для работы в перегрузке, данная стратегия управления токами непригодна. Кроме того, постоянно поддерживающийся на максимальном уровне ток возбуждения создает дополнительные потери и ухудшает КПД.

Регулирование тока ОВ обратно пропорционально частоте вращения

Метод аналогичен предыдущему и заключается в управлении током возбуждения обратно пропорционально частоте вращения независимо от нагрузки и заданного момента. Такая стратегия управления также не подходит по тем же причинам – неминуемый перегрев обмотки возбуждения на низких частотах вращения.

Регулирование тока ОВ пропорционально току статора: имитация машины последовательного возбуждения

Эта стратегия управления классически используется в тяговых приводах постоянного тока. За счет последовательного соединения обмотки якоря и возбуждения ток в обеих обмотках изменяется одинаково. При этом на

холостом ходе ток в обеих обмотках отсутствует, потери в двигателе минимальны. При максимальном задании момента ток в обеих обмотках двигателя максимальный, за счет чего реализуется максимальный момент. При умеренной нагрузке возможна длительная работа без перегрева, так как тепловая нагрузка равномерно распределена между обмотками якоря и возбуждения. В двигателе ВИП НВ реализовать аппаратную связь между обмотками статора и возбуждения возможно, но не рационально: для этого потребуется проектировать обмотку возбуждения на тот же ток, что и обмотка статора (конструктивно удобнее проектировать на меньший ток), а также использовать дополнительную схему выпрямителя в статорных обмотках. Поэтому наиболее целесообразно реализовать программную имитацию машины последовательного возбуждения: за счет системы управления регулировать токи статора и ток возбуждения пропорционально друг другу – так, чтобы максимальному току статора соответствовал максимальный ток возбуждения. Кроме того, данная стратегия также видится единственно-возможной исходя из анализа расчетной зависимости момента двигателя от тока статора и тока возбуждения, приведенной на Рис. 2.4. Вследствие насыщения магнитопровода двигателя зависимость активного момента нелинейно зависит от тока статора и тока возбуждения. Формула (2.1), выведенная из линеаризованной модели двигателя, дает неточный результат. Из Рис. 2.4 следует, что увеличение одного тока без увеличения другого не приводит к увеличению момента. Например, видно, что при токе возбуждения I_f равном 2-3А увеличение тока статора I_s от 100А до 550А не приводит к увеличению момента (момент не становится выше 70Нм). Аналогично, при токе статора 50А увеличение тока возбуждения сверх 10А не приводит к увеличению момента (момент не становится выше 70Нм). При совместном увеличении тока статора и тока возбуждения момент увеличивается приблизительно по квадратичной зависимости и достигает в максимуме 550Нм. Таким образом, стратегия регулирования тока ОВ пропорционально току статора выбирается в качестве основной и на её

основе синтезируется структура, осуществляющая соответствующее управление токами.

Для преобразования задания момента к заданиям токов удобно перевести формулу (2.1) к относительным единицам. Несмотря на то, что формула недостаточно точно описывает зависимость момента от токов вследствие нелинейности двигателя, при пропорциональном совместном изменении токов её ошибка невелика.

Положим значение тока обмотки возбуждения в относительных единицах равным:

$$i_f^* = \frac{i_f}{i_{f_max}},$$

где

i_{f_max} соответствует максимально-допустимому току обмотки возбуждения.

Положим значение тока статора в относительных единицах равным:

$$i_q^* = \frac{i_q}{i_{q_max}},$$

где

i_{q_max} соответствует максимально-допустимому амплитудному току статора.

Тогда значение момента в относительных единицах будет равно:

$$M^* = i_q^* \cdot i_f^*.$$

Задание момента в относительных единицах будет связано с заданиями токов в относительных единицах как:

$$M_{\text{зад}}^* = i_{q_зад}^* \cdot i_{f_зад}^*.$$

Так как согласно выбранной стратегии управления по имитации машины последовательного возбуждения задание тока статора и тока возбуждения должны меняться пропорционально, то в относительных единицах измерения должно выполняться их равенство:

$$i_q^* = i_f^*.$$

Отсюда следует, что

$$M_{\text{зад}}^* = i_{q\text{-зад}}^* \cdot i_{q\text{зад}}^* = i_{f\text{-зад}}^* \cdot i_{f\text{-зад}}^*.$$

Или

$$i_{q\text{-зад}}^* = i_{f\text{-зад}}^* = \sqrt{M_{\text{зад}}^*} \quad (2.2)$$

Учитывая то, что знак задания момента может быть отрицательным, корректнее данное выражение переписать следующим образом:

$$\begin{cases} i_{q\text{-зад}}^* = \text{sign}(M_{\text{зад}}^*) \cdot \sqrt{|M_{\text{зад}}^*|} \\ i_{f\text{-зад}}^* = \sqrt{|M_{\text{зад}}^*|} \end{cases} \quad (2.3)$$

Однако при больших задания момента может сложиться ситуация, что регуляторы токов не смогут воспроизвести задание тока оси q из-за нехватки напряжения на инверторе. В этом случае фактическое значение тока статора окажется меньше заданного, а ток возбуждения сможет всегда отработать заданную величину, так как у него нет сдерживающих факторов. В этом случае будет нарушена пропорциональность между током статора и током возбуждения, что ухудшит характеристики привода. Для противодействия этому можно присваивать задание тока возбуждения выбирая минимум из текущего тока статора и задания возбуждения, рассчитанного из значения момента:

$$\begin{cases} i_{q\text{-зад}}^* = \text{sign}(M_{\text{зад}}^*) \cdot \sqrt{|M_{\text{зад}}^*|} \\ i_{f\text{-зад}}^* = \min \left(i_q^*, \sqrt{|M_{\text{зад}}^*|} \right) \end{cases} \quad (2.4)$$

Исходя из данных выражений можно синтезировать структуру, имитирующую машину последовательного возбуждения Рис. 2.6.

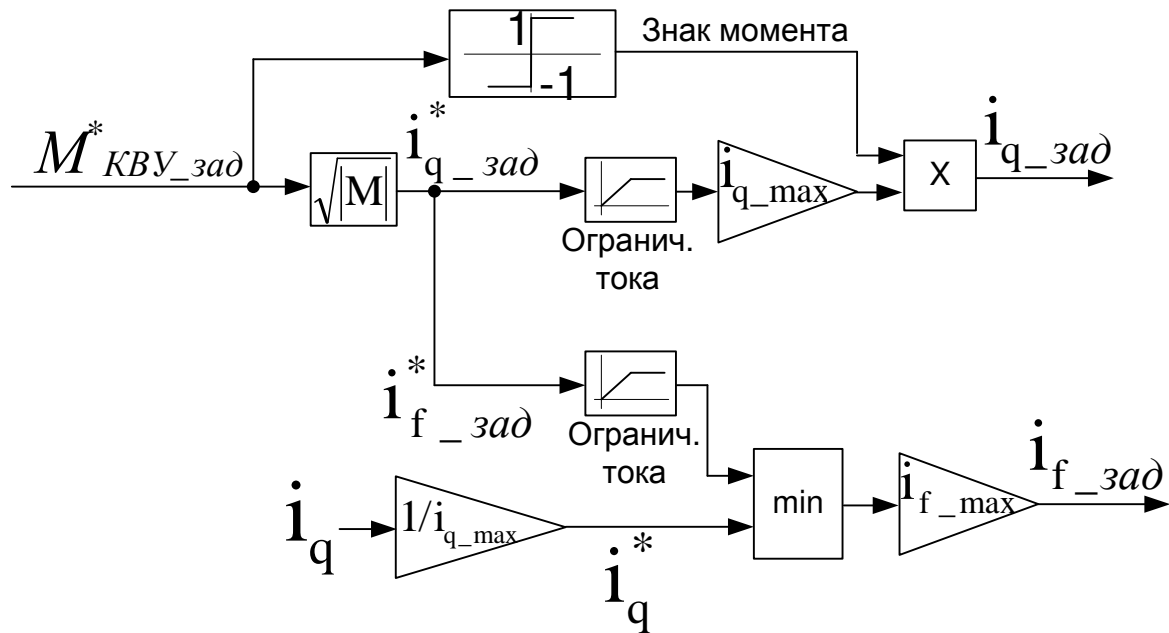


Рис. 2.6. Структура, преобразующая задание момента в задания токов с имитацией машины последовательного возбуждения

$M_{\text{КВУ_зад}}^*$ – заданный момент в относительных единицах, поступает через интерфейс связи от контроллера верхнего уровня (КВУ) персонально каждому приводу. Из его модуля извлекается квадратный корень, что образует два задания токов – тока статора оси q и тока возбуждения в относительных единицах. После прохождения через блок ограничения эти величины умножаются на свои максимальные значения в физических единицах, для перехода от относительных единиц к физическим. Далее у задания тока статора оси q восстанавливается знак задания момента, после чего все три задания токов передаются в систему векторного управления, структура которой приводилась на Рис. 2.5.

Такая структура работоспособна, однако в системе управления приводом желательно решить еще несколько сервисных задач, упрощающих алгоритмы в контроллере верхнего уровня.

Первой задачей является ограничение максимальной частоты вращения привода для обеспечения безопасности. Несмотря на задание момента от КВУ, частота вращения не должна превысить установленных наладчиком уставок ограничения. Для этого необходимо постобработкой ограничить задание момента при достижении приводом большой частоты вращения. При

этом желательно ограничить только разгоняющий привод момент, но не тормозящий, чтобы останавливать привод была возможность с любой частоты вращения, например, если такая повышенная частота вращения вызвана спуском транспортного средства со склона.

Вторая задача связана с обеспечением согласованной автономной работы всех устройств электротрансмиссии в целом. Эта тема будет более подробно рассмотрена далее в главе, где данное решение будет обосновано. Сейчас примем необходимость ограничения момента в зависимости от напряжения звена постоянного тока привода. Как при повышении, так и при понижении напряжения ЗПТ выше/ниже определенных уставок, заданный момент должен уменьшаться до нуля.

Данные ограничения можно выполнить двумя наиболее простыми способами – обнулением момента при выходе величины за ограничение либо плавным (линейным) снижением момента до нуля в определенном диапазоне. Второй вариант аналогичен применению пропорционального регулятора с определенным образом настроенными ограничениями выхода. Вариант с линейным ограничением момента более предпочтителен, так как регулировкой диапазона ограничения (другими словами коэффициента пропорционального регулятора) можно добиться отсутствия колебательного процесса, который неизбежно присутствовал бы в дискретном способе ограничения.

Третья задача – улучшить диапазон регулирования привода за счет управления током оси d . Выше было сказано, что ток оси d не влияет на момент, так как не входит в формулу момента, вследствие чего этот ток можно положить равным нулю. Это действительно так, однако создание тока по оси d все же может привести к улучшению характеристик привода. При работе на высокой частоте вращения задание относительно большого уровня момента приведет к большому заданию тока статора и тока возбуждения. Если напряжения инвертора будет недостаточно для создания требуемого тока статора, то фактический ток статора окажется меньше заданного, что

приведет к невозможности реализовать заданный момент. Рассмотрим, на какие составляющие «тратится» напряжение инвертора исходя из линеаризованной модели ВИД НВ в координатах d,q, приведенной в [8]:

$$\begin{cases} u_d = R_s i_d + \frac{d\Psi_d}{dt} - \omega \Psi_q \\ u_q = R_s i_q + \frac{d\Psi_q}{dt} + \omega \Psi_d \\ u_f = R_f i_f + \frac{d\Psi_f}{dt} \end{cases}, \text{ где потоки машины } \begin{cases} \Psi_d = L_s i_d + L_m i_f \\ \Psi_q = L_s i_q \\ \Psi_f = L_f i_f + L_m i_d \end{cases} \quad (2.5)$$

Здесь:

u_d, u_q, u_f – напряжения, прикладываемые к двигателю по осям d,q и обмотке возбуждения,

R_s, R_f – сопротивления обмотки статора и возбуждения,

ω – электрическая частота вращения ротора двигателя,

Ψ_d, Ψ_q, Ψ_f – потокосцепления по осям d,q и обмотки возбуждения,

L_s, L_f, L_m – индуктивности обмотки статора, возбуждения и взаимоиндуктивность.

Рассмотрим каждую составляющую напряжения оси d и q. Для электродвигателя большой средней и большой мощности (10кВт и выше), рассчитанных на низкое напряжение, сопротивление статорных обмоток мало (около 1-50 мОм), вследствие чего составляющими $R_s i_d$ и $R_s i_q$ можно пренебречь. В статическом режиме работы составляющие $\frac{d\Psi_d}{dt}$ и $\frac{d\Psi_q}{dt}$ также равны нулю. Соответственно, в статическом режиме напряжения на выходах регуляторов можно считать следующими:

$$\begin{cases} u_d = -\omega L_s i_q \\ u_q = \omega L_s i_d + \omega L_m i_f \end{cases} \quad (2.6)$$

Отсюда видно, что для снижения общего вектора напряжения можно:

1. Снижать ток оси q. Но это приведет к снижению момента.

2. Снизить ток возбуждения. Но это также приведет к снижению момента.
3. Создать отрицательный ток по оси d , чтобы компенсировать составляющую ЭДС машины $\omega L_m i_f$.

Таким образом, создание отрицательного тока оси d позволит уменьшить прикладываемое к двигателю напряжение, не уменьшив при этом момент. А значит, при нехватке напряжения на инверторе создание отрицательного тока оси d позволит реализовать заданный момент, несмотря на первоначальную нехватку напряжения. Такой метод называется ослаблением поля двигателя током статора и успешно применяется для синхронных машин с постоянными магнитами, для которых этот метод является единственным для возможности работы на высокой скорости. Для ВИД НВ этот метод нужен лишь для увеличения максимальной мощности в зоне высоких скоростей. Следует отметить, что не следует применять слишком глубокое ослабление поля таким методом, так как отключение инвертора при срабатывании какой-либо защиты приведет к падению тока оси d . Если при этом ЭДС машины была значительно выше напряжения питания инвертора, то произойдет неконтролируемая рекуперация энергии в звено постоянного тока, рост напряжения на нем, что в конечном итоге может привести к выходу инвертора из строя. Кроме того, большой уровень тока оси d негативно скажется на КПД привода. Полностью безопасным является уменьшение напряжения на инверторе до величины ЭДС машины, т.е. компенсация составляющей $-\omega L_s i_q$ – реактивной части вектора напряжения.

На Рис. 2.7 показана конечная структура для предварительной обработки задания момента, включающая в себя структуру преобразования задания момента в задания токов, структуру ограничения момента по напряжению и частоте вращения, структуру для ослабления поля по оси d и структуру для вычисления текущего значения момента.

Структура ослабления поля за счет создания тока по оси d контролирует текущий процент использования напряжения инвертором, выраженный величиной «Скважность». Если скважность становится выше 85%, т.е. практически весь запас по напряжению на инверторе исчерпан, формируется отрицательное задание тока оси d . Причем задание повышается с ростом скважности. На 85% задание тока оси d равно нулю, а к 100% повышается до максимального, зависящего от коэффициента регулятора K и последующего ограничения тока. Чтобы исключить колебательный процесс, который может появиться из-за быстрой реакции регуляторов тока на изменение задания тока оси d , задание тока пропущено через инерционное звено первого порядка. Чтобы гарантированно исключить колебательный процесс, постоянная времени инерционного звена должна быть на порядок больше времени регулирования регуляторов тока. Обычно контур тока функционирует на высокой частоте и его время регулирования лежит в пределах 0,1 – 10мс. Таким образом, постоянная времени инерционного звена может быть выбрана около 500мс. Высокое быстродействие по контуру ослабления поля оси d не обязательно – так как ослабление поля требуется только на большой частоте вращения, а динамика изменения частоты вращения тягового привода равна динамике разгона транспортного средства до максимальной скорости движения. Для многоколесного тягача это время составляет 30-100 секунд, а значит, задержка в 500мс на ослабление поля привода не будет заметна в общем времени разгона.

2.7 Взаимодействие системы управления тяговым приводом с другим оборудованием электротрансмиссии

С первого взгляда на проблему сопряжения работы всех устройств электротрансмиссии (генератора, двигателей, накопителя/аккумулятора, тормозных резисторов) кажется, что рациональнее всего эту задачу возложить на контроллер верхнего уровня, который связан интерфейсами связи со всеми устройствами и может «одновременно» раздавать необходимые задания. Из этого следует, что алгоритмы управления тягового

привода не должны содержать в себе никакой логики, касающейся взаимодействия с другими устройствами. Однако рассмотрим проблему подробнее.

Можно синтезировать много различных алгоритмов взаимосвязанной работы устройств, где контроллер верхнего уровня мог управлять бы различными координатами устройств – например, током возбуждения генератора, или его мощностью, или его током I_d , для тормозных резисторов можно было бы задавать напряжение на них или мощность, для преобразователя молекулярного накопителя/аккумулятора можно бы было управлять заданием, например, тока аккумулятора и т.п. Можно даже было бы синтезировать формулы, где, независимо от того, какая координата какого устройства выбрана для управления, все задания и уставки связывались бы воедино и система была бы работоспособна. Однако при проектировании такой системы необходимо учитывать, что микропроцессорная система транспортного средства распределенная и связана интерфейсами связи, имеющими ограниченное быстродействие. Ошибочный путь – спроектировать взаимосвязанные алгоритмы управления устройствами, которые будут вычисляться в контроллере верхнего уровня, а потом обнаружить, что для их реализации потребуется настолько быстрая передача данных, что потребуется применять специализированный высокоскоростной интерфейс связи. Быстродействующие интерфейсы связи действительно применяются в сфере сервоприводов, однако для транспортного средства полагаться в базовых алгоритмах управления на высокоскоростной интерфейс нельзя по причине большой длины кабельных соединений, высокого уровня помех, сложных условий эксплуатации техники. Традиционным и проявившим себя с хорошей стороны в транспортном применении является интерфейс связи CAN, работающий на скоростях 125-500кбит/с. При количестве устройств в сети CAN порядка 15 и выше (например, контроллеры преобразователей 8ми тяговых двигателей, генератора, тормозных резисторов, накопителя, контролера верхнего уровня,

светотехники и прочего) для задачи мониторинга основных параметров устройств и управления ими не стоит рассчитывать на время цикла опроса менее 50-100 мс. Исходя из этого, требуется синтезировать такие алгоритмы взаимосвязанного управления устройствами, чтобы им не приходилось обмениваться информацией чаще, чем раз в 100мс – при этом должна обеспечиваться устойчивость. Кроме того, следует заложить запас на случай пропадания одной или нескольких посылок в сети из-за помех – система управления как минимум не должна привести при этом к аварийному отключению, а желательно, чтобы никаких заметных изменений в работе при плохом качестве связи не было вообще.

Самым чувствительным к регулированию параметром в электротрансмиссии является напряжение звена постоянного тока. Так, по данным конструкторов силового оборудования суммарная ёмкость звена постоянного тока для электротрансмиссии из 8ми тяговых двигателей/преобразователей мощностью по 35кВт каждый составляет около 15мФ. Запасенная энергия при номинальном напряжении питания 540В составляет:

$$W = \frac{CU^2}{2} = \frac{15 \cdot 10^{-3} \cdot 540^2}{2} = 2,2 \text{кДж}$$

Представим ситуацию, когда контроллер верхнего уровня дал команду всем тяговым двигателям развить максимальный момент (потреблять максимальную мощность), а генератор по каким-то причинам не смог оперативно отреагировать на внезапный отбор энергии (долгое нарастание потока возбуждения, ожидание соответствующей команды от контроллера верхнего уровня, медленные регуляторы и т.п.). Приближенным расчетом оценим время, за которое тяговые двигатели израсходуют всю энергию, запасенную в конденсаторах, потребляя суммарную мощность 300кВт.

$$t = \frac{W}{P} = \frac{2200}{300000} = 7,3 \text{мс}$$

Очевидно, что даже организовав достаточно быстродействующий канал связи, контроллер верхнего уровня не успеет среагировать на такой быстрый

температуры снижения напряжения в звене постоянного тока и снять задание момента с приводов, чтобы дать генератору время его восстановить. Не говоря уже о том, что значительные пульсации в звене постоянного тока вообще недопустимы, так как на нем присутствуют другие потребители энергии (вентиляторы охлаждения, источники питания и т.п.). Увеличение ёмкости звена постоянного тока не является верным решением, так как это не требуется для штатной корректной работы инверторов преобразователей, а решать вопросы системы управления изменением аппаратной части, увеличивая размер блоков преобразователей, нежелательно. Из этого следует, что каждое устройство должно автономно, без какой-либо информации по интерфейсам связи узнавать, в какой момент ему разрешено отдавать/принимать энергию и в каком количестве. Кроме того, для повышения «живучести» системы рационально разработать такие алгоритмы управления устройствами, которые обеспечат максимальную автономность каждого устройства, чтобы даже при полном отказе интерфейса связи или сильных помехах на линии система оставалась работоспособна. Именно эти принципы были положены в основу разрабатываемых в научной группе Козаченко В.Ф. каф. АЭП МЭИ алгоритмов взаимосвязи всех устройств электротрансмиссии, где автор данной работы принимал участие с позиции взаимодействия с тяговыми двигателями.

Разработанный принцип взаимодействия всех устройств лежит в контроле каждым устройством напряжения звена постоянного тока. Каждое устройство пытается реализовать свое задание, но в определенном коридоре напряжений звена постоянного тока. Если напряжение приближается к границе, то устройство начинает автоматически сбрасывать свое задание, несмотря на то, какое оно приходит от контроллера верхнего уровня. Выбраны следующие координаты управления каждым устройством, которое оно получает от контроллера верхнего уровня:

- Преобразователь двигателя: задание момента.

- Преобразователь генератора: задание напряжения в звене постоянного тока.
- Преобразователь молекулярного накопителя: задание напряжения в звене постоянного тока.
- Преобразователь тормозных резисторов: нет задания от контроллера верхнего уровня. Работает полностью автономно.
- Источники питания: нет задания от контроллера верхнего уровня. Работают полностью автономно.

Далее для визуализации принципа согласования работы устройств по напряжению звена постоянного тока обратимся к Рис. 2.8, где показаны зоны работы в зависимости от напряжения постоянного тока для каждого из устройств. На рисунке приведены шесть диаграмм, для каждого из типов устройств, где по оси ординат отложено напряжение в звене, а по оси абсцисс – регулируемая алгоритмом величина, уменьшение которой приводит к уменьшению отдаваемой/принимаемой устройством мощности. Для двигателя и генератора это момент, для тормозных резисторов это скважность (прикладываемое к резисторам напряжение), для источников питания и молекулярного накопителя это непосредственно мощность.

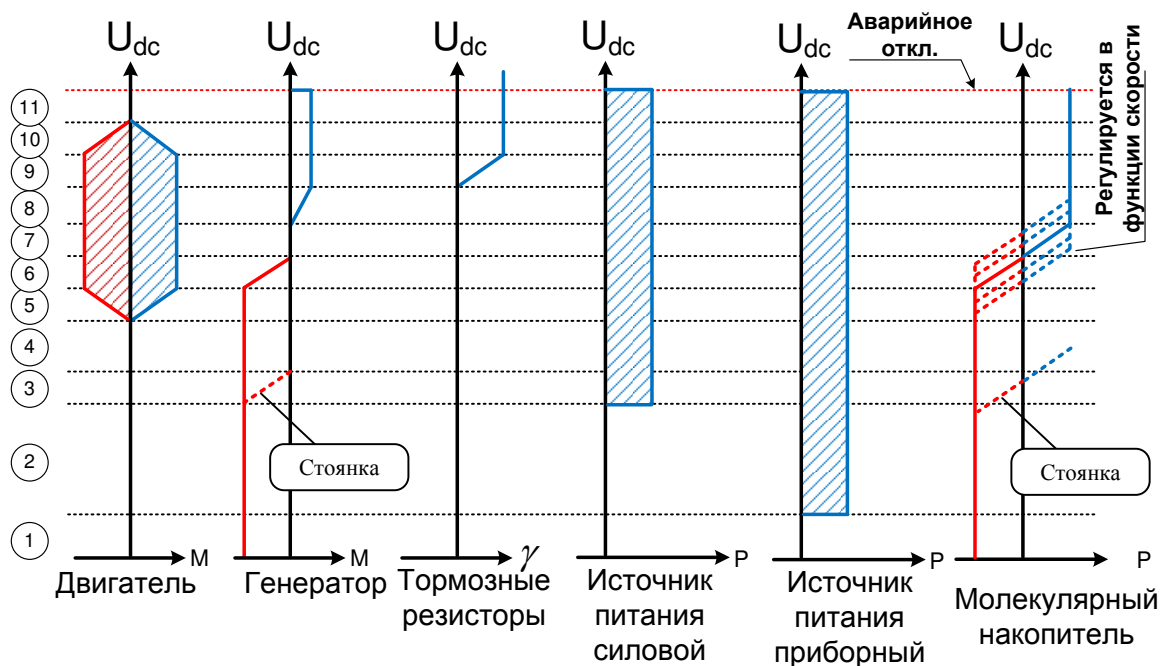


Рис. 2.8. Работа устройств электротрансмиссии в зависимости от напряжения звена постоянного тока: принцип максимальной автономности

Так, в обычном режиме движения напряжение в звене постоянного тока находится в зоне, отмеченной на рисунке номером 6. Предполагается, что генератор в трансмиссии регулируемый (не с постоянными магнитами). В этой зоне генератор от верхнего края зоны 6 до нижнего края зоны 6 линейно увеличивает свой момент (мощность). Эта функция реализована непосредственно в контроллере преобразователя генератора и реализуется автономно. Контролер верхнего уровня может лишь управлять уставкой заданного напряжения. Точно также в этой зоне пытается поддерживать напряжение преобразователь молекулярного накопителя (аккумулятора). Тяговые двигатели в зоне 6 могут реализовывать любой заданный контроллером верхнего уровня момент, как положительный, так и отрицательный. При понижении напряжения, в зоне 5, тяговые двигатели линейно снижают свой момент (а значит и мощность), независимо от того, какой момент задан контроллером верхнего уровня. Генератор и накопитель энергии в зоне 5 уже отдают свою максимальную мощность. Такой алгоритм не позволит тяговым двигателям опустить напряжение в звене постоянного тока слишком сильно, что привело бы к невозможности генератору развить полную мощность (из-за токоограничения) и привело бы к отключению источников питания, работающих от напряжения звена постоянного тока. Можно предположить, что достаточно было бы ограничивать только двигательный момент, отложенный по оси вправо, разрешив двигателям развивать генераторный момент при любом напряжении питания ниже зоны 6. Однако при низкой частоте вращения рекуперированная энергия может оказаться меньше, чем энергия потерь в двигателе, что также приведет к просадке напряжения в звене постоянного тока. Поэтому желательно запретить двигателям развивать какой бы то ни было момент при низком напряжении питания. Однако у такого подхода есть и недостаток – невозможность электрического торможения при отказе генератора и просадке напряжения ниже зоны 5.

При рекуперативном торможении напряжение в звене постоянного тока начнет повышаться, так как двигатели начинают отдавать энергию торможения. Начиная с нижнего края зоны 7 преобразователь молекулярного накопителя начинает принимать энергию торможения. На верхней границе напряжения зоны 7 он выходит на полную мощность приема энергии. Если двигатели генерируют большую мощность, чем может принять накопитель, напряжение продолжит расти. В зоне 8 преобразователь генератора, если он оснащен блоком инвертора, начнет увеличивать свой двигательный момент, вращая ДВС и рассеивая энергию торможения. Если этой мощности (накопитель + генератор в двигательном режиме) будет недостаточно, то напряжение будет повышаться дальше, где в зоне 9 к рассеянию энергии подключатся тормозные резисторы. В случае же продолжения роста напряжения еще выше, в зоне 10 тяговые двигатели будут снижать свой момент, пока генерируемая и принимаемая мощности не сравняются. Источники питания при этом работают автономно и отдают ту мощность, какую расходуют их потребители. Включаются источники питания начиная с такого уровня напряжения, при котором они могут выдавать требуемое потребителям напряжение на выходе.

Для правильного сочетания приоритетов отдачи энергии от генератора и молекулярного накопителя энергии/аккумулятора контроллер верхнего уровня может незначительно двигать задание напряжения молекулярного накопителя выше/ниже уставки задания генератора. Так, если задание напряжения на преобразователе накопителя выше, то при работающих потребителях преимущественно будет отдаваться энергия накопителя, если же опустить уставку ниже, то нагрузку возьмет на себя генератор, а накопитель или будет отдавать меньшее количество энергии, или будет заряжаться даже в движении. Стратегия управления этой уставкой задания напряжения преобразователя накопителя может быть различной в зависимости от выбранного типа движения транспортного средства и выходит за рамки данной работы.

Таким образом, следуя приведенным алгоритмам, все устройства электротрансмиссии будут автоматически регулировать уровень своей мощности в зависимости от напряжения в звене постоянного тока. Контроллер верхнего уровня может задавать любые моменты на каждый тяговый двигатель, не заботясь о режимах работы генератора, накопителя, тормозных резисторов и уровне напряжения. Система автоматически перераспределяет все потоки энергии, не требуя высокоскоростного интерфейса связи. Даже при отказе/сбое интерфейса связи, например, у преобразователя генератора, накопителя, тормозных резисторов – они могут выполнять свои функции автономно, не ухудшая показателей работы.

Приведенные алгоритмы касательно тяговых двигателей реализованы в разработанной системе управления – функция снижения момента в зависимости от напряжения звена постоянного тока показана в структуре Рис. 2.7.

2.8 Уменьшение потерь в инверторе специальными методами ШИМ

При проектировании тягового привода высокие требования предъявляются не только для двигателя, но и для силового преобразователя этого двигателя. Для обеспечения желаемой тяговой характеристики требуется спроектировать преобразователь одновременно и на большой ток для обеспечения большого момента «внизу», и на большое напряжение и частоту для обеспечения требуемой мощности «наверху» тяговой характеристики. Регулирование тока возбуждения ВИД НВ в некоторой мере упрощает задачу с повышением требуемого напряжения с разгоном привода, но требование большой частоты выходного напряжения остается. Как было приведено в разделе 2.2, максимальная частота тока для опытного двигателя составляет около 500Гц. Для качественного формирования синуса напряжения инвертором требуется достаточная для этого частота ШИМ,

превышающая более чем на порядок частоту формируемого напряжения. Так, для формирования напряжения частотой 500Гц приемлемой является частота ШИМ около 7-10кГц. Однако даже самые современные IGBT ключи необходимого класса на такой частоте коммутации при амплитудном токе 540А (требуется на низкой частоте вращения и большом моменте) имеют огромные коммутационные потери. Потери в инверторе были бы значительно меньше при применении более низкой частоты ШИМ на таких токах. Так как, согласно тяговой характеристике, на высокой частоте вращения не требуется большой ток, а на низкой частоте вращения не требуется высокая частота ШИМ, рационально изменять частоту ШИМ в зависимости от тока или частоты вращения привода. Тогда на низкой частоте вращения при работе с большим током и моментом можно снижать частоту ШИМ до 2.5-3кГц (нижний предел частоты определяется пульсациями тока на периоде ШИМ из-за невысокой индуктивности статорной обмотки), а на большой частоте вращения повышать частоту ШИМ до требуемых 10кГц. Изменение частоты ШИМ «на лету» возможно, но реализуется не всяким микроконтроллером, поэтому следует внимательно отнестись к выбору микроконтроллера для применения такого метода для реального оборудования. Допустимы два алгоритма изменения частоты ШИМ – в зависимости от частоты вращения и в зависимости от уровня тока. В первом случае – чем выше частота вращения, тем выше частота ШИМ, во втором – чем выше ток, тем ниже частота ШИМ. Алгоритм изменения частоты ШИМ от уровня тока выглядит более рациональным: при работе на низкой частоте вращения с небольшим моментом (соответственно, с небольшим током) лучше использовать высокую частоту ШИМ для уменьшения как пульсаций тока (выше КПД), так и шумовых эффектов (чем ниже частота ШИМ, тем громче создаваемый ей шум). Тогда при медленном движении транспортного средства с таким тяговым приводом по ровной местности не будет замечен шум, вызываемый коммутацией ключей, а на низкую частоту ШИМ система

будет переходить только при интенсивном разгоне или подъеме в крутую гору.

Вторым методом снижения потерь в инверторе напряжения является метод уменьшения динамических потерь, основанный на возможности реализовать в векторной ШИМ одно и то же выходное напряжение двумя разными способами (за счет использования разных нулевых векторов). Этот метод достаточно очевиден, однако не встречался автору ни в отечественной, ни в иностранной литературе. Далее он будет рассмотрен более подробно.

2.8.1 Уменьшение потерь в АИН за счет использования различных реализаций нулевых векторов напряжения

Для шестиключевых инверторов напряжения (Рис. 2.7), широко используемых в преобразовательной технике, разработано множество различных алгоритмов ШИМ для формирования синусоидального трехфазного напряжения.

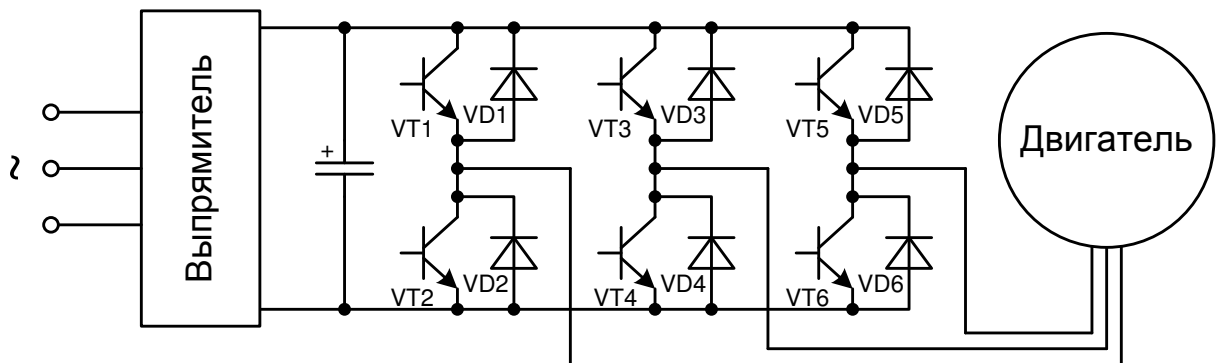


Рис. 2.9. Шестиключевой инвертор напряжения, трехфазный двигатель

На заре преобразовательной техники использовался метод «синусоидальной ШИМ», где производилось шесть коммутаций стоек на периоде, а выходное напряжение инвертора было меньше, чем на входе его выпрямителя. Затем для повышения напряжения использовался метод подмешивания третьей гармоники в задания скважностей, что увеличивало итоговое выходное напряжение, но не уменьшало количество коммутаций. Затем был разработан метод векторной ШИМ (Space Vector PWM), который в русскоязычной литературе подробно описан в [22], а также реализован в

некоторых сигнальных микроконтроллерах, например Texas Instruments, на аппаратном уровне. Данный тип ШИМ позволяет достичь максимально-возможного выходного напряжения на инверторе, а также имеет всего четыре коммутации стоек на периоде, что уменьшает потери в инверторе по сравнению с синусоидальным методом ШИМ.

На Рис. 2.10 изображен классический рисунок, показывающий базовые вектора шестиключевого инвертора и соответствующие им коды состояния (каждая цифра кодирует состояние стойки инвертора, 0 – проводит нижний ключ, 1 – верхний). Так, для реализации некоторого заданного напряжения $U_{зад}$, лежащего в нулевом секторе, согласно векторной ШИМ можно использовать как базовые вектора с кодами 100, 110, 111, так и 000, 100, 110. Отличие заключается в использовании различных нулевых векторов: 000 – все нижние ключи замкнуты, т.н. «привязка к нижней шине», или 111 – все верхние ключи замкнуты, т.н. «привязка к верхней шине».

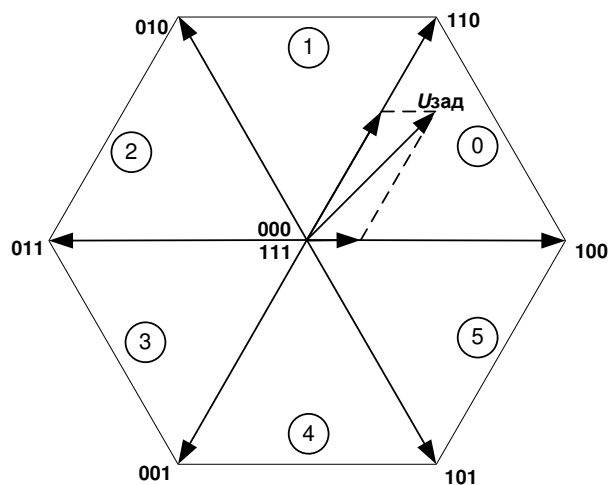


Рис. 2.10. Базовые вектора шестиключевого инвертора и соответствующие им коды состояния

Обычно для работы выбирается какой-то один нулевой вектор, смена между векторами 000 и 111 не производится. С точки зрения получения правильного выходного напряжения нет никакой разницы, какой из нулевых векторов задействован для ШИМ. Только при специализированном «бутстрепном» питании драйверов верхних силовых ключей инвертора обязателен для использования нулевой вектор с кодом 000. В некоторых

случаях с целью уменьшения влияния искажений напряжения, вызванных эффектом мертвого времени инвертора, производится смена используемого нулевого вектора непосредственно при работе. Такая смена производится посередине сектора, за счет чего визуально образуется двенадцать секторов, отсюда получено и название – двенадцатисекторная ШИМ [22]. Два соседних сектора, ранее бывших одним, в 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.

Рассмотрим коммутации ключей инвертора при реализации вектора напряжения $U_{\text{зад}}$, изображенного на Рис. 2.10. Для двух разных нулевых векторов можно представить две разных последовательности коммутации, показанных на Рис. 2.11, при этом результирующее напряжение $U_{\text{зад}}$ будет верно реализовано в обоих вариантах.

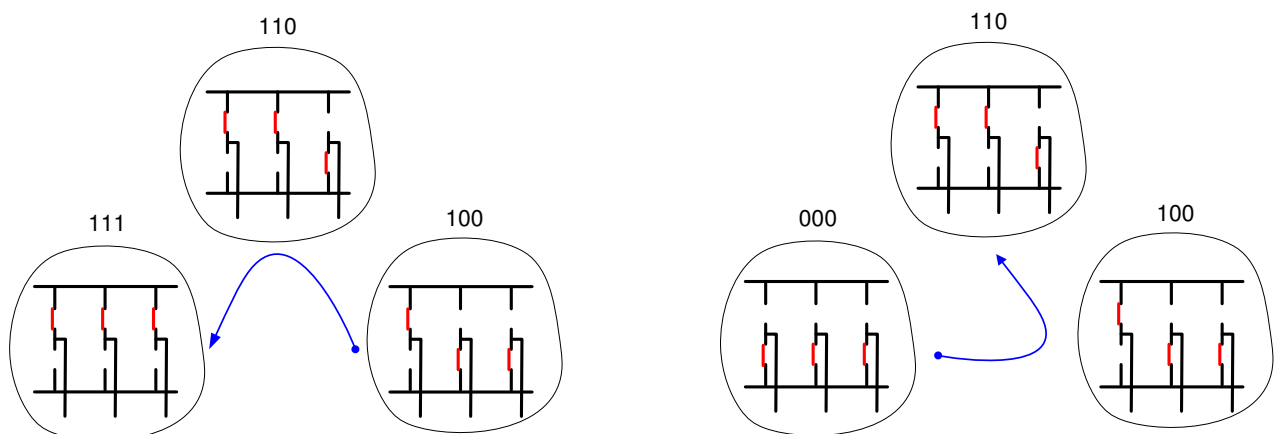


Рис. 2.11. Две различные схемы перебора базовых векторов инвертора при использовании различных нулевых векторов (111 и 000)

Из рисунка видно, что в случае использования нулевого вектора с кодом 111 некоммутируемой на всем периоде ШИМ является стойка фазы А (левая), а при векторе 000 некоммутируемой оказывается стойка С (правая). Идея снижения динамических потерь заключается в том, чтобы на каждом новом периоде ШИМ выбирать такой нулевой вектор, чтобы из двух стоек, которые могут быть некоммутируемыми, в итоге не коммутировалась та, у

которой мгновенное значение тока больше. Тогда ток, который придется в итоге коммутировать, окажется меньше. Следовательно, уменьшатся и потери в ключах. Таким образом, алгоритм можно свести к следующему:

- 1) Для текущего заданного напряжения $U_{\text{зад}}$ выяснить, какие две стойки могут быть некоммутируемыми. Это зависит только от того, в каком секторе находится $U_{\text{зад}}$.
- 2) Для каждой из стоек получить мгновенные токи, протекающие через них в данный момент. Это легко осуществляется датчиками токов фаз.
- 3) Реализовать на следующем периоде ШИМ ту последовательность перебора базовых векторов, при которой не будет коммутироваться стойка, ток в которой оказался больше.

Приведенный алгоритм при реализации на микроконтроллере должен обсчитываться каждый период ШИМ. Таким образом, всегда будет выбрана наиболее выгодная для текущих токов фаз последовательность коммутации ключей.

Вывод. В главе обоснованы и синтезированы все алгоритмы управления ВИД НВ, достаточные для применения его в электротяге. Выбранная за основу векторная система управления доработана специальной управляющей структурой, обеспечивающей согласованное управление токами I_d , I_q , I_f двигателя. Разработаны алгоритмы обеспечения согласованной работы тяговых двигателей и других устройств электротрансмиссии. Дополнительно рассмотрены способы оптимизации ШИМ для тягового применения, уменьшающие потери в инверторе.

Глава 3. Моделирование ВИД НВ и его системы управления

3.1 Моделирование векторной системы управления и структуры предварительной обработки задания момента

Модель двигателя построена на основе структуры и математической базы, приведенной в [8]. Уравнения (3.1) полностью описывают электродвигатель согласно линеаризованной модели.

$$\begin{cases} i_d = \int \left(\frac{u_d - R_s i_d + \omega \Psi_q}{L_s} \right) dt \\ i_q = \int \left(\frac{u_q - R_s i_q - \omega \Psi_d}{L_s} \right) dt \\ i_f = \int \left(\frac{u_f - R_f i_f}{L_f} \right) dt \end{cases}, \text{ где потоки машины} \quad \begin{aligned} \Psi_d &= L_s i_d + L_m i_f \\ \Psi_q &= L_s i_q \\ \Psi_f &= L_f i_f + L_m i_d \\ M &= \Psi_d i_q - \Psi_q i_d \end{aligned} \quad (3.1)$$

Для упрощения в данных уравнениях исключена взаимная связь между контуром возбуждения и осью d, так как динамика изменения этих токов невелика. На Рис. 3.1 показана структурная схема ВИД НВ в осях d,q.

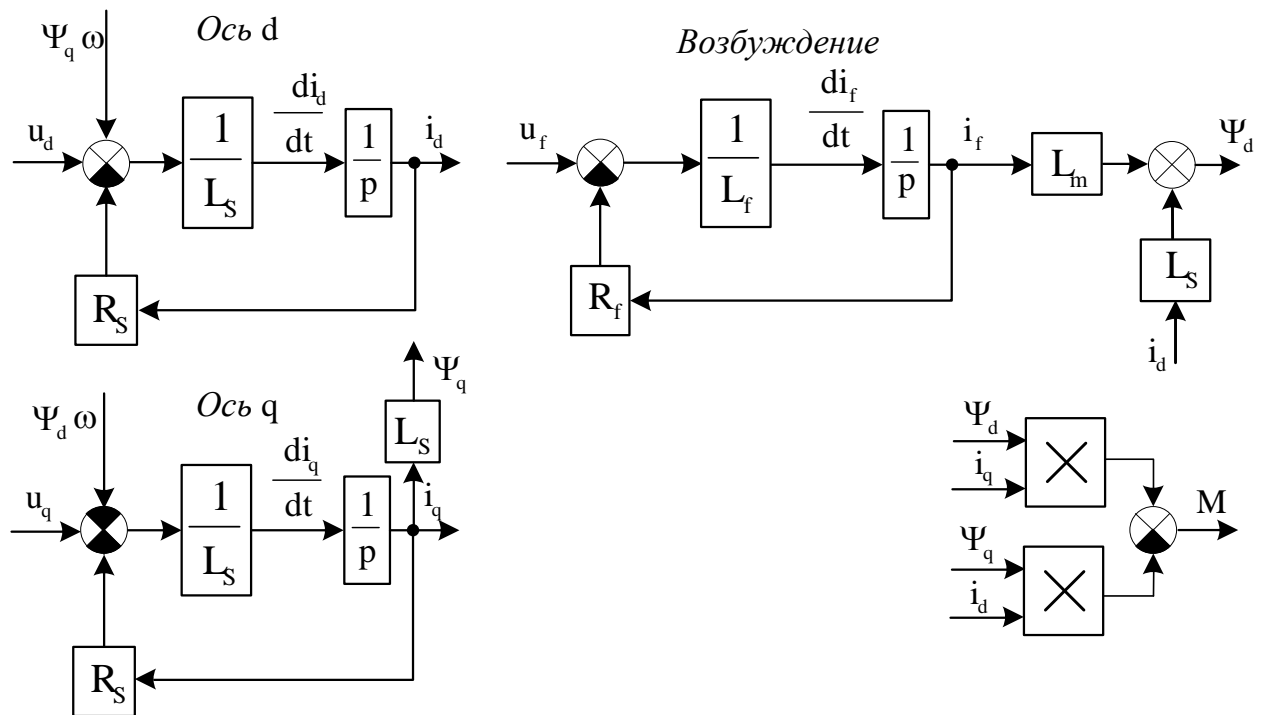


Рис. 3.1. Структурная схема ВИД НВ в осях d,q

Такая модель также не учитывает насыщение магнитопровода двигателя, потери в стали, механические потери и служит лишь для качественной проверки системы управления двигателем, без сопоставления абсолютных величин с реальным объектом (токов, напряжений, момента и т.п.).

Моделирование производилось в пакете MATLAB/Simulink. Структура системы векторного управления была создана согласно Рис. 2.5 и Рис. 2.7, а модель двигателя согласно Рис. 3.1. Также модель была дополнена простейшей моделью механической части, содержащий имитацию момента инерции и реактивной нагрузки на валу. Кроме того, в модель добавлен блок имитации источника питания и звена постоянного тока, который позволяет проверить работу ограничения напряжения в звене постоянного тока системой управления при рекуперативном режиме работы.

Целью моделирования является проверка работоспособности и устойчивости системы управления в различных режимах:

1. При работе без достижения ограничений по току, напряжению, частоте вращения.
2. При работе в условиях нехватки питающего напряжения.
3. При работе в условиях ограничения максимальной частоты вращения.
4. При рекуперации в условиях работы блока ограничения напряжения в звене постоянного тока.

На Рис. 3.2 показаны осциллограммы, полученные при моделировании в пакете MATLAB/Simulink разгона двигателя с нулевой частоты вращения до 300 об/мин с максимальным моментом.

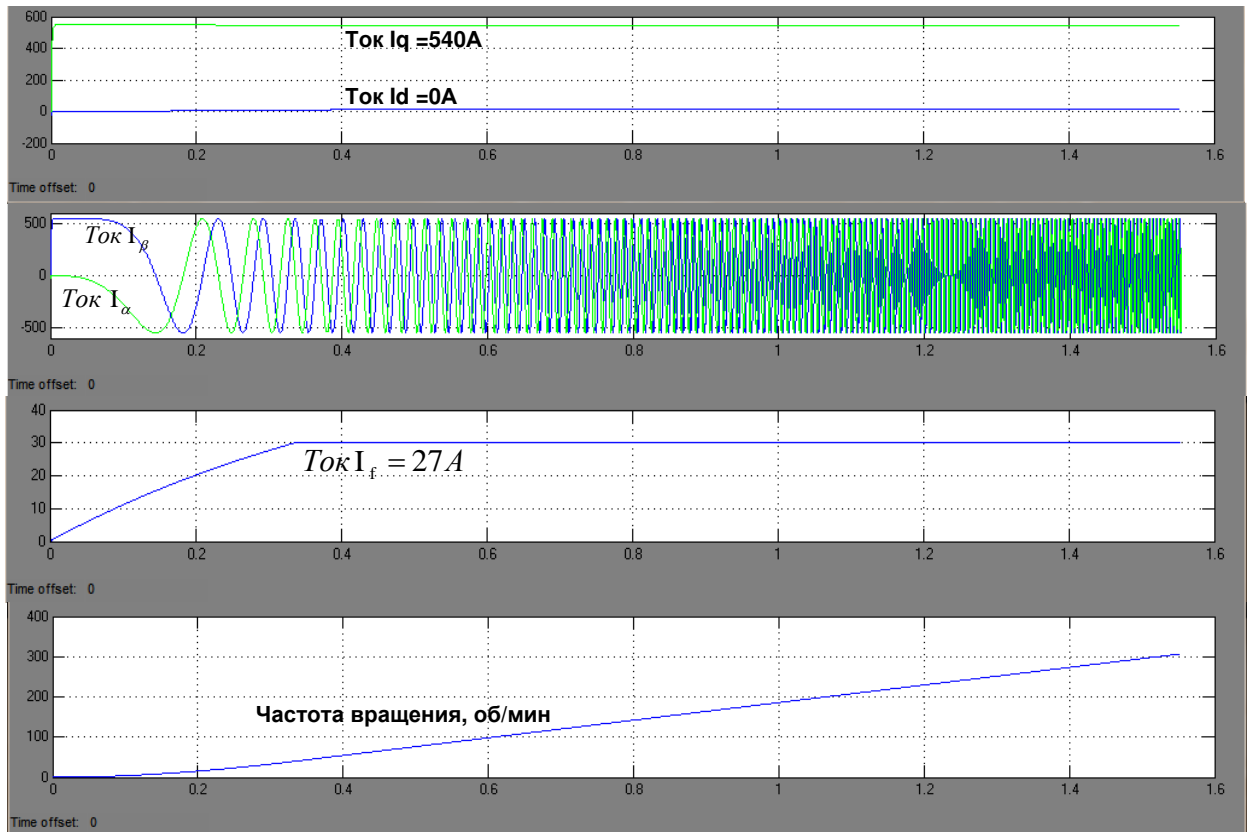


Рис. 3.2. Осциллограммы работы модели при разгоне двигателя с максимальным моментом с нулевой частоты вращения до 300 об/мин без вступления в работу блоков ограничений.

По результатам моделирования векторная система управления работает в предполагаемом режиме. Ток по оси q постоянен и равен максимальному амплитудному току, разрешенному для данного двигателя – 540А. Ток по оси d равен нулю, так как на невысокой частоте вращения нехватки напряжения на инверторе не наступает. Токи по осям α , β синусоидальны. За счет большой индуктивности обмотки возбуждения ток I_f нарастает до своего максимума (27А) сравнительно долго, из-за чего разгон первоначально нелинейный, так как момент нарастает вместе с током возбуждения.

На Рис. 3.3 показаны осциллограммы, полученные при моделировании в пакете MATLAB/Simulink разгона двигателя с 1500 об/мин до 2500 об/мин в условиях нехватки питающего напряжения. На верхнем графике показаны токи по осям d и q, на среднем напряжении в относительных единицах (1.0 – максимальное напряжение инвертора) по осям d и q с выходов регуляторов тока, а также амплитуда суммарного вектора напряжения, на нижнем частота вращения двигателя.

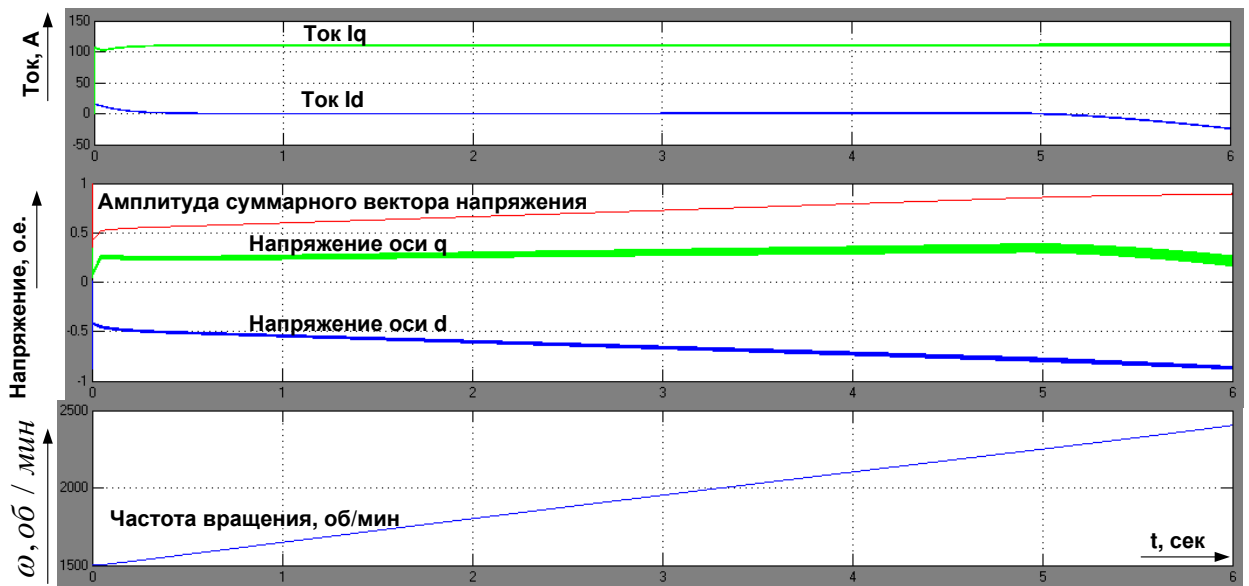


Рис. 3.3. Осциллограммы работы модели при разгоне двигателя с 1500 об/мин до 2500 об/мин в условиях нехватки питающего напряжения

С разгоном двигателя растет его ЭДС, и, соответственно, амплитуда прикладываемого напряжения от инвертора. Начиная приблизительно с 5й секунды осциллограммы, амплитуда суммарного вектора напряжения достигает 0.85 (85% от максимального), после чего, согласно структуре на Рис. 2.7, начинает появляться ток оси d, что замедляет рост напряжения на выходе инвертора (напряжение по оси q начинает уменьшаться). Ток по оси q, создающий момент, сохраняется, двигатель продолжает разгон.

На Рис. 3.4 показаны осциллограммы, полученные при моделировании разгона двигателя с 1500 об/мин до 2000 об/мин в условиях ограничения частоты вращения.

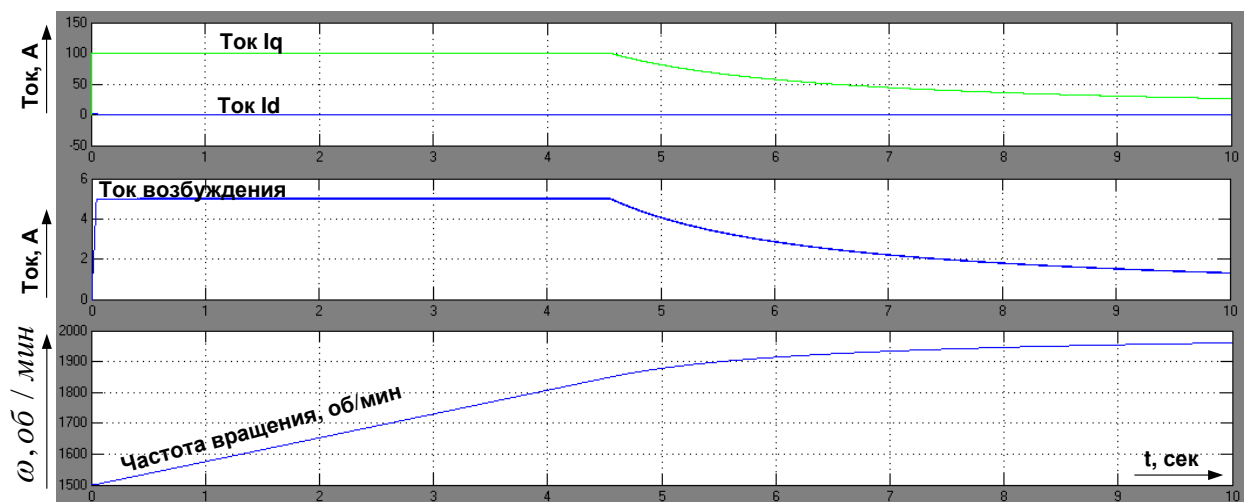


Рис. 3.4. Осциллограммы работы модели при разгоне двигателя с 1500 об/мин до 2000 об/мин в условиях ограничения частоты вращения

В данном эксперименте моделирования ограничение максимальной частоты вращения установлено 2000 об/мин с дельтой в 150 об/мин. Двигатель линейно разгонялся с постоянным моментом, но, начиная примерно с 4,5й секунды осциллограммы, частота вращения достигла 1850 об/мин, где начало работать ограничение частоты вращения. По мере повышения частоты вращения задание тока I_q уменьшалось, а так как задание тока возбуждения изменяется пропорционально с током статора, ток возбуждения также уменьшался.

На Рис. 3.5 показаны осциллограммы, полученные при моделировании случая смены двигательного режима на генераторный с последующей рекуперацией в звено постоянного тока.

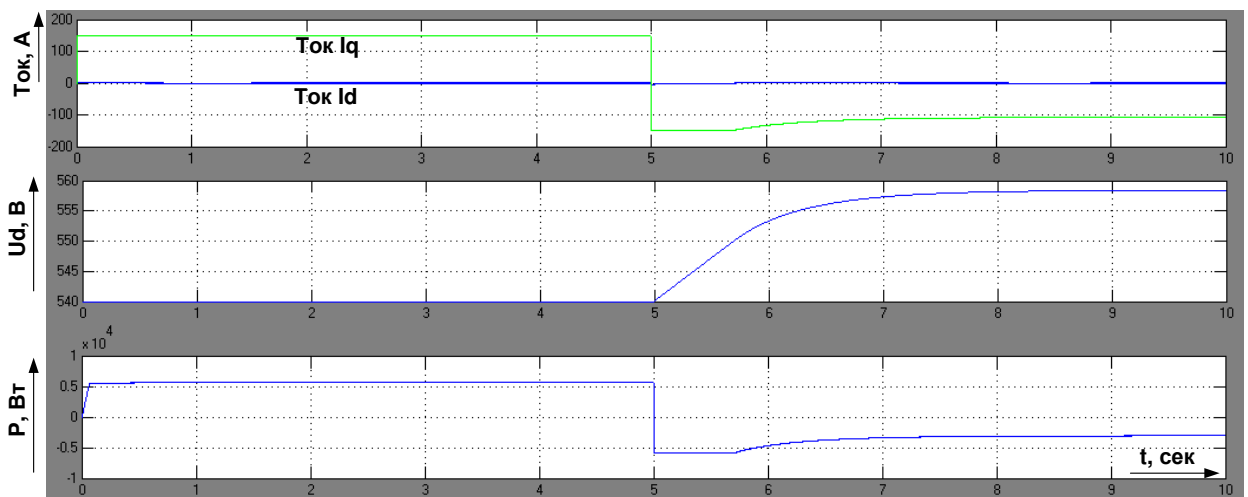


Рис. 3.5. Осциллограммы работы модели при смене двигательного режима на генераторный (рекуперация)

Привод работал на фиксированной частоте вращения в двигательном режиме с мощностью 5кВт и напряжением питания в звене постоянного тока 540В. В момент времени 5с задание момента в системе управления инвертировалось, в результате чего двигатель перешел в генераторный режим, мощность стала отрицательной (-5кВт), напряжение в звене постоянного тока (второй график) начало расти. В момент времени 5.7с напряжение составило 560В, в результате чего начало работать ограничение напряжения. С последующим ростом напряжения задание тока по оси I_q уменьшалось в соответствии с работой ограничителя напряжения структуры Рис. 2.7, уменьшалась мощность, отдаваемая приводом. В модели заложен сторонний потребитель

на звене постоянного тока мощностью 3кВт, имитирующий, например, тормозные резисторы. Напряжение в звене постоянного тока ограничилось на уровне 560В, а мощность привода и стороннего потребителя сравнялись и стали равными 3кВт.

Вывод. Результаты моделирования подтвердили работоспособность как векторной системы управления, так и предварительной структуры, формирующей задания токов с программной имитацией машины последовательного возбуждения. Проверена работа системы в условиях нехватки напряжения инвертора, ограничения частоты вращения, ограничения максимального напряжения в звене постоянного тока при рекуперации.

3.2 Доработка модели ВИД НВ по результатам экспериментальных исследований

В последней главе диссертации описаны экспериментальные исследования привода. Забегая вперед, необходимо сказать, что по результатам этих исследований было выявлено новое важное свойство вентильно-индукторного привода с независимым возбуждением: медленное изменение поля возбуждения привода, несмотря на быстрое изменение тока возбуждения. Наиболее вероятно причина этому – вихревой ток контура возбуждения, препятствующий изменению потока возбуждения. Более подробно это показано в разделе 5.2.4. В связи с этим желательно доработать математическую модель двигателя ВИД НВ, позаимствованную из [8], для учета данного эффекта. Данная доработка модели будет произведена в этой главе, чтобы не нарушать логическую структуру диссертации.

Линейная математическая модель ВИД НВ выводится из схемы замещения магнитной цепи (Рис. 3.6) и анализа изменения магнитных проводимостей при повороте вала двигателя. Более подробное описание метода синтеза модели см. в [8]. На этой схеме F_a , F_b , F_c – МДС фазных обмоток, F_f , F_v – МДС катушки возбуждения и МДС контура вихревого тока соответственно. При синтезе данной схемы было принято, что часть потока

обмотки возбуждения протекает по ярму статора, не связанного с вихревым током (проводимость λ_{f1}), а часть потока связана с вихревым током (λ_{f2}), т.е. существует некий поток рассеяния применительно к контуру возбуждения и контуру вихревого тока.

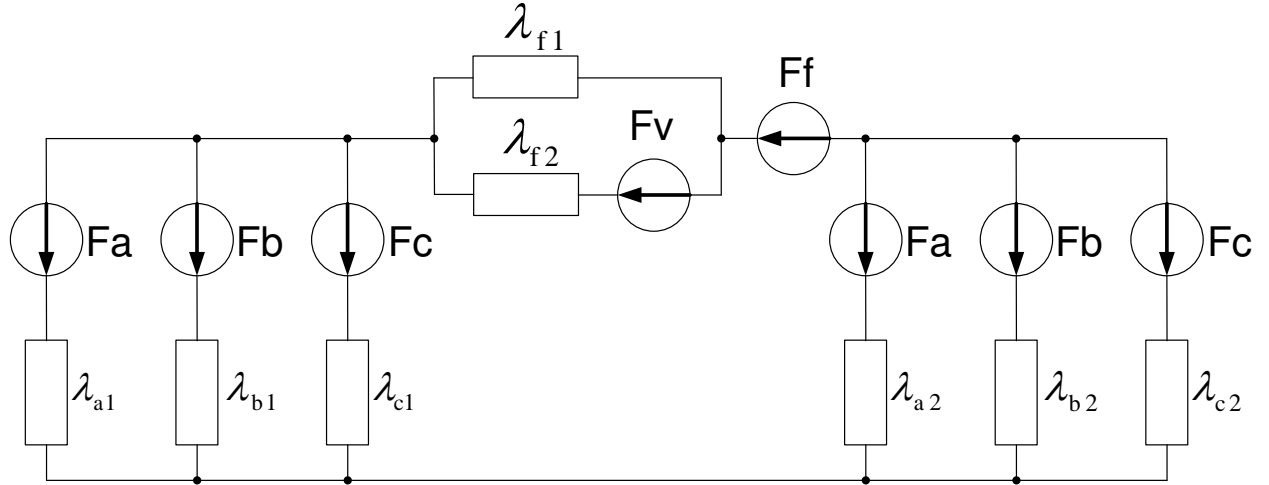


Рис. 3.6. Схема замещения магнитной цепи двухполюсного ВИД

Собственные проводимости воздушных зазоров фазных зон в зависимости от электрического положения вала ротора θ определяются соотношениями:

$$\left\{ \begin{array}{ll} \lambda_{a1} = \lambda_0 + \lambda_1 \cos \theta; & \lambda_{a2} = \lambda_0 + \lambda_1 \cos(\theta - \pi) = \lambda_0 - \lambda_1 \cos \theta; \\ \lambda_{b1} = \lambda_0 + \lambda_1 \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right); & \lambda_{b2} = \lambda_0 + \lambda_1 \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3} - \pi\right) = \lambda_0 - \lambda_1 \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right); \\ \lambda_{c1} = \lambda_0 + \lambda_1 \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right); & \lambda_{c2} = \lambda_0 + \lambda_1 \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3} - \pi\right) = \lambda_0 - \lambda_1 \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right). \end{array} \right. \quad (3.2)$$

Эти соотношения (синусоидальная зависимость) закладывается при проектировании машины. С достаточной для практических расчетов точностью магнитное сопротивление ярма статора может быть принято равным нулю ($\lambda_{f1} + \lambda_{f2} = \infty$) при расчете индуктивностей фаз.

Определяются коэффициенты самоиндукции и взаимоиндукции (индуктивности L_{av} , L_{bv} , L_{cv} определены упрощенно):

$$\begin{aligned}
L_{ff} &= w_f^2 \cdot \frac{\frac{3}{2} \lambda_0 \cdot (\lambda_{f1} + \lambda_{f2})}{\frac{3}{2} \lambda_0 + (\lambda_{f1} + \lambda_{f2})} = L_f = \text{Const}; \\
L_{vv} &= w_v^2 \cdot \frac{\left(\frac{3}{2} \lambda_0 + \lambda_{f1}\right) \cdot \lambda_{f2}}{\left(\frac{3}{2} \lambda_0 + \lambda_{f1}\right) + \lambda_{f2}} = L_v = \text{Const}; \\
L_{fv} &= w_f \cdot w_v \cdot \frac{\frac{3}{2} \lambda_0 \cdot (\lambda_{f1} + \lambda_{f2})}{\frac{3}{2} \lambda_0 + (\lambda_{f1} + \lambda_{f2})} \cdot \frac{\lambda_{f2}}{\lambda_{f1} + \lambda_{f2}} = L_{fv} = \text{Const}; \\
L_{aa} &= L_{bb} = L_{cc} = w_s^2 \cdot \frac{4}{3} \lambda_0 = L_s = \text{Const}; \\
L_{ab} &= L_{bc} = L_{ac} = -w_s^2 \cdot \frac{2}{3} \lambda_0 = -\frac{1}{2} L_s = \text{Const}; \\
L_{af} &= w_s w_f \cdot \lambda_1 \cos \theta = L_{sf} \cos \theta; \\
L_{bf} &= w_s w_f \cdot \lambda_1 \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) = L_{sf} \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right); \\
L_{cf} &= w_s w_f \cdot \lambda_1 \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) = L_{sf} \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right); \\
L_{av} &= w_s w_v \cdot \lambda_1 \cos \theta = L_{sv} \cos \theta; \\
L_{bv} &= w_s w_v \cdot \lambda_1 \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) = L_{sv} \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right); \\
L_{cv} &= w_s w_v \cdot \lambda_1 \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) = L_{sv} \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right);
\end{aligned} \tag{3.3}$$

Для вычисления индуктивности L_{fv} была применена схема замещения, показанная на Рис. 3.7.

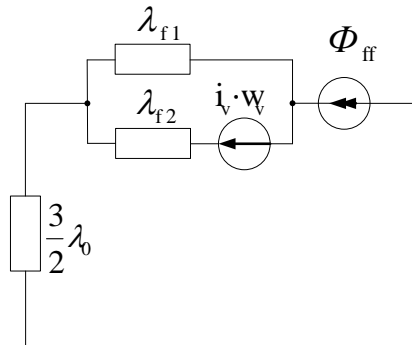


Рис. 3.7. Схема замещения для нахождения L_{fv} и L_{vf}

По формуле разброса:

$$\Phi_{fv} = \Phi_{ff} \cdot \frac{1}{\frac{1}{\lambda_{f2}} + \frac{1}{\lambda_{f1}}} = w_f \cdot i_f \cdot \lambda_{ff} \cdot \frac{\lambda_{f2}}{\lambda_{f1} + \lambda_{f2}}$$

$$L_{fv} = L_{vf} = \frac{\Psi_{fv}}{i_f} = \frac{\Phi_{fv} \cdot w_v}{i_f} = w_f \cdot w_v \cdot \lambda_{ff} \cdot \frac{\lambda_{f2}}{\lambda_{f1} + \lambda_{f2}} = w_f \cdot w_v \cdot \frac{\frac{3}{2} \lambda_0 \cdot (\lambda_{f1} + \lambda_{f2})}{\frac{3}{2} \lambda_0 + (\lambda_{f1} + \lambda_{f2})} \cdot \frac{\lambda_{f2}}{\lambda_{f1} + \lambda_{f2}}$$

Так как контуры протекания вихревых токов, их величина и омическое сопротивление неизвестны и в большинстве случаев могут быть определены только опытным путем, для упрощения уравнений приведем контур протекания вихревых токов к короткозамкнутой катушке, расположенной вместе с основной обмоткой возбуждения и имеющей такое же количество витков. Примем, что

$$w_v = w_f,$$

Тогда уравнения потоков будут определяться как:

$$\Psi_a = L_s i_a + L_{sf} \cos \Theta \cdot i_f + L_{sv} \cos \Theta \cdot i_v = L_s i_a + L_{sf} \cos \Theta \cdot (i_f + i_v)$$

$$\Psi_b = L_s i_b + L_{sf} \cos \left(\Theta - \frac{2\pi}{3} \right) \cdot (i_f + i_v)$$

$$\Psi_c = L_s i_c + L_{sf} \cos \left(\Theta - \frac{4\pi}{3} \right) \cdot (i_f + i_v) \quad (3.4)$$

$$\Psi_f = L_f i_f + L_{fv} i_v + L_{sf} \cos \Theta \cdot i_a + L_{sf} \cos \left(\Theta - \frac{2\pi}{3} \right) \cdot i_b + L_{sf} \cos \left(\Theta - \frac{4\pi}{3} \right) \cdot i_c$$

$$\Psi_v = L_v i_v + L_{fv} i_f + L_{sv} \cos \Theta \cdot i_a + L_{sv} \cos \left(\Theta - \frac{2\pi}{3} \right) \cdot i_b + L_{sv} \cos \left(\Theta - \frac{4\pi}{3} \right) \cdot i_c$$

Уравнения электрического равновесия:

$$\begin{cases} u_a = R_s i_a + \frac{d\Psi_a}{dt} \\ u_b = R_s i_b + \frac{d\Psi_b}{dt} \\ u_c = R_s i_c + \frac{d\Psi_c}{dt} \\ u_f = R_f i_f + \frac{d\Psi_f}{dt} \\ 0 = R_v i_v + \frac{d\Psi_v}{dt} \end{cases} \quad (3.5)$$

Синтез системы управления удобнее всего производить для двухфазной машины, поэтому необходимо воспользоваться фазными преобразованиями, полученными из условия эквивалентности мощностей:

$$\begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} = k_c \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix}, \text{ где } k_c = \sqrt{\frac{2}{3}}. \quad (3.6)$$

Перепишем уравнения в ортогональных осях α , β , связанных с неподвижным статором:

$$\begin{cases} u_\alpha = R_s i_\alpha + \frac{d\Psi_\alpha}{dt} \\ u_\beta = R_s i_\beta + \frac{d\Psi_\beta}{dt} \\ u_f = R_f i_f + \frac{d\Psi_f}{dt} \\ 0 = R_v i_v + \frac{d\Psi_v}{dt} \end{cases} \quad \text{для потоков} \quad \begin{cases} \Psi_\alpha = L_s i_\alpha + L_m \cos \Theta \cdot (i_f + i_v) \\ \Psi_\beta = L_s i_\beta + L_m \sin \Theta \cdot (i_f + i_v) \\ \Psi_f = L_f i_f + L_{fv} i_v + L_m \cos \Theta \cdot i_\alpha + L_m \sin \Theta \cdot i_\beta \\ \Psi_v = L_v i_v + L_{fv} i_f + L_m \cos \Theta \cdot i_\alpha + L_m \sin \Theta \cdot i_\beta \end{cases}, \quad (3.7)$$

$$\text{где } L_m = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot L_{sf}.$$

Перепишем систему уравнений в осях d-q, жестко связанных с положением ротора двигателя. В этом случае частота изменения электрических величин, связанная с вращением будет равна нулю:

$$\left\{ \begin{array}{l} u_d = R_s i_d + \frac{d\Psi_d}{dt} - \omega \Psi_q \\ u_q = R_s i_q + \frac{d\Psi_q}{dt} + \omega \Psi_d \\ u_f = R_f i_f + \frac{d\Psi_f}{dt} \\ 0 = R_v i_v + \frac{d\Psi_v}{dt} \end{array} \right. , \text{ где потоки машины } \left\{ \begin{array}{l} \Psi_d = L_s i_d + L_m (i_f + i_v^*) \\ \Psi_q = L_s i_q \\ \Psi_f = L_f i_f + L_{fv} i_v + L_m i_d \\ \Psi_v = L_v i_v + L_{vf} i_f + L_m i_d \end{array} \right. . \quad (3.8)$$

Электромагнитный момент при этом будет равен:

$$M = \Psi_d i_q - \Psi_q i_d = (L_s i_d + L_m (i_f + i_v)) \cdot i_q - L_s i_q i_d = L_m (i_f + i_v) \cdot i_q . \quad (3.9)$$

Продифференцируем по времени уравнения потоков и подставим в уравнения равновесий:

$$\left\{ \begin{array}{l} u_d = R_s i_d + L_s \frac{di_d}{dt} + L_m \frac{d(i_f + i_v)}{dt} - \omega \Psi_q \\ u_q = R_s i_q + L_s \frac{di_q}{dt} + \omega \Psi_d \\ u_f = R_f i_f + L_f \frac{di_f}{dt} + L_{vf} \frac{di_v}{dt} + L_m \frac{di_d}{dt} \\ 0 = R_v i_v + L_v \frac{di_v}{dt} + L_{vf} \frac{di_f}{dt} + L_m \frac{di_d}{dt} \end{array} \right. \quad (3.10)$$

Так как составляющая от производной тока возбуждения на взаимную индуктивность мала, то можно считать, что $L_m \frac{d(i_f + i_v)}{dt} \cong 0$. В свою очередь, ток статора по оси «d», согласно разработанным структурам управления, изменяется медленно, поэтому связь $L_m \frac{di_d}{dt} \cong 0$ тоже не будем учитывать.

Уравнения упрощаются, так как исключаются взаимные связи:

$$\left\{ \begin{array}{l} u_d = R_s i_d + L_s \frac{di_d}{dt} - \omega \Psi_q \\ u_q = R_s i_q + L_s \frac{di_q}{dt} + \omega \Psi_d \\ u_f = R_f i_f + L_f \frac{di_f}{dt} + L_{vf} \frac{di_v}{dt} \\ 0 = R_v i_v + L_v \frac{di_v}{dt} + L_{vf} \frac{di_f}{dt} \end{array} \right. \quad (3.11)$$

Перепишем уравнения в интегральной форме для составления структурной схемы:

$$\begin{cases} i_d = \int \left(\frac{u_d - R_s i_d + \omega \Psi_q}{L_s} \right) dt \\ i_q = \int \left(\frac{u_q - R_s i_q - \omega \Psi_d}{L_s} \right) dt \\ i_f = \int \left(\frac{u_f - R_f i_f - L_{vf} \frac{di_v}{dt}}{L_f} \right) dt, \text{ где потоки машины} \\ i_v = \int \left(\frac{0 - R_v i_v - L_{vf} \frac{di_f}{dt}}{L_v} \right) dt \end{cases} \quad \begin{matrix} \Psi_d = L_s i_d + L_m (i_f + i_v) \\ \Psi_q = L_s i_q \end{matrix} \quad (3.12)$$

На Рис. 3.8 показана структурная схема линейной модели ВИД НВ с учетом контура вихревого тока, построенная по уравнениям (3.12).

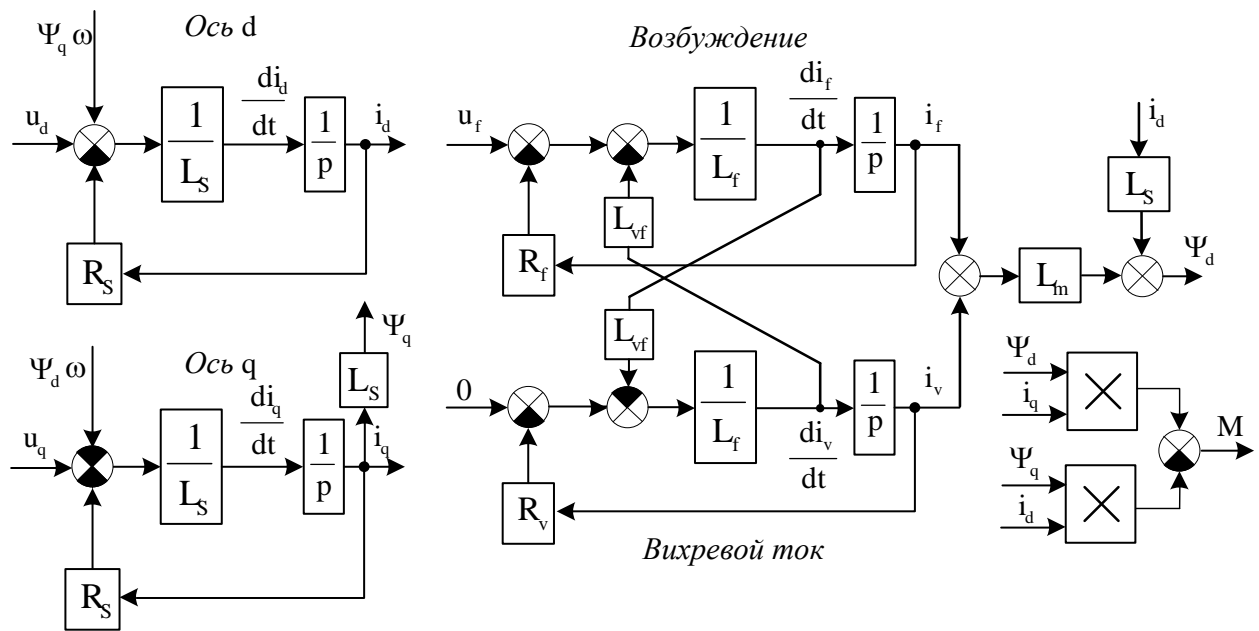


Рис. 3.8. Структурная схема ВИД в осях d,q с учетом вихревого тока ОБ

Модель двигателя в MATLAB/Simulink была модифицирована в соответствии с приведенной схемой. Настройку параметров модели нового контура возбуждения можно провести расчетным путем, вычислив такие параметры двух экспонент, сумма которых даст такую же форму переходного процесса тока ОБ, как экспериментальная Рис. 5.23. Методы расчета приведены в работе [2]. Однако так как модель используется для качественной проверки системы управления и всё равно не полностью соответствует реальному объекту из-за отсутствия учета насыщения стали, то

на данном этапе можно ограничиться ручным подбором коэффициентов контура возбуждения. На Рис. 3.9 показана форма тока в обмотке возбуждения при подаче постоянного напряжения на реальном объекте и на модели. Видно сходство формы тока возбуждения, состоящей из суммы двух экспонент. Кроме того, на модели можно увидеть также осциллограмму вихревого тока, которая на реальном объекте получена быть не может.

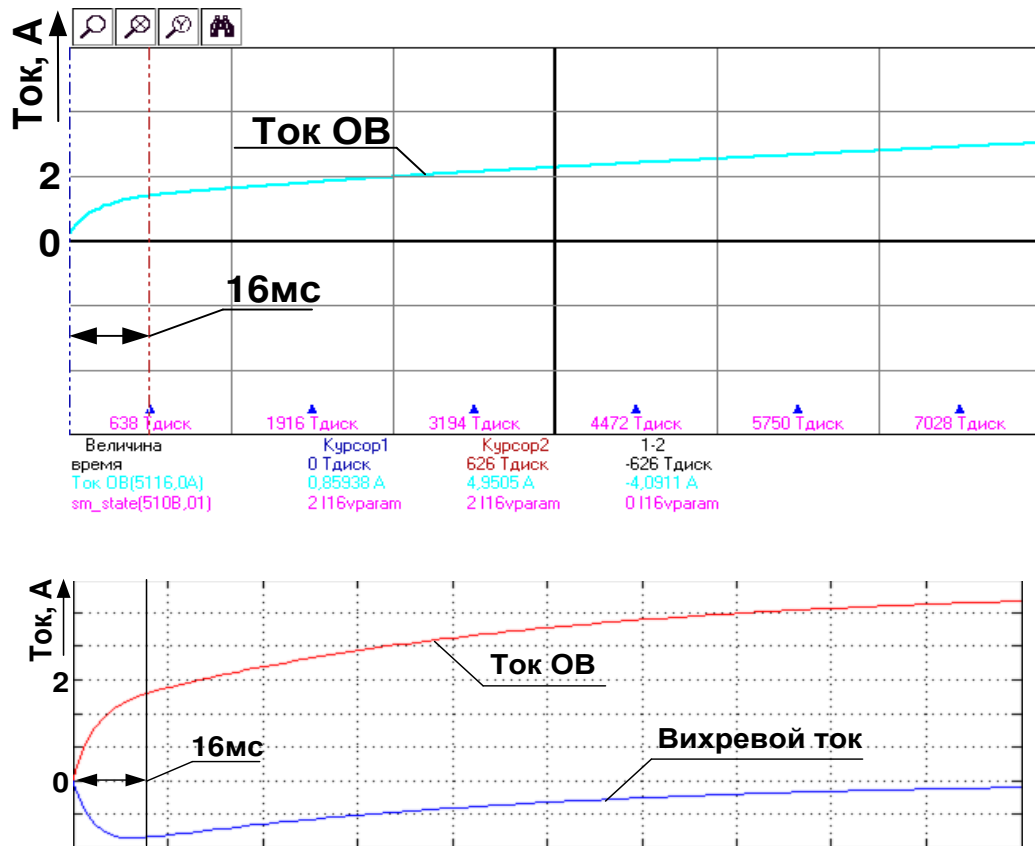


Рис. 3.9. Форма тока возбуждения при подаче постоянного напряжения реального объекта (сверху) и модели (снизу)

Таким образом, дополненная модель ВИД НВ учитывает влияние вихревого тока на протекающие в контуре возбуждения процессы.

На модели были повторно проведены все описанные выше эксперименты по проверке работоспособности, но никаких новых особенностей в работе системы управления не выявлено, за исключением более долгого нарастания момента привода. Такое относительно медленное нарастание момента было в последующем учтено в алгоритмах управления контроллера верхнего уровня (которые разрабатывались коллегами автора данной диссертации), управляющего всеми тяговыми приводами при

реализации антипробуксовочной и антиблокировочной систем помощи водителю.

3.3 Моделирование алгоритма снижения потерь в инверторе

В разделе 2.8.1 приведен алгоритм снижения потерь в инверторе за счет использования различных реализаций нулевых векторов напряжения. Разработанный алгоритм был также промоделирован в MATLAB/Simulink. С помощью IGBT ключей из библиотеки компонентов SimPowerSystems была собрана схема шестиключевого инвертора, изображенного на Рис. 2.9. В качестве нагрузки использовался управляемый трехфазный источник тока, позволяющий задавать трехфазный ток с любой реактивной составляющей. Для управления ключами был написан модуль ШИМ на языке Си, подключенный в качестве функционального блока также в модель Simulink. Данный модуль реализовывал векторную ШИМ с приведенным выше алгоритмом уменьшения потерь инвертора, а также позволял отключать этот алгоритм в целях сравнения. На вход модуля ШИМ поступало задание вектора напряжения, а также мгновенные токи фаз, необходимые для работы алгоритма уменьшения потерь. Управление заданием модуля ШИМ и источником тока нагрузки осуществлял еще один блок, формирующий синусоидальные задания тока и напряжения, типичные для работы двигателя. Также на языке Си был написан блок, оценивающий динамические потери ключей. Для работы этого блока было принято допущение, что энергия потерь при каждой коммутации зависит только от протекающего по ключу тока и пропорциональна ему. Модуль учета потерь фиксировал каждую коммутацию ключа, и для некоторого интервала времени (периода ШИМ) суммировал все коммутированные токи, получая величину, пропорциональную энергии потерь. Путем вычисления отношения этой энергии к интервалу времени получалась величина, пропорциональная мощности потерь за период ШИМ.

На Рис. 3.10 продемонстрированы результаты работы модели при использовании классической шестисекторной векторной ШИМ без

алгоритма снижения потерь. На верхней осциллограмме показаны ток и напряжение фазы А. Ток задан с некоторой реактивной составляющей. На нижней осциллограмме показан выход модуля оценки потерь, пропущенный через инерционный фильтр, а также флаг использования нулевого вектора – бинарная переменная, показывающая, какой из нулевых векторов (000 или 111) используется. Флаг не меняется, что подтверждает то, что нулевой вектор используется один и тот же. Также был проведен эксперимент с использованием другого нулевого вектора, но результат был полностью аналогичен приведенному – несмотря на другой нулевой вектор, потери и остались неизменными (сдвинулась только фаза колебаний мощности потерь, что в конечном счете на суммарный нагрев не влияет).

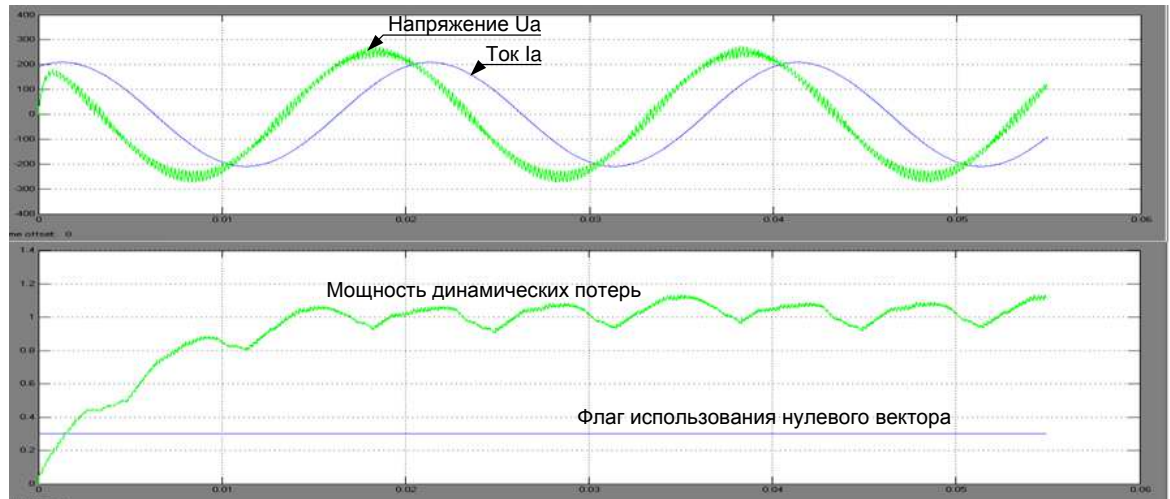


Рис. 3.10. Классическая векторная ШИМ. Ток и напряжение фазы А (верхняя осциллограмма), мощность динамических потерь и флаг использования нулевого вектора (нижняя осциллограмма).

На Рис. 3.11 показаны аналогичные осциллограммы, но при работе алгоритма снижения потерь.

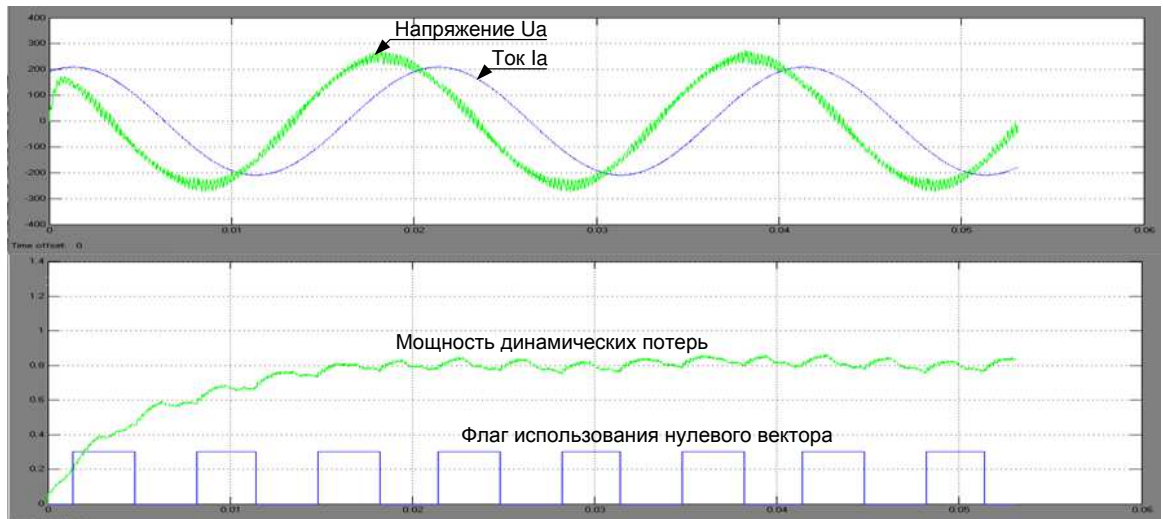


Рис. 3.11. Векторная ШИМ с алгоритмом снижения потерь. Ток и напряжение фазы А (верхняя осциллограмма), мощность динамических потерь и флаг использования нулевого вектора (нижняя осциллограмма).

Верхняя осциллограмма совпадает с осциллограммой классической векторной ШИМ. Это подтверждает, что алгоритм уменьшения потерь и смена нулевого вектора на ходу не повлияли на качество воспроизведения заданного напряжения. Однако на нижней осциллограмме видно, что мощность потерь уменьшена по сравнению с классическим векторным ШИМ. Кроме того, видна смена нулевого вектора – шесть раз за период основной гармоники тока, что говорит о работе алгоритма уменьшения потерь. При использовании классической векторной ШИМ мощность потерь на осциллограмме составила в среднем 1.0 условных единиц, а при работе алгоритма снижения потерь - только 0.8. Данный результат позволяет полагать, что введение такого алгоритма позволяет на 20% снизить мощность динамических потерь инвертора.

На модели было проведено несколько экспериментов при различной реактивной составляющей тока и различной амплитуде напряжения. В данной работе эти осциллограммы не приводятся из-за громоздкости, однако в табл.1 приведена сводка экспериментов зависимости потерь от фазы между током и напряжением. Видно, что во всех случаях включение алгоритма снижения потерь уменьшало потери на 15-20%. Дополнительно было выявлено, что полностью реактивный ток при векторной ШИМ увеличивает динамические потери по сравнению с полностью активным током. От

амплитуды выходного напряжения при том же токе потери практически не изменялись, поэтому сводка результатов не приводится.

Табл.3.1. Результаты моделирования алгоритма снижения потерь

| Фаза между током и напряжением, градусы | Потери, относительные единицы | |
|---|-------------------------------|--|
| | Классическая векторная ШИМ | Векторная ШИМ с алгоритмом снижения потерь |
| 0 | 0.82 | 0.65 |
| 30 | 0.9 | 0.71 |
| 60 | 0.95 | 0.75 |
| 90 | 1 | 0.8 |

Вывод. Исходя из результатов моделирования, алгоритм снижения потерь работоспособен и обеспечивает снижение динамических потерь в ключах инвертора на 20%.

Глава 4. Разработка программного обеспечения

Для испытания опытных образцов двигателей были разработаны тяговые преобразователи на основе инвертора напряжения. Преобразователи спроектированы научной группой Остриова В.Н. (кафедра АЭП НИУ «МЭИ», ООО "НПП Цикл+", г.Москва). Система управления для преобразователей – контроллер МК17.3 разработана научной группой Козаченко В.Ф. (каф. АЭП НИУ «МЭИ», ООО "НПФ Вектор", г.Москва). Автор данной работы, в составе этой научной группы занимался разработкой программного обеспечения для данного контроллера. В настоящей главе описывается аппаратный состав оборудования и структура разработанного программного обеспечения. Также в главе описывается программное обеспечение для персонального компьютера, предназначенное для исследования привода: позволяющее производить параметрирование ПО микроконтроллера и выполнять осциллографирование средствами микроконтроллера.

4.1 Обзор аппаратного состава тягового преобразователя и его контроллера

Упрощенная функциональная схема тягового преобразователя с указанием установленных датчиков электрических и механических величин, сигналы которых обрабатываются контроллером, показана на Рис. 4.1.

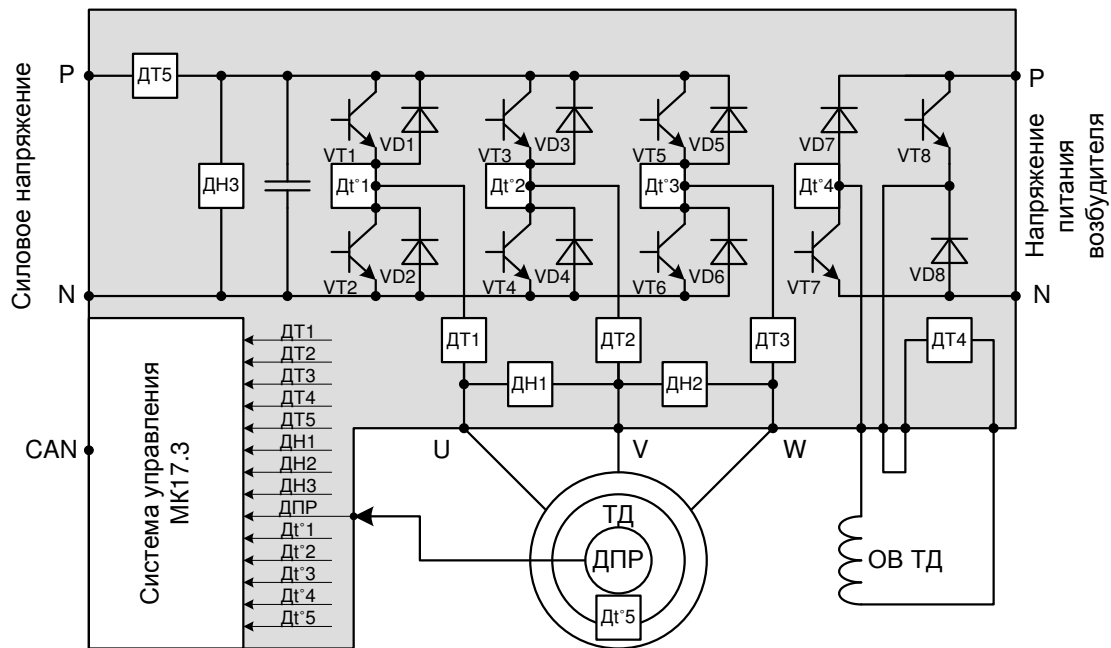


Рис. 4.1. Структурная схема тягового преобразователя ВИД НВ

Контроллер тягового преобразователя управляет 6-ю ключами мостового инвертора, подключенного к звену постоянного тока, а также 2-мя ключами полумостового возбудителя. Полумостовая схема возбудителя обеспечивает максимальную форсировку и расфорсировку при регулировании тока возбуждения тягового двигателя для обеспечения максимального быстродействия в контуре регулирования потока вентильно-индукторного двигателя как при усилении, так и при ослаблении поля. Для обеспечения качественного векторного управления в каждой фазе и контуре возбуждения установлены датчики тока на эффекте Холла компенсационного типа ДТ1-ТД4, обладающие высокой частотой пропускания. Датчик напряжения ДН3 предназначен для контроля текущего напряжения в звене постоянного тока. Его показания вместе с показаниями датчика тока ДТ5 позволяют рассчитывать потребляемую/отдаваемую электрическую мощность. Датчики температуры радиатора для каждой из трех стоек инвертора Дт°1, Дт°2 Дт°3 с токовым выходом (0-20 мА) служат для реализации тепловой защиты инвертора и ограничения мощности при отказе системы жидкостного охлаждения инвертора. Датчик температуры радиатора возбудителя Дт°4 с токовым выходом (0-20 мА) предназначен для реализации тепловой защиты возбудителя. Датчики напряжения ДН1 и ДН2 не

обязательны и установлены для получения большего количества экспериментальных данных – осциллограмм напряжения, прикладываемого к двигателю. Все сигналы аналоговых датчиков после необходимого преобразования поступают на АЦП контроллера.

Для сопряжения с датчиком положения ротора тягового двигателя, выполненного на дискретных элементах Холла, в контроллере предусматривается специальный блок обработки, реализованный на базе 3-х канального дифференциального приемника с входным триггером Шмитта, выходные сигналы которого после гальванической развязки поступают на входы захвата процессора. Электрическое положение ротора определяется с точностью до 60 электрических градусов. Частота вращения двигателя рассчитывается программным путем.

Весь обмен данными, в том числе передача команд задания режима работы, получения статуса привода с кодами ошибок, значения любого наблюдаемого параметра, выполняется по CAN-шине.

Внешний вид контроллера МК17.3 показан на Рис. 4.2.

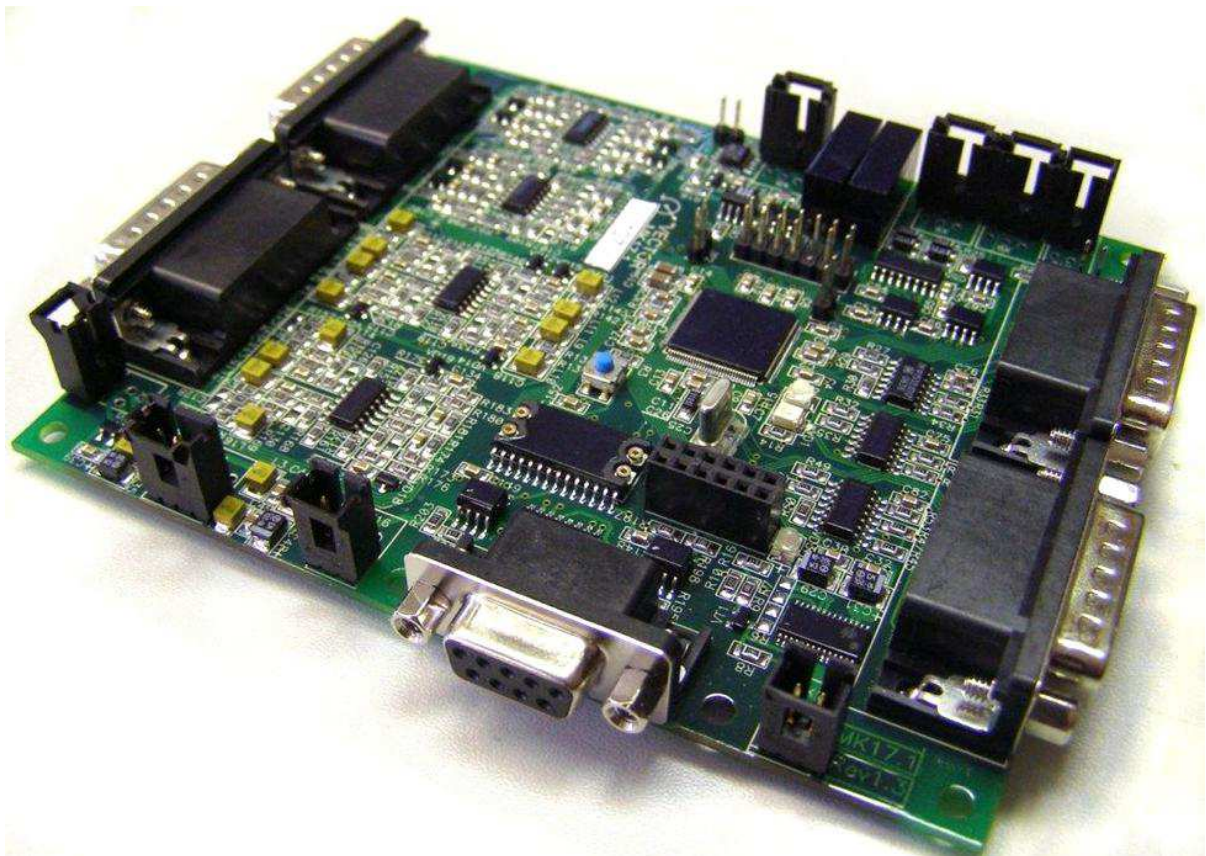


Рис. 4.2. Внешний вид контроллера МК17.3

Данный контроллер не является новой разработкой, он спроектирован в 2008-м году в качестве универсального контроллера для управления различными электроприводами – подробное описание контроллера можно найти в [5]. Однако даже до настоящего времени заложенный в то время потенциал позволяет применять его и для новых разработок.

Краткие характеристики контроллера:

Тип микроконтроллера: Texas Instruments TMS320F2810

Тактовая частота, МГц: 150

Производительность, млн.оп./сек 150

Встроенная память программ: 64 кСлова

Встроенная память данных: 18 кСлов

Энергонезависимая память: 4 кСлова

Часы реального времени: есть

Число основных ШИМ-выходов: 12

Число дополнительных ШИМ-выходов: 4

Входы приема аппаратных аварий: 10

Число каналов АЦП: 16

Встроенная индикация светодиодная

Интерфейс RS-232 есть, гальваническая развязка

Интерфейс RS-485 есть, гальваническая развязка

Интерфейс CAN есть, гальваническая развязка

Количество дифференциальных входов датчиков положения:

3 дифференциальных входа с гальванической развязкой

4.2 Разработка программного обеспечения для контроллера преобразователя

Применяемый микроконтроллер TMS320F2810PBK — специализированный сигнальный микроконтроллер фирмы Texas Instruments для управления электродвигателями. Его производительность позволяет разрабатывать программное обеспечение на языке верхнего уровня Си/Си++, что и используется в данной работе. Программное обеспечение реализует

синтезированные ранее структуры системы управления, а также содержит драйверы для работы с АЦП, ШИМ-генератором, датчиком положения ротора и другие. Программное обеспечение не разрабатывалось с нуля, а основывалось на работах [5], [1]. В частности, использовался принцип модульности программного обеспечения, применялся подход дискретных автоматов (конечных автоматов), многие модули ПО основаны на готовых аналогах, разработанных этими авторами. Так как используемый контроллер не поддерживает вычисления с плавающей точкой, для вычислений использовалась библиотека IQmath для работы с числами с фиксированной точкой от Texas Instruments.

При проектировании ПО перед автором стояли следующие задачи:

1. Сформировать в программном коде разработанные структуры управления – векторную структуру управления вместе со структурой, формирующей задания токов I_q , I_d , I_f из задания момента (были приведены на Рис. 2.5 и Рис. 2.6).
2. Переработать модуль АЦП под аппаратную конфигурацию нового силового преобразователя;
3. Реализовать изменение частоты ШИМ «на лету» в зависимости от уровня тока статора для снижения потерь в инверторе.
4. Разработать модуль ШИМ в соответствии с дополнительным алгоритмом снижения потерь, описанном в разделе 2.8.1.
5. Реализовать модуль управления возбудителем с релейным поддержанием тока.
6. Встроить существующий CANOpen драйвер в ПО микроконтроллера для доступа к настройкам привода по сети CAN. Сделать доступными по сети все возможные настройки привода для удобства проведения наладки и испытаний.
7. Реализовать вспомогательные структуры управления для обеспечения испытаний привода:

- a. Скалярное токовое управление (замкнутая по току система управления, но разомкнутая по угловому положению, с программно задаваемой фазой тока).
 - b. Векторная система управления с ПИ регулятором скорости.
 - c. Структура для автоматической калибровки датчика положения ротора (вычисляет смещение датчика положения, исключая его механическую настройку).
8. Провести серьезную оптимизацию ПО с целью повышения скорости его вычисления микроконтроллером, так как синтезированные структуры управления оказались достаточно сложны для расчета с выбранной частотой дискретизации (10кГц).

Здесь не будет приводиться решение множества инженерных задач, стоящих перед разработчиком в процессе создания ПО, так как они не представляют серьезной научной ценности. Это такие задачи как распределение приоритета прерываний контроллера, фильтрация помех датчика положения ротора, обеспечение защит преобразователя, обеспечение синхронизации доступа к переменным из различных потоков, фильтрация аналоговых данных и т.п. Далее будут приведены лишь общие данные об архитектуре ПО.

4.2.1 Обзор компоновки проекта

Какая-либо операционная система реального времени в проекте ПО микроконтроллера не применяется. В проекте используется модульный подход к построению ПО, где каждый модуль логически представляет собой класс в терминах объектно-ориентированного программирования, но реализован на языке Си. Такой модуль представляет собой структуру, внутри которой размещаются необходимые переменные, а также указатели на функции модуля, предназначенные для "внешнего" использования. Сама реализация функций находится в отдельном файле. Это имитация класса языка Си++, так как по некоторым техническим причинам использовать

Си++ в данном проекте затруднительно. Модуль обычно состоит из двух файлов – заголовочного файла с расширением *.h и одноименного файла с расширением *.c.

В проекте широко используется библиотека Texas Instruments DMC lib (<http://www.ti.com/tool/sprc080>), в которой реализован ряд таких модулей, как фазные преобразования, координатные преобразования, регуляторы и т.п. с использованием целочисленной математики. Соответствующие файлы библиотеки подключены к проекту и используются в качестве готовых модулей.

Главный файл проекта, main.c, является первым файлом, с которого начинается выполнение программы. В нем определяются экземпляры всех модулей, а также он содержит функции-обработчики, вызываемые по всем прерываниям в системе.

4.2.2 Прерывания и их обслуживание

В проекте существует три основных прерывания (потока выполнения), в которых выполняется большая часть программного кода. Эти три прерывания включают:

- Прерывание «10кГц». Один из свободных таймеров контроллера используется для создания прерывания с частотой 10кГц. В обработчике этого прерывания рассчитывается основная часть системы управления: структура векторного управления, модуль ШИМ, регуляторы токов, обработка датчика положения, модули защит, предупреждений и т.п.
- Прерывание «1кГц». Аналогично прерыванию «10кГц», использует один из таймеров контроллера. Нужно для задач, не требующих большой скорости выполнения, однако требующих строгую дискретизацию по времени. Здесь обрабатываются различные сетевые интерфейсы, логика включения/выключения системы и т.п.

- Прерывание «80кГц». Самое «высокоскоростное» прерывание. Возникает по окончанию преобразования АЦП, которое, в свою очередь, запускается по отдельному таймеру. В этом прерывании должна происходить только обработка измерений АЦП, так как нет ресурсов на что-то еще. Таким образом, за один такт обработки основной системы управления в прерывании «10кГц», происходит обработка 8-х измерений, которые затем усредняются. На более высокую частоту измерений не хватает производительности контроллера, а более низкая частота приводит к менее качественным измерениям (усреднение по меньшему количеству точек).

Кроме этих прерываний в системе присутствуют прерывания датчиков положения ротора. Также в ПО присутствует фоновый цикл расчета вне каких-либо прерываний, в котором рассчитываются задачи, не требующие строгой дискретизации по времени, такие как преобразование введенных пользователем настроек во внутренний формат системы управления и т.д.

4.2.3 Драйвер CANopen на базе интерфейса CAN

Основным каналом управления преобразователем является интерфейс CAN, работающий по сетевому протоколу CANopen, который программно реализован в виде соответствующего низкоуровневого драйвера. Такой драйвер уже был разработан в научной группе к моменту начала работы автора над данной темой, поэтому для связи с контроллером был использован именно протокол CANopen. Все доступные пользователю «извне» наблюдаемые переменные и редактируемые параметры описываются в виде так называемого словаря CANopen, который содержит информацию об их адресах и форматах. К каждому параметру может быть осуществлен доступ посредством SDO сервиса протокола CANopen. В словарь объектов выведены практически все переменные системы управления – все аналоговые каналы данных, их настройка, входы, выходы и параметры всех регуляторов, промежуточные переменные, коэффициенты и т.п. Таким

образом, привод полностью конфигурируется и диагностируется через интерфейс CAN протокола CANopen.

4.2.4 Драйвер RS485

Дополнительным каналом управления преобразователем является интерфейс RS485, работающий по специализированному протоколу вида ведущий-ведомый, спроектированному специально для данного проекта. Он задействуется при использовании преобразователя в составе электротрансмиссии. По данному протоколу контроллер верхнего уровня трансмиссии передает преобразователям задание момента, а преобразователи возвращают в ответ значение фактического момента и текущую частоту вращения. Других данных по протоколу не передается. Скорость передачи данных по RS485 выбрана 1Мбит/с. Общий цикл опроса восьми преобразователей двигателей по такому протоколу составляет не более 1мс. На основе этой информации контроллер верхнего уровня реализует алгоритм антиблокировочной системы (АБС) и противобуксовочной системы (ПБС) колес. Такой быстродействующий интерфейс связи заложен специально для возможности качественной реализации данных интеллектуальных алгоритмов помощи водителю. Такая скорость передачи данных дает возможность контроллеру верхнего уровня качественно высчитывать ускорение колес, оперативно реагировать на потерю колесом сцепления с дорогой и корректировать момент на каждом двигателе.

В том случае, если интерфейс RS485 отказывает, его функции в урезанном виде принимает на себя штатный интерфейс CAN. При этом средства помощи водителю при блокировке и проскальзывании колес ограничиваются, так как интерфейс CAN загружен большим количеством других данных и высокой частоты обновления моментов и частот вращения не обеспечивается. Тем самым обеспечивается как минимум двукратное резервирование каналов связи тяговых двигателей с контроллером верхнего уровня.

4.3 Создание программных средств для исследования привода

При разработке собственной системы управления преобразователем частоты наибольшее время занимает создание программного обеспечения и его отладка. Классический подход к отладке ПО, заключающийся в пошаговом проходе программы, чаще всего неприменим для микроконтроллерных систем управления, работающих в реальном времени. Программу, управляющую силовым инвертором, нельзя останавливать даже на короткий промежуток времени – это приведет в лучшем случае к аварийному останову системы, в худшем к выходу из строя силовых ключей инвертора. При работе двигателя допустимо только просматривать и изменять значения переменных, строить графики изменения их от времени (осциллограммы). Некоторые производители предоставляют средства для отладки микроконтроллеров в реальном времени без остановки управляющей программы микроконтроллера. Например, фирма Texas Instruments позволяет, в том числе для серии микроконтроллеров motor control, просматривать и редактировать любые переменные программы через собственную среду разработки и интерфейс JTAG, а также строить графики изменения величин от времени в режиме реального времени без остановки управляющей программы микроконтроллера. Это действительно удобно для однопроцессорного устройства, в котором доступен разъем JTAG во время работы электропривода. Однако часто силовые преобразователи закрыты и доступа к разъему интерфейса JTAG нет: вывести разъем JTAG на лицевую панель преобразователя невозможно из-за требований помехозащищенности, а из-за требований к конструктивному исполнению преобразователя быстрый доступ к его контроллеру внутри корпуса тоже невозможен. Эти факторы заставляют разработчиков ПО специализированных микроконтроллеров, управляющих силовым электрооборудованием, искать новые пути отладки ПО без участия интерфейса JTAG. Средства для отладки сложных многопроцессорных систем привода должны позволять:

- Просматривать и редактировать параметры устройства (коэффициенты регуляторов, уставки ограничений, задания и т.п.).
- Просматривать в реальном времени текущие значения каких-либо величин (ток, напряжение, промежуточные величины системы управления, выходы регуляторов и т.п.)
- Осциллографировать любую наблюдаемую величину или одновременно несколько величин – строить графики изменения от времени.

Все эти задачи можно решить только при использовании какого-либо интерфейса связи микроконтроллера. Наиболее рационально для этого выбрать тот же интерфейс связи, которым объединяются микроконтроллеры всех устройств для решения выбранной технологической задачи. Из современных интерфейсов связи, доступных в специализированных микроконтроллерах, можно выделить CAN интерфейс, который широко применяется как в сфере сервоприводов, так и в автомобильной промышленности. CAN позволяет организовать неразрушающий доступ к шине нескольким устройствам одновременно, и обмениваться дополнительной сервисной информацией в фоновом режиме не мешая передаче основных пакетов данных. Существует два основных и наиболее распространенных протокола связи на его основе: CANopen и J1939. Оба поддерживают в своей архитектуре понятие номеров параметров (словаря объектов) с возможностью адресации индивидуально каждого параметра. Выбор в качестве базового CAN интерфейса и реализация одного из этих протоколов связи автоматически решает первые две задачи – просмотр и редактирование любых параметров микроконтроллерного устройства. Конечно, для этого потребуется реализовать драйвер протокола обмена как со стороны микроконтроллера, так и со стороны персонального компьютера (с использованием стороннего или собственного CAN интерфейса, например, CAN-USB), а также реализовать визуальную оболочку для удобной работы с драйвером. В разделе 4.2.3 уже указывалось, что в ПО контроллера МК17.3

уже заложен готовый на момент проведения данной работы драйвер CANOpen. Однако для персонального компьютера удобного универсального ПО для работы по интерфейсу CANOpen найти не удалось. Существуют бесплатные утилиты для работы со словарем объектов CANOpen, осуществляющие доступ к любому параметру словаря объектов CANOpen на основе его SDO-сервиса. Однако их интерфейс чаще всего неудобен, возможность осциллографирования данных тоже отсутствует, поэтому является желательной разработка собственной программной оболочки для работы с CANOpen драйвером.

Автор в составе своей научной группы принимал участие в разработке такого ПО для персонального компьютера. Разработанная программа представляет собой графическое приложение Windows, которое через переходник интерфейсов USB-CAN подключается к сети CAN контроллера (в данном случае МК17.3). Внешний вид главного окна программы представлен на Рис. 4.3. В левой части главного окна отображаются группы параметров привода согласно двухуровневой иерархии словаря объектов CANOpen, а в правой отображается список параметров выбранной группы, значение каждого из которых обновляется в реальном времени через SDO-сервис протокола CANOpen.

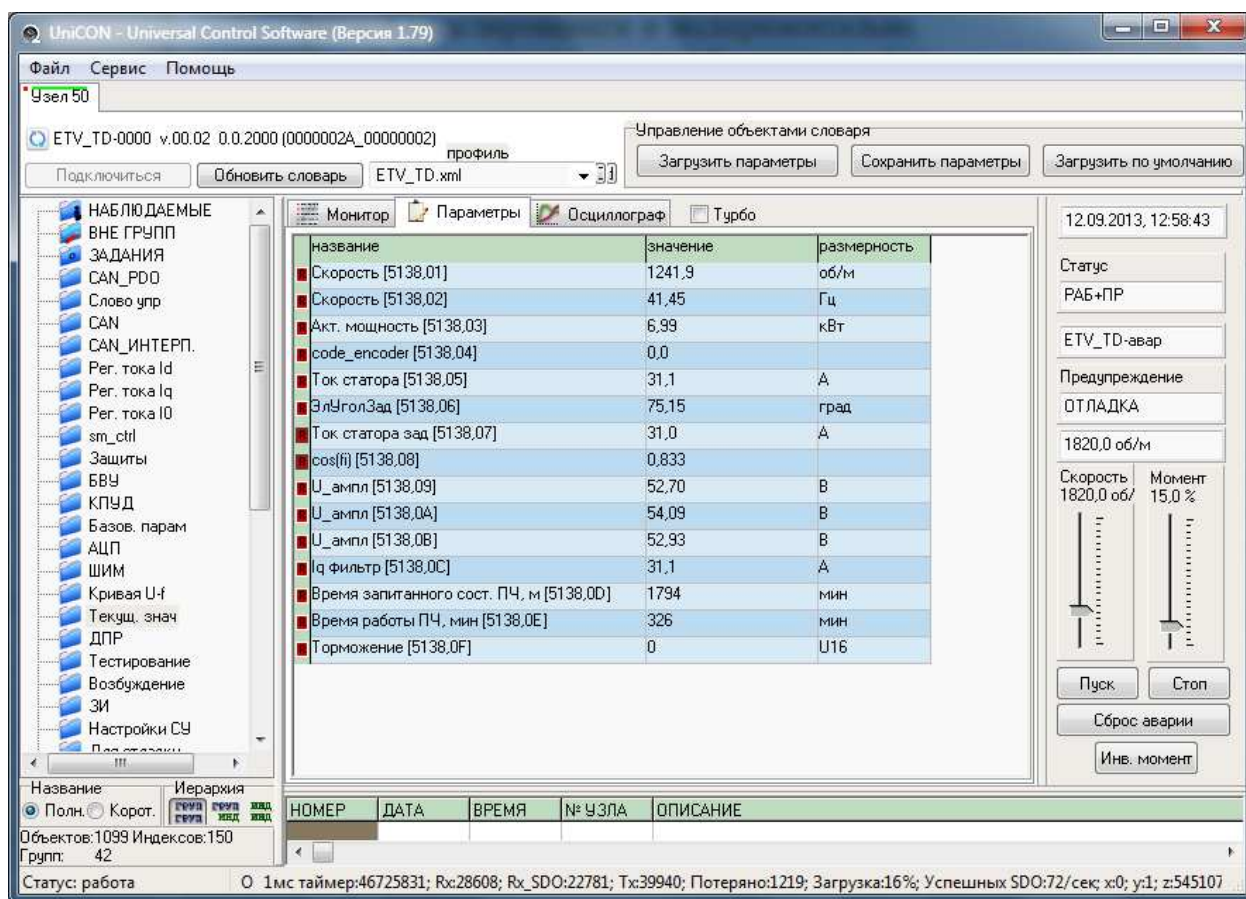


Рис. 4.3. Внешний вид окна программы для персонального компьютера, через которую осуществляется управление, параметрирование и отладка разработанного ПО контроллера силового преобразователя.

Ключевой особенностью, за разработку которой отвечал автор данного труда, является модуль цифрового осциллографа в данной программе [17]. Данный модуль позволяет производить осциллографирование средствами контроллера преобразователя любых данных, доступных системе управления и выведенных в словарь объектов CANOpen. Сюда входят все аналоговые каналы (токи, напряжения, температуры и т.п.), все рассчитываемые значения (мощность, заданные напряжения, токи по осям d,q и т.п.), а также большинство промежуточных переменных (входы и выходы всех регуляторов, блоков ограничения, скважности ШИМ по каждому ключу и т.п.). На Рис. 4.4 показано окно программы с открытой вкладкой осциллографа.

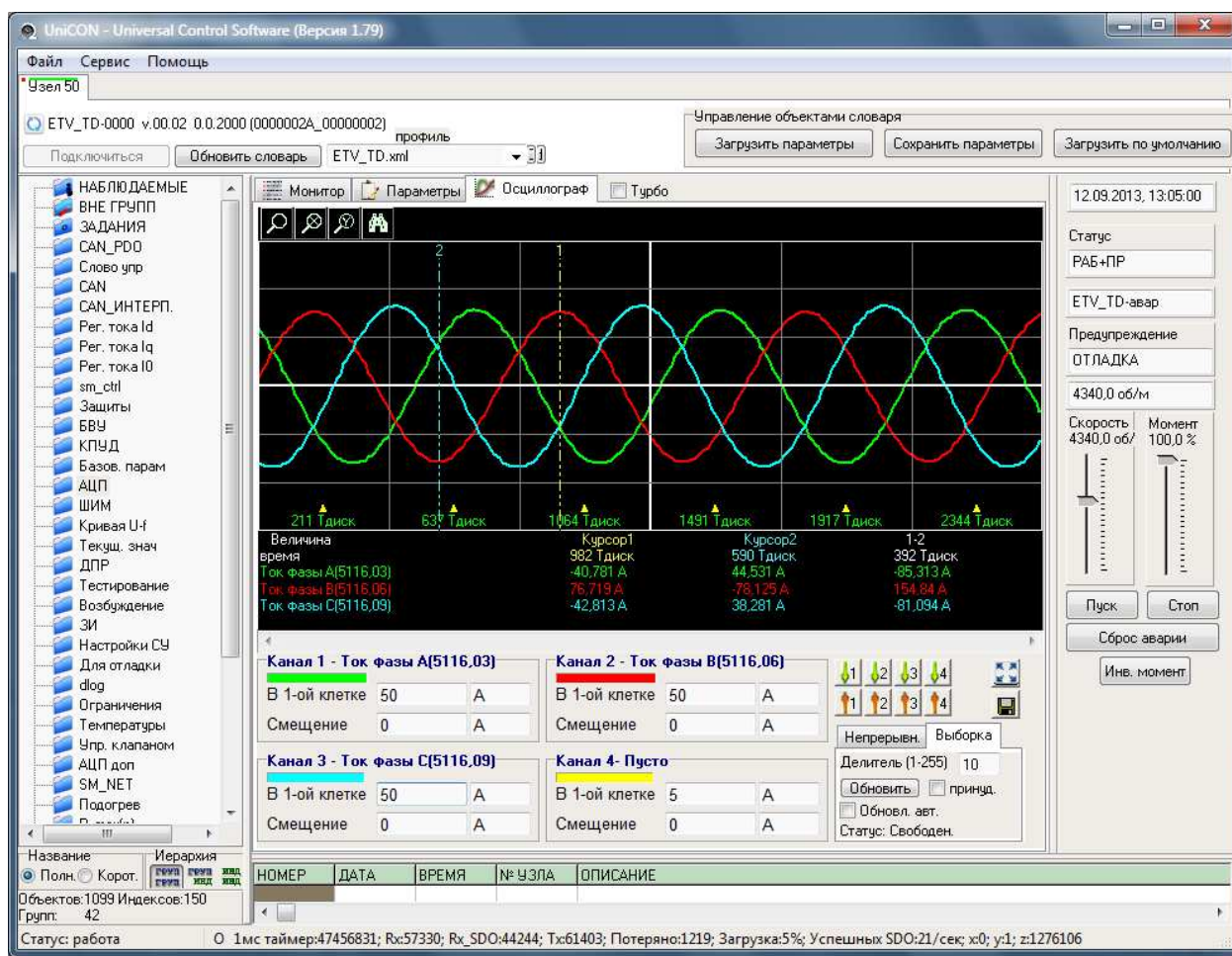


Рис. 4.4. Внешний вид окна программы с открытой вкладкой осциллографа

Разработанный цифровой осциллограф может отображать до четырех переменных одновременно по выбору пользователя. Частота выборки данных регулируется от 4Гц до 80кГц. Для обеспечения такого широкого диапазона выборки данных применена специальная технология. Если пользователю достаточно медленной частоты обновления (4Гц), то значения переменных запрашиваются в реальном времени по сети CAN при помощи сервиса SDO CANOpen, после чего график отображается на экране. Этот способ подходит для наблюдения относительно медленных процессов – осциллограммы разгона привода, получения его кривых нагрева и т.п. Если требуется большая частота выборки данных, например, для наблюдения формы тока фаз и различных переходных процессов, то используется предварительная буферизация данных. Выбранные пользователем для осциллографирования величины сначала записываются в массив (255 точек на каждую переменную) внутри контроллера преобразователя с необходимой

дискретизацией, а после по интерфейсу CAN «выкачиваются» на компьютер, после чего отображаются на экране. Такое решение с предварительной буферизацией данных обусловлено невозможностью по интерфейсу CAN передавать данные с необходимой скоростью в режиме реального времени. Максимальная частота выборки данных – 80кГц обусловлена ограниченной производительностью контроллера. Однако для отладки электропривода этой частоты более чем достаточно для наблюдения даже самых быстрых процессов.

Также для обеспечения осциллографирования была разработана другая программа, предназначенная для слежения за электротрансмиссией в целом. При включении преобразователя тягового двигателя в общую сеть электротрансмиссии транспортного средства драйвер CANOpen используется для передачи основных параметров привода контроллеру верхнего уровня. Также контроллер верхнего уровня посылает по сети CAN задание момента приводу. Кроме того, в сети присутствуют другие устройства, такие как преобразователь генератора, тормозных резисторов и т.п. Все эти данные CANOpen драйвера отправляет посредством сервиса PDO – неподтверждаемых сообщений. Таким образом, в сети CAN электротрансмиссии передается большое количество данных от различных устройств – сотни различных каналов данных. Описанное выше разработанное программное обеспечение позволяет осциллографировать только четыре канала данных и только от одного устройства. Оно предназначено для отладки одного устройства на лабораторном стенде. Но при работе реальной электротрансмиссии, состоящей из большого числа устройств, желательно получать общую картину происходящих в системе процессов – визуализировать основные показатели всех устройств на одной осциллограмме. Так, для тягового двигателя основными показателями могут быть, к примеру, частота вращения, мощность, текущий момент, ток статора, ток возбуждения, температуры преобразователя и двигателя. Все эти данные передаются контроллеру верхнего уровня, на основе них осуществляется

управление трансмиссией. Однако интересно также строить график из этих данных для отладочных и экспериментальных целей.

В соответствии с этим была разработана программа, осуществляющая визуализацию данных, передаваемых между контроллерами силовых преобразователей и контроллером верхнего уровня. Работа выполнялась коллективом сотрудников. Автор в этой работе принимал участие, заключающееся в разработке модуля визуализации данных, позволяющего на одной оси времени разместить одновременно сотни графиков изменяющихся данных, осуществлять масштабирование и удобный их просмотр. Модуль, обеспечивающий поставку данных для визуализации из сети CAN, реализовывали другие сотрудники. Главное окно разработанной программы показано на Рис. 4.5.

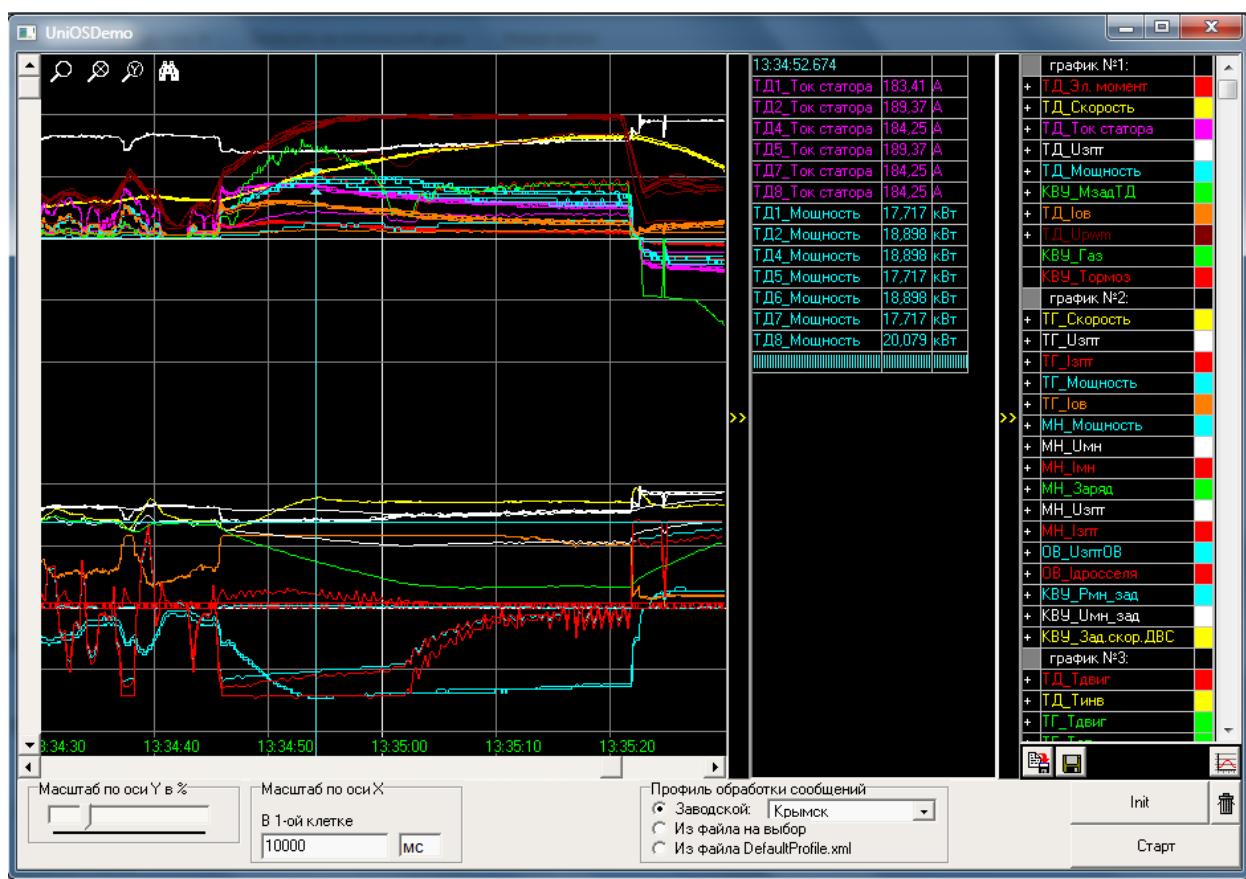


Рис. 4.5. Внешний вид окна программы для визуализации данных PDO сообщений всех устройств электротрансмиссии

Данная программа для персонального компьютера позволяет отображать все основные процессы, происходящие в устройствах электротрансмиссии, построенной на базе ВИД НВ с применением

разработанного ПО для микроконтроллера. Набор визуализируемых данных ограничен теми, которые передаются между устройствами трансмиссии и контроллером верхнего уровня. Этим же определяется и частота дискретизации. Уникальная особенность программы в том, то она позволяет отобразить все графики на одной оси времени (сотни величин), что позволяет комплексно оценить происходящие в трансмиссии процессы.

Вывод.

Разработанное ПО микроконтроллера реализует все синтезированные структуры и алгоритмы управления, а также содержит большое число вспомогательных модулей, обеспечивающих защиту преобразователя, управление и параметрирование через интерфейс CAN, вспомогательные структуры управления для экспериментальных исследований привода.

Разработанное ПО персонального компьютера позволяет более обстоятельно подходить к отладке ПО микропроцессоров, исследованию привода и системы управления. Без возможности оперативно изменять параметры привода и тут же получать новую осциллограмму работы процесс отладки и настройки сложной системы управления занял бы очень долгое время, если бы был вообще возможен. Несмотря на отсутствие в создании таких компьютерных программ какой-либо научной новизны, наличие такого или аналогичного программного обеспечения является необходимым условием для успешной разработки современных микроконтроллерных систем управления приводами. Без использования такого ПО не было бы возможным проведение экспериментальных исследований, описанных далее.

Глава 5. Экспериментальные исследования

5.1 Испытания основных алгоритмов ПО на лабораторном макете привода

Для базовой проверки разработанных алгоритмов управления и ПО был собран лабораторный стенд, состоящий из преобразователя частоты Универсал мощностью 7.5кВт под управлением контроллера МК17.3 (см. Рис. 5.1), а также вентильно-индукторного двигателя мощностью 7,5 кВт, имеющегося в распоряжении после прошлых проектов и исследований (см. Рис. 5.2). Принцип действия машины аналогичен конструкции проектируемого тягового двигателя, однако вместо распределенных обмоток статора в лабораторном макете обмотки сосредоточенные. Число фаз в машине 3, число пакетов статора 6, число зубцов статора 12 и зубцов ротора 7, напряжение питания ~380В. Машина является двухсекционной с последовательным соединением фаз отдельных секций. Нагрузочный двигатель отсутствует, машина работает на холостом ходе.



Рис. 5.1. Внешний вид преобразователя Универсал с контроллером МК17.3

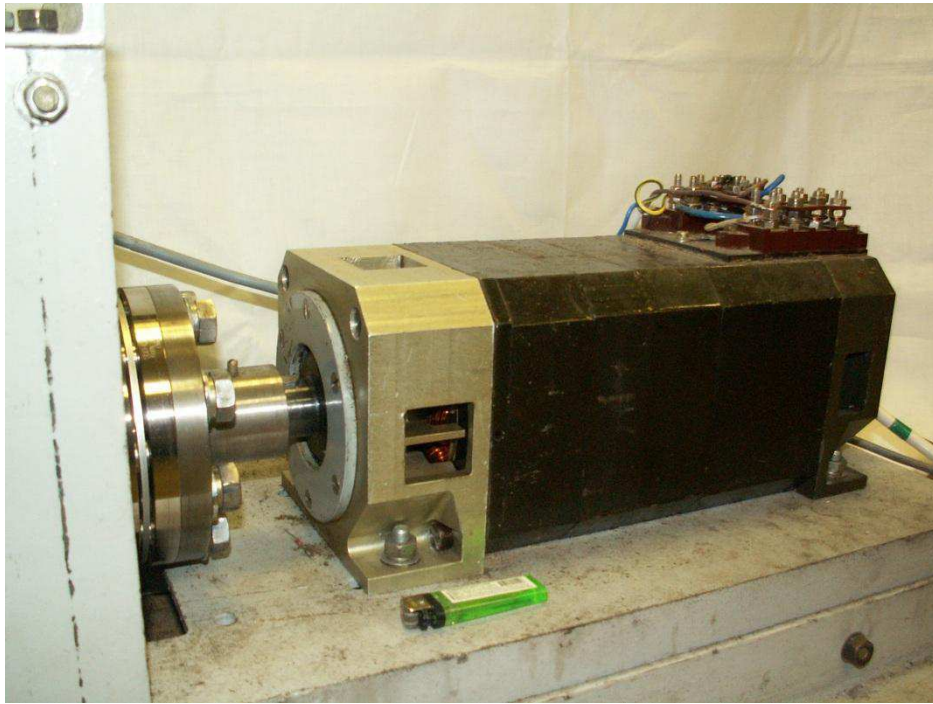


Рис. 5.2. Один из первых образцов вентильного индукторного двигателя, используемый для лабораторного стенда

Данный лабораторный стенд монтировался, главным образом, с целью проверки основных функций и алгоритмов разработанного ПО, его отладки, пред тем как приступить к испытаниям полноразмерного опытного образца тягового двигателя и силового преобразователя.

5.1.1 Проверка работоспособности ПО: структура векторного управления и структура предварительной обработки задания момента

После процесса отладки разработанного ПО и исправления большей части всех недочетов, стало возможным получить осциллограммы работы привода с разработанной структурой управления. Ниже приведены осциллограммы, отображающие поведение системы управления при различных ступенчатых заданиях момента. Так как используемый на макете привод имеет отличные от проектируемого тягового двигателя параметры, (другие токи и напряжения), то все осциллограммы имеют качественный характер. Осциллограммы снимались при помощи разработанной системы цифрового осциллографирования, описанной в 4.3.

На Рис. 5.3 приведены осциллограммы отработки различных заданий момента.

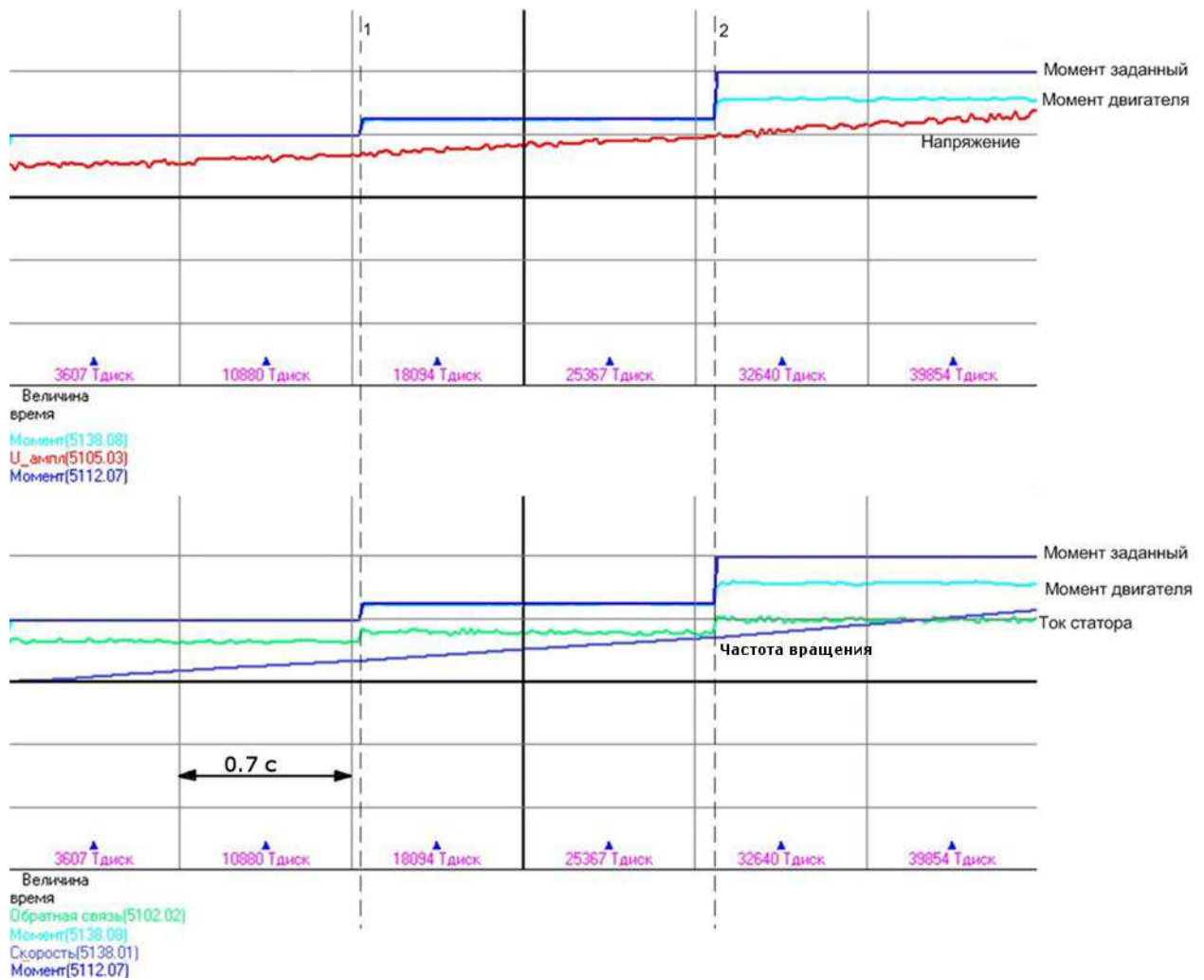


Рис. 5.3 Ступенчатое задание тягового момента

На обоих графиках (верхнем и нижнем) показан заданный момент и отрабатываемый (момент двигателя). Отрабатываемый момент рассчитывается согласно структурной схеме системы управления на основе измеряемых значений токов статора и возбуждения. На верхней осциллограмме приведена амплитуда напряжения на обмотке статора, а на нижней – частота вращения двигателя и амплитуда тока статора.

В момент времени 1 происходит скачкообразное увеличение задания момента и система управления его отрабатывает. В момент времени 2 происходит еще одно увеличение задания, который система управления уже отработать не может и появляется рассогласование между заданным моментом и текущим. На осциллограмме приведен пример того, как отрабатывается момент, если ток упирается в ограничение, и система не может отработать задание. Ток становится максимально допустимым (ток

показан на нижней осциллограмме) и момент также достигает своего максимального значения и ограничивается.

На Рис. 5.4 приведена осциллограмма отработки отрицательного момента при переходе в режим торможения машины.

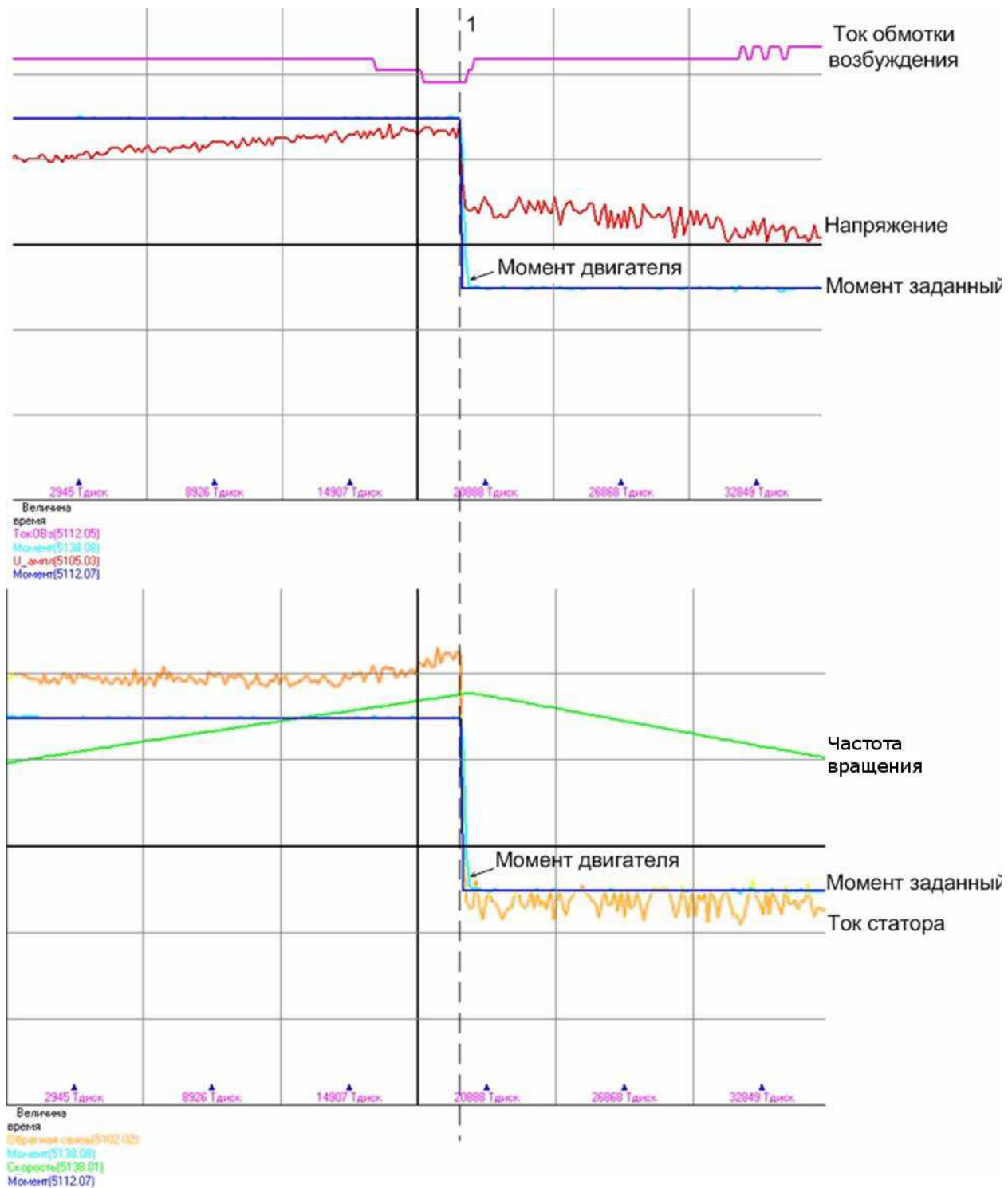


Рис. 5.4 Отработка отрицательного момента в режиме торможения. В одной клетке по оси времени – 0,6 с.

В момент времени 1 задание на момент двигателя меняется с положительного на отрицательное. Оработка задания занимает около 50мс. Факт отработки задания виден по изменению производной осциллограммы частоты вращения.

Вывод

Осциллограммами с макета тягового привода подтверждается базовая работоспособность разработанной структуры системы управления. Для более детальной проверки требуется использование более сложного стенда.

5.1.2 Проверка работоспособности ПО: алгоритм снижения потерь в ШИМ

Для подтверждения результатов работы алгоритма снижения потерь в АИН за счет использования различных реализаций нулевых векторов напряжения был проведен специальный опыт. Уже отлаженная программа модуля ШИМ и алгоритма снижения потерь на языке Си была перенесена из модели MATLAB в ПО управления преобразователем. После чего было произведено два тепловых эксперимента: при использовании классической шестисекторной векторной ШИМ и при работе ШИМ, дополненной алгоритмом уменьшения потерь. Преобразователь работал в замкнутой по току структуре управления для исключения факторов влияния искажений мертвого времени, нагрева обмоток двигателя и т.п. Так как двигатель ВИД НВ не имел соответствующей системы охлаждения и не мог длительно выдерживать большой ток по статорным обмоткам, вместо данного двигателя был подключен серийный асинхронный двигатель мощностью 15кВт. Системой управления поддерживался ток амплитудой 15 А, частота ШИМ была установлена равной 10кГц. Преобразователь включался при комнатной температуре и отключенном принудительном охлаждении (вентиляторы радиатора), после чего на компьютере автоматически строился график нагрева его радиатора (точки, на 3 см отстоящей от IGBT модуля). График строился также при помощи ПО, описанного в 4.3. Не смотря на то,

что два эксперимента были проведены в разное время, в целях сравнения и анализа графики нагрева были наложены один на другой (Рис. 5.5).

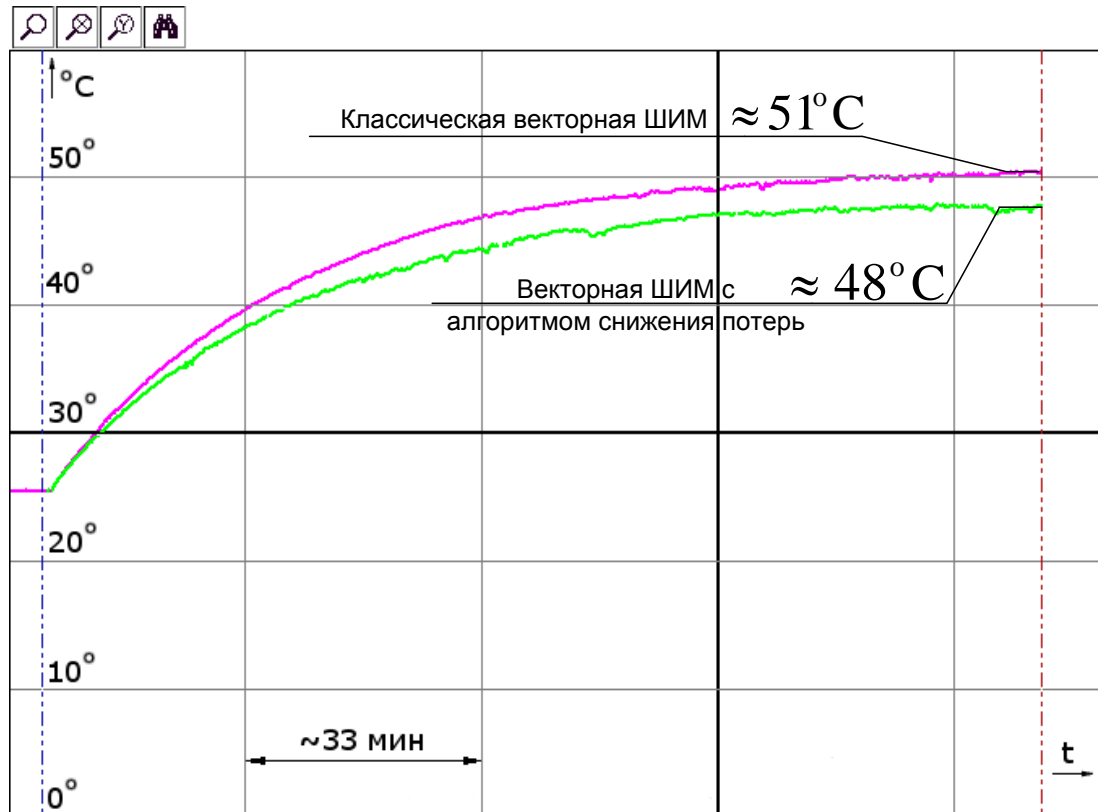


Рис. 5.5. Графики эксперимента по нагреву преобразователя: при использовании алгоритма снижения потерь и без него

Эксперименты продолжались приблизительно 2 часа 20 минут, до выхода значения температуры к установившемуся значению. Видно, что график нагрева с использованием алгоритма снижения потерь проходит ниже, чем график нагрева без него, а установившаяся температура – меньше. Так, разница в установившихся температурах составляет

$$\Delta T = T_{\text{classic}} - T_{\text{new}} = 51 - 48 = 3^{\circ}\text{C}, \text{ где}$$

T_{classic} – установившаяся температура при классической векторной ШИМ;

T_{new} – установившаяся температура векторной ШИМ с алгоритмом снижения потерь.

Перегрев – разница между средней установившейся температурой ($T_{уст.ср.} = 50^{\circ}\text{C}$) и температурой окружающей среды ($T_{окр} = 25^{\circ}\text{C}$) в среднем для двух графиков составляет

$$\tau = T_{уст.ср.} - T_{окр} = 50 - 25 = 25^{\circ}\text{C}.$$

В первом приближении можно сказать, что перегрев пропорционален потерям в инверторе:

$$P \sim \tau.$$

Тогда при применении алгоритма уменьшения потерь потери снизились на

$$\Delta P_{общие} = \frac{\Delta T}{\tau} \cdot 100\% = \frac{3}{25} \cdot 100 = 12\%.$$

Для используемого в преобразователе IGBT модуля на частоте 10 кГц динамические потери составляют примерно 3/4 от общих потерь (динамические плюс статические). Таким образом, если считать, что статические потери не изменились, то уменьшение динамических потерь составляет примерно

$$\Delta P_{динам} = \Delta P_{общие} \cdot \frac{4}{3} = 12 \cdot \frac{4}{3} = 16\%.$$

Этот результат близок к ожидаемому результату, полученному при моделировании в MATLAB.

Вывод

Небольшой модификацией стандартной векторной ШИМ, а именно введением зависимости между используемым нулевым вектором напряжения (код 000 или 111) и мгновенными токами фаз, можно добиться снижения динамических потерь в АИН на 15-20%. Работоспособность алгоритма снижения потерь проверена и моделированием, и практическим экспериментом. Из минусов можно отметить то, что для реализации смены нулевого вектора «на ходу» потребуется поддерживающий это микроконтроллер, имеющий достаточную производительность и «теневые» регистры для смены уставок сравнения и настроек ШИМ-генератора. Кроме

того, если в ПО контроллера используются какие-либо алгоритмы компенсации эффекта мёртвого времени, то необходимо в их работе учитывать возможность произвольной смены используемого нулевого вектора.

5.2 Испытания опытных образцов тяговых двигателей

5.2.1 Описание стенда и методики испытаний

На ОАО «Сарапульский электрогенераторный завод» г. Сарапул были изготовлены опытные образцы тяговых двигателей ВИД НВ и стенд для их испытаний. Более корректно – мотор редукторы, так как в передней части располагается планетарный редуктор с передаточным отношением 4,13. На Рис. 5.6 показан мотор-редуктор в сборе, на Рис. 5.7 двигатель со снятым редуктором, а на Рис. 5.8 ротор двигателя. Проектные параметры двигателя приводились ранее в разделе 2.2.

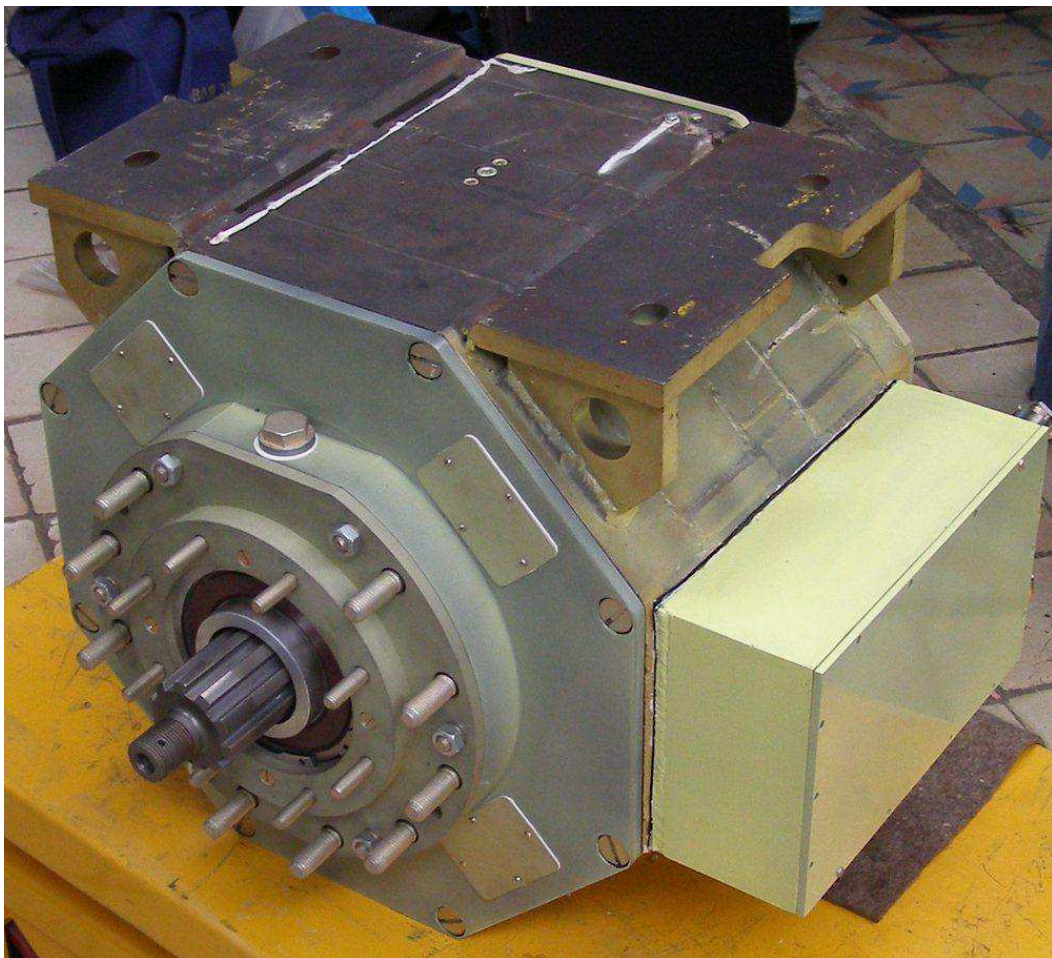


Рис. 5.6. Мотор-редуктор на базе ВИД НВ мощностью 35кВт

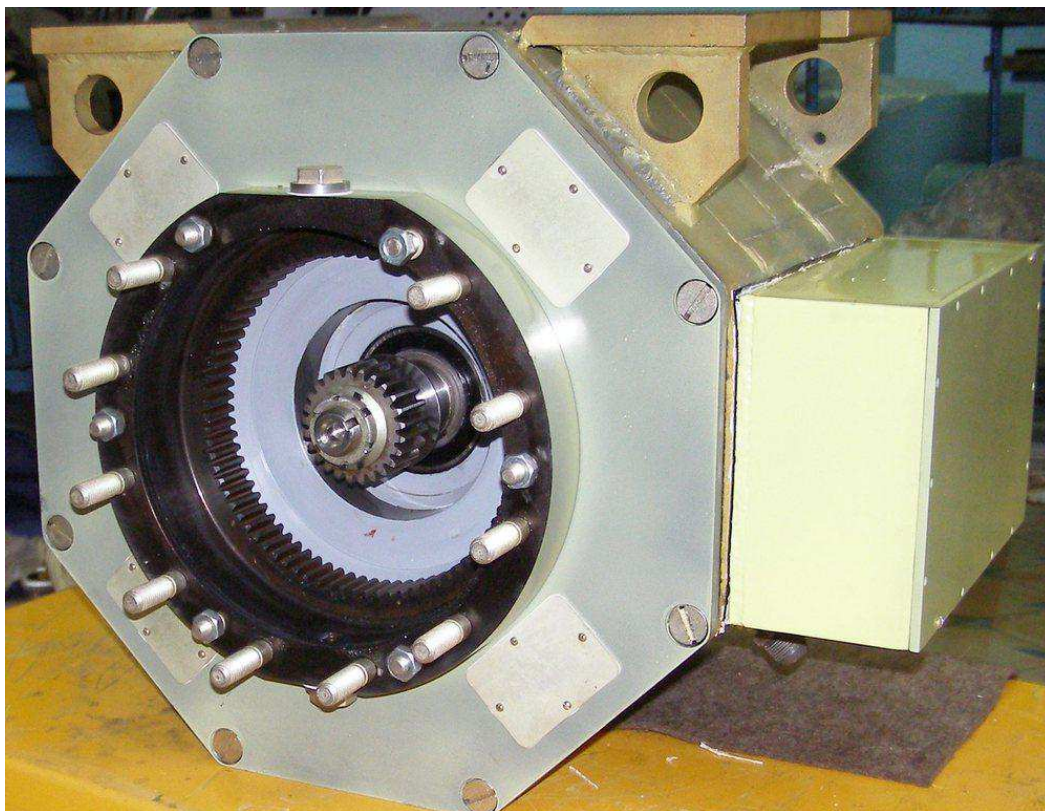


Рис. 5.7. Двигатель со снятым редуктором



Рис. 5.8. Ротор двигателя

Для полноценного испытания двигателей – снятия опытным путем их тяговой характеристики – требуется изготовление сложного стенда. Это должна быть либо спарка испытуемого и лабораторного двигателя большой мощности под управлением от преобразователя, позволяющего работать длительно с возможностью рекуперации во всем диапазоне скоростей и моментов испытуемого двигателя, либо спарка из двух одинаковых опытных двигателей, соединенных датчиком момента и преобразователями, соединенными по звену постоянного тока.

Второй вариант более удобен и предпочтителен, но датчик момента на требуемый диапазон моментов и частот вращения – достаточно дорогое устройство. Поэтому был выбран третий, еще более простой метод испытаний двигателей.

Первоначально двигатели подсоединялись к гонному двигателю с фиксированной частотой вращения без участия силового преобразователя. На этом стенде снималась характеристика холостого хода (зависимость напряжения от тока возбуждения) и характеристика короткого замыкания (зависимость токов фаз от тока возбуждения). Сравнение этих характеристик с расчетными позволяет конструкторам двигателя с некоторой степенью точности судить о соответствии реальных экземпляров двигателей расчету.

Отдельный интерес для тягового двигателя представляет опытное измерение максимального момента – эта важная характеристика определяет уровень уклона, который может преодолеть транспортное средство с такими двигателями. Кроме того, интерес представляет получение зависимости момента от тока статора и тока возбуждения и сравнение её с расчетной (Рис. 2.4). Опытное измерение такой зависимости позволяет судить о правильности расчета насыщения магнитопровода машины, и, в случае расхождения опытных и расчетных данных, скорректировать методику проектирования. Для проведения таких измерений с участием автора была разработана методика испытаний и стенд, структура которого показана на Рис. 5.9.

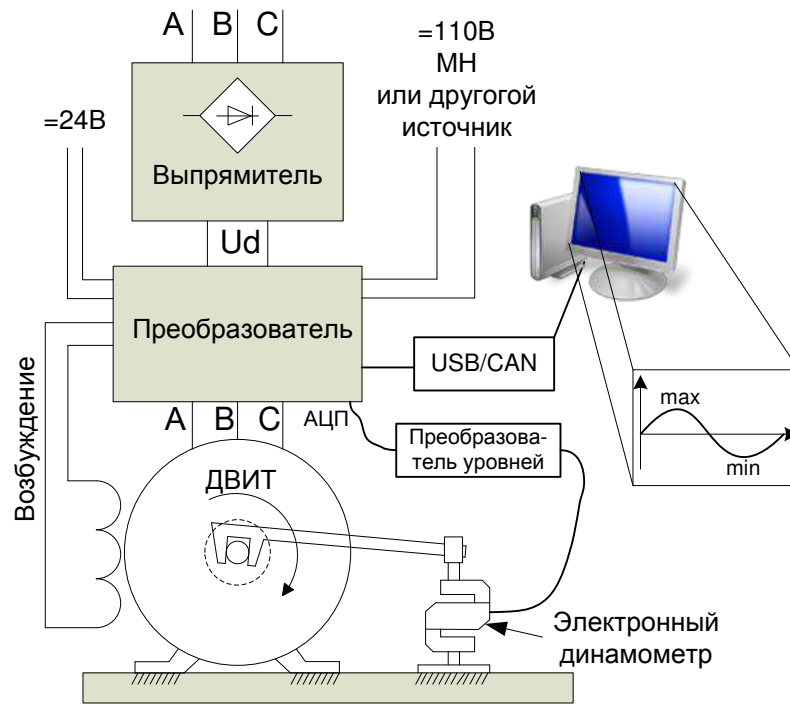


Рис. 5.9. Структура стенда для определения статического момента двигателя в зависимости от токов статора и возбуждения

Двигатель испытывается с заторможенным ротором. Ротор заторможен через штангу, к концу которой подключен электронный динамометр. Сигнал с электронного динамометра после соответствующего аналогового преобразователя подается на свободный аналоговый вход силового преобразователя. На статор двигателя от силового преобразователя подается трехфазный синусоидальный ток заданной амплитуды с периодом 15 сек (квазистатическое изменение тока). В обмотке возбуждения также поддерживается заданный уровень тока. Ток фазы А, ток возбуждения и момент с электронного динамометра фиксируется на осциллограмме персонального компьютера при помощи разработанного программного обеспечения. Перед экспериментами сигнал с электронного динамометра калибруется внешним образцовым динамометром. Из полученной осциллограммы можно зафиксировать максимум момента, выданного испытуемым двигателем при заданной амплитуде фазного тока и возбуждения. На Рис. 5.10 показана фотография стенда – двигатель, штанга и электронный динамометр.

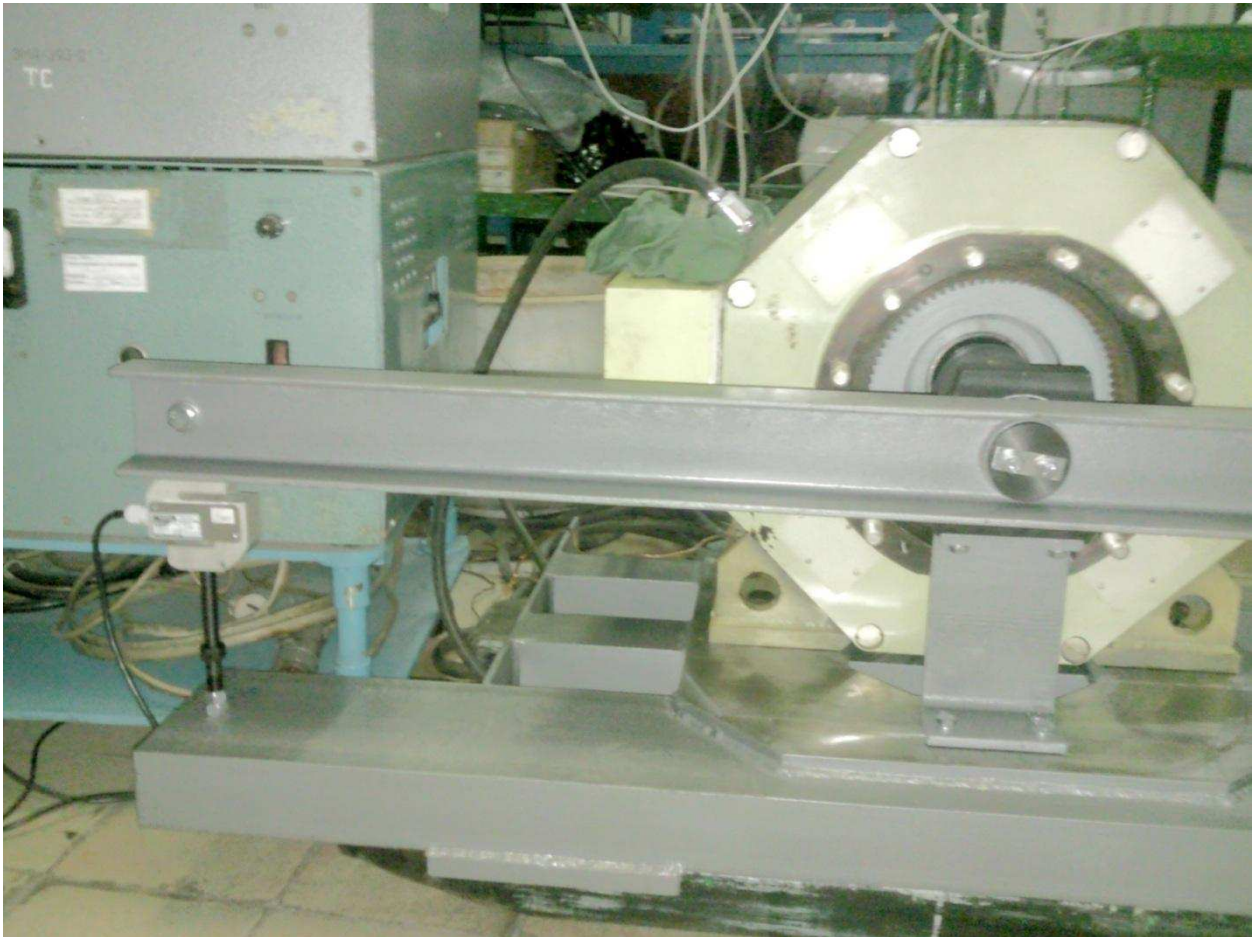


Рис. 5.10. Фотография стенда для определения статического момента двигателя в зависимости от токов статора и возбуждения

Для каждого фиксированного тока статора и тока возбуждения записывалась осциллограмма одного полного периода (тока и момента).

5.2.2 Экспериментальное снятие зависимости момента от тока статора и тока возбуждения

Момент снимался при следующих амплитудах токов статора (13 уставок):

0, 10, 20, 50, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450, 500 А

И при следующих токах возбуждения (11 уставок):

0,1,2, 3.5, 5, 7, 10, 14, 18, 24, 27 А

Пример типовой осциллограммы, получаемой со стенда, показан на Рис. 5.11. Максимальное значение момента, выдаваемое двигателем, заносится в таблицу для соответствующего уровня тока статора и тока возбуждения.

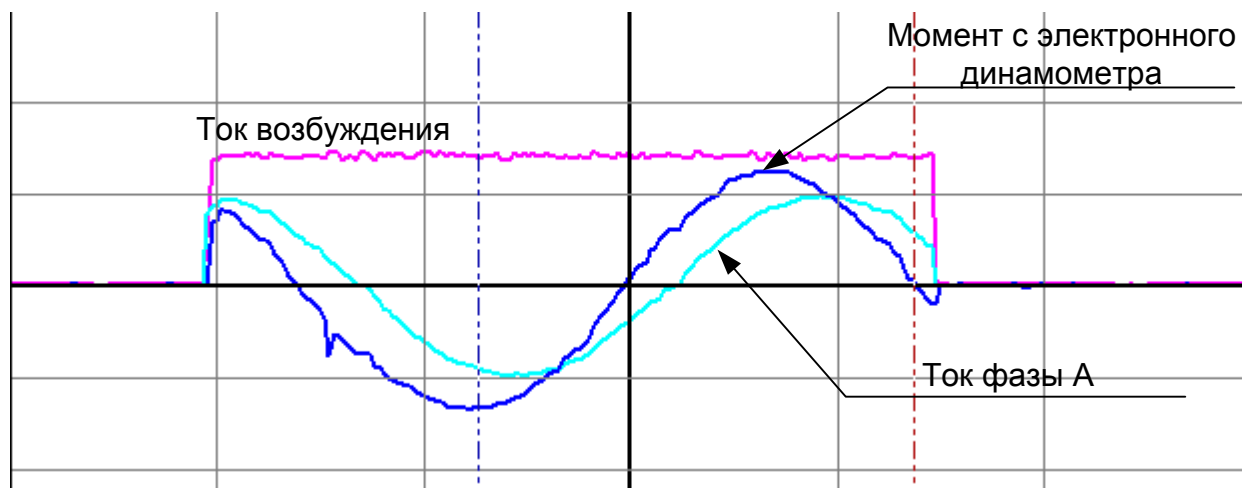


Рис. 5.11. Пример типовой осциллограммы, получаемой со стенда

В процессе эксперимента выяснилось, что некоторые графики моментов имеют явно выраженную несинусоидальность: в области больших токов статора и малом возбуждении, а также в области больших моментов. Пример несинусоидальности первого типа (при малых токах возбуждения и больших токах статора) показан на Рис. 5.12.

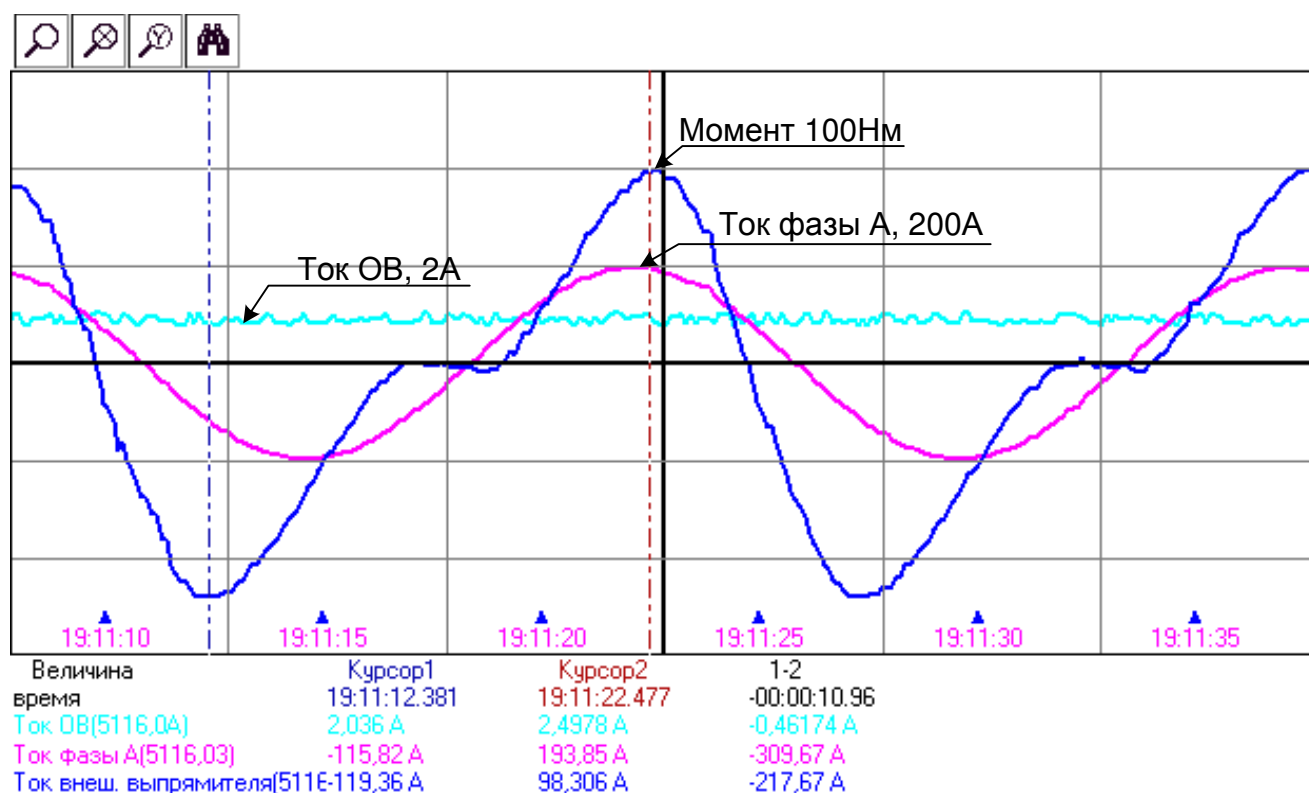


Рис. 5.12. Несинусоидальность графика момента при малых токах возбуждения и больших токах статора

На графике, во-первых, видна вторая гармоника момента, во-вторых, видно смещение всего графика момента в отрицательную область. Второй тип несинусоидальности (при больших уровнях момента) показан на Рис. 5.13.

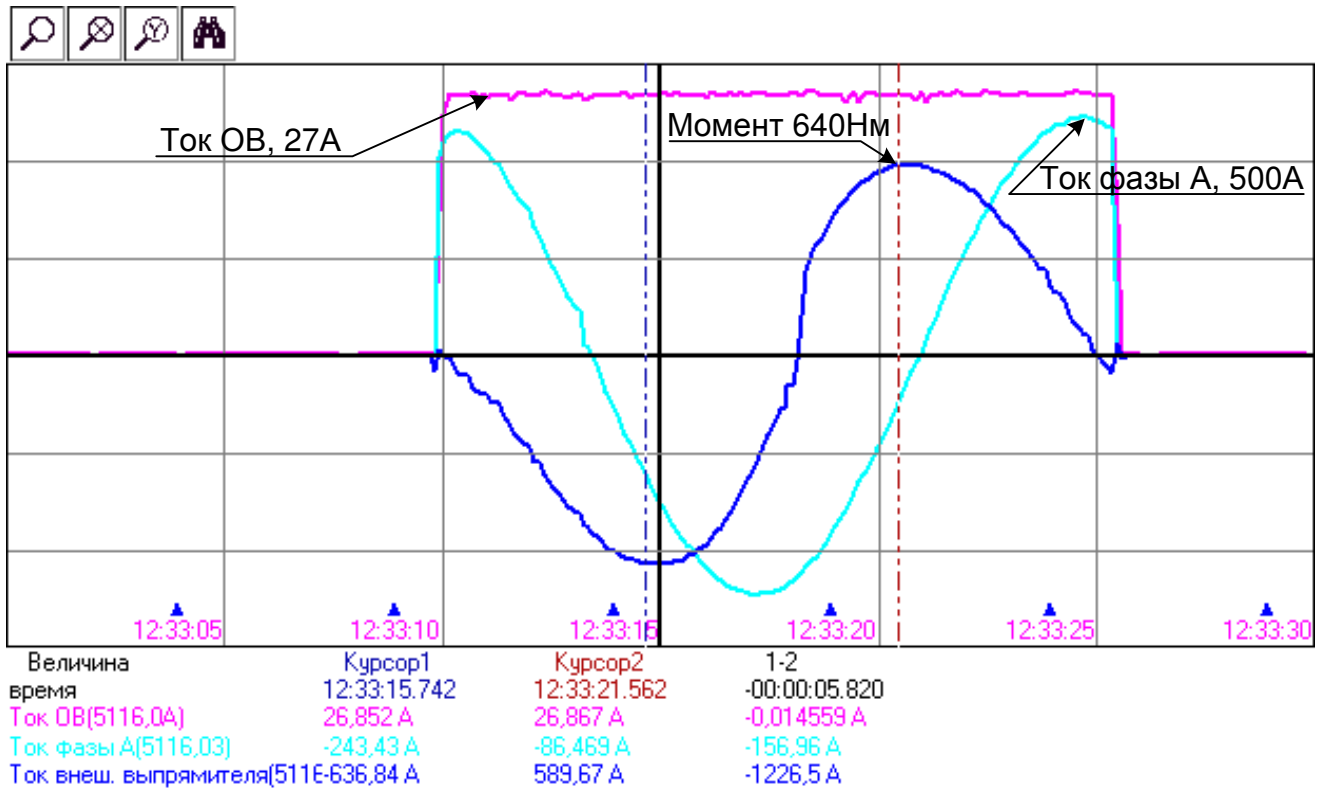


Рис. 5.13. Несинусоидальность при больших уровнях момента

Здесь несинусоидальность вызвана наличием люфта в стенде. Визуально при испытаниях было видно, что ротор двигателя не был неподвижен, а сдвигался при приложении большого момента приблизительно на 5 механических градусов.

В любом случае для каждого сочетания уставок токов статора и возбуждения записывалась и сохранялась осциллограмма полного периода момента: $13 \cdot 11 = 143$ осциллограммы.

Существует много возможностей по обработке этих данных. Если бы люфта в стенде не было, существовала бы возможность разложения каждого графика момента в ряд Фурье, выделения первой и второй гармоники, постоянной составляющей и последующий их анализ. В текущей же ситуации отличить искажения, вызванные люфтом стенда, от искажений,

вызванных второй гармоникой момента, не представляется возможным. С другой стороны, в большей части снятых данных наблюдались сравнительно синусоидальные кривые моментов, а искажения были или незначительны, или проявлялись в ненормальных диапазонах работы двигателя. Вследствие этого использовалась следующая схема обработки данных. Берется образцовая синусоидальная осциллограмма момента. Для нее фиксируется время (угол) между максимумом момента и пересечением графиком тока фазы А нуля. Так как векторная система управления будет настроена таким образом, что она будет обеспечивать одну и ту же фазу вектора тока относительно ротора, то можно сказать, что на большинстве осциллограмм будет реализован тот момент, который получается откладыванием данной временной установки от точки пересечения током фазы А нуля. Моменты, соответствующие этой точке, т.е. соответствующие моменту при векторном управлении, показаны в следующей таблице.

Стоит отметить, что для больших моментов и несинусоидальностью, вызванной люфтом в стенде, такой метод будет давать ошибку (некоторое занижение момента), так как угол между фазой кривой тока и фазой кривой момента изменяется при выборе люфта.

Таблица зависимости момента от тока статора и тока возбуждения

| | | Ток статора амплитудный, А | | | | | | | | | | | | |
|--------------------|-----|----------------------------|-------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | 0 | 10 | 20 | 50 | 100 | 150 | 200 | 250 | 300 | 350 | 400 | 450 | 500 |
| Ток возбуждения, А | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 1 | 0 | 4 | 7,5 | 18,5 | 33,5 | 36,5 | 47 | 54,5 | 43,5 | 44 | 45 | 40,5 | 43 |
| | 2 | 0 | 6 | 11,5 | 32 | 60,5 | 74,5 | 83 | 90 | 73,5 | 88 | 89,5 | 96 | 93 |
| | 3,5 | 0 | 8,5 | 20 | 48 | 88 | 115,5 | 130 | 137 | 144 | 143 | 145 | 147,5 | 146,5 |
| | 5 | 0 | 10 | 16 | 53 | 105 | 142 | 171 | 191 | 212 | 195 | 209 | 205 | 206,5 |
| | 7 | 0 | 11,5 | 23 | 58,5 | 117 | 166,5 | 210,5 | 246 | 270,5 | 288 | 303,5 | 314 | 324,5 |
| | 10 | 0 | 12,85 | 23,5 | 62,5 | 121 | 182 | 240 | 287,5 | 325 | 352 | 374 | 389 | 404 |
| | 14 | 0 | 12,5 | 25,5 | 67 | 127 | 192 | 251,5 | 310,5 | 358 | 406 | 441 | 466,5 | 492,5 |
| | 18 | 0 | 12,25 | 28 | 69,5 | 130,5 | 195 | 256 | 315 | 375 | 429,5 | 477,5 | 516,5 | 556 |
| | 24 | 0 | 13,3 | 26,5 | 70 | 131,5 | 196,5 | 259,5 | 320,5 | 383 | 442,5 | 499,5 | 549,5 | 599,5 |
| | 27 | 0 | 11,5 | 25,5 | 63 | 130,5 | 195,5 | 261 | 320,5 | 384 | 447 | 505 | 557,5 | 607,5 |

После снятия эксперимента дополнительно была проведена перекалибровка датчиков тока преобразователя, так как опытный момент

оказался заметно больше расчетного. Обнаружилась погрешность порядка 10% в калибровке датчика тока обмотки возбуждения. Точная таблица соответствия заданного тока ОВ и реального тока приведена ниже.

| | | | | | | | | | | | |
|--------------------|---|------|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|
| Ток ОВ заданный, А | 0 | 1 | 2 | 3,5 | 5 | 7 | 10 | 14 | 18 | 24 | 27 |
| Ток ОВ реальный, А | 0 | 1,15 | 2,3 | 4 | 5,6 | 7,8 | 11,1 | 15,6 | 19,8 | 26,4 | 29,8 |

Поверхность момента в векторной системе управления с учетом погрешности датчика ОВ приведена на Рис. 5.14.

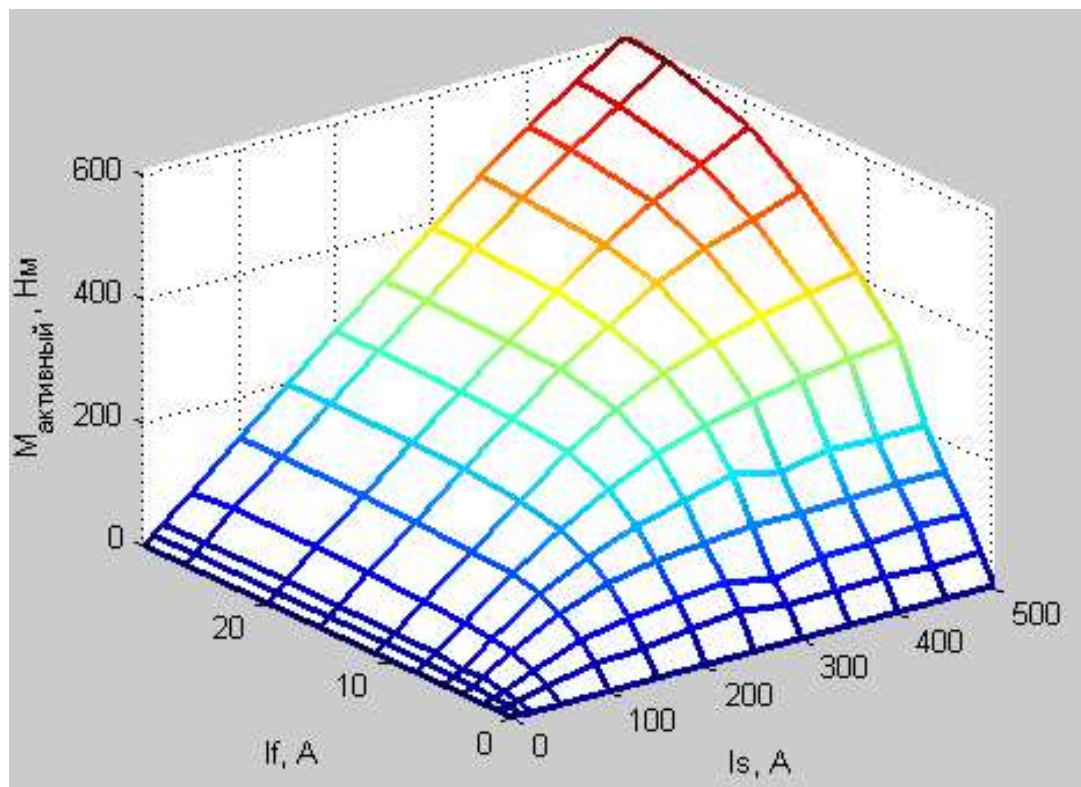


Рис. 5.14. Экспериментально полученная поверхность зависимости момента ВИД НВ от амплитуды тока статора I_s и тока возбуждения I_f при оптимальной фазе тока статора

Для оценки полученных опытных данных необходимо сравнить эту поверхность с расчетной, заложенной при проектировании машины. На Рис. 5.15 повторно показана расчетная поверхность момента.

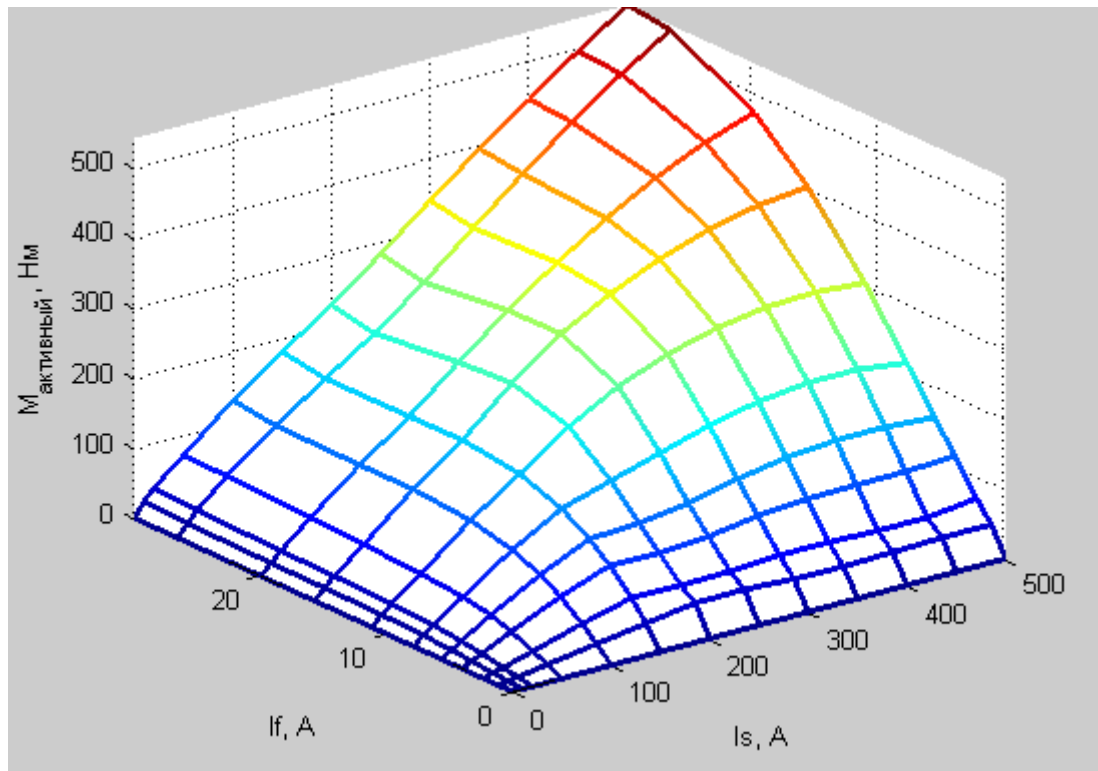


Рис. 5.15. Расчетная поверхность зависимости активного электромагнитного момента ВИД НВ от амплитуды тока статора I_s и тока возбуждения I_f при оптимальной фазе тока статора

Визуальный анализ сходства поверхностей затруднен, поэтому для сравнения удобно построить разницу поверхностей: вычесть одну из другой (Рис. 5.16).

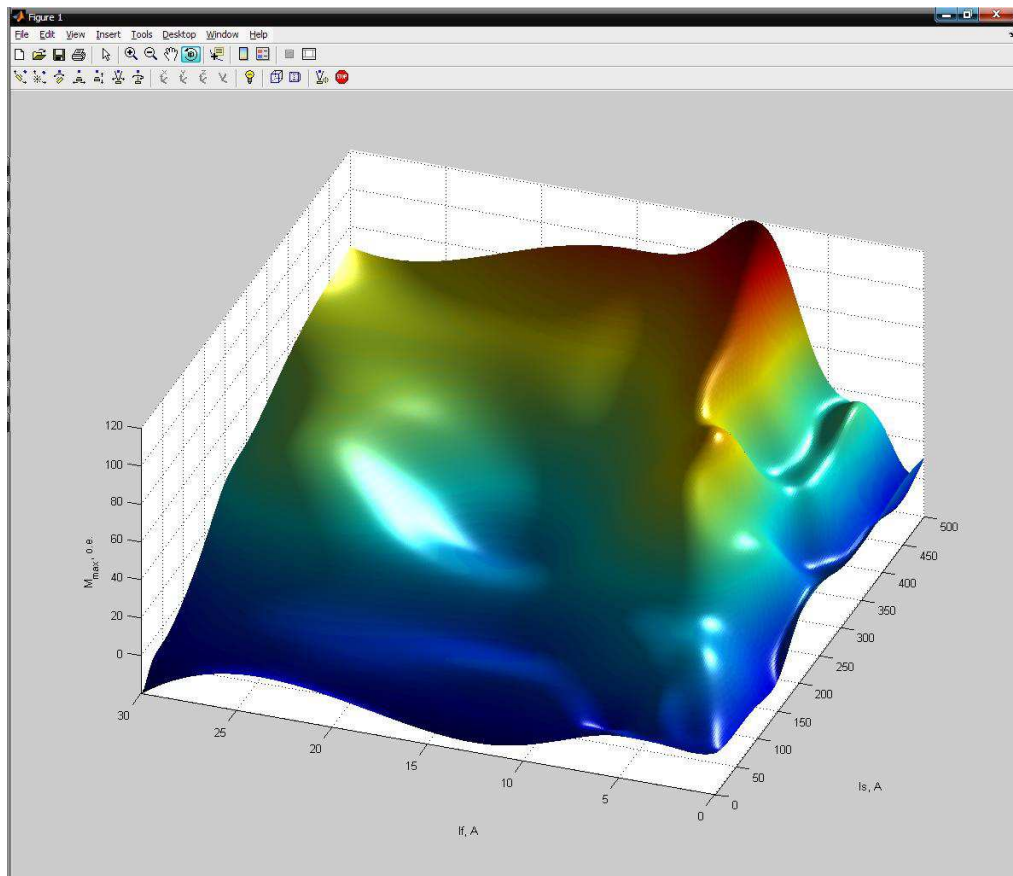


Рис. 5.16. Поверхность разницы (ошибки) опытного момента и расчетного.

Из анализа приведенной поверхности видно, что практически вся поверхность находится выше нуля, что говорит о том, что момент двигателя опытный оказался во всем диапазоне немного больше, чем расчетный. Так, максимальный экспериментальный момент при токе статора 500А и токе возбуждения 27А составил 550Нм, а расчетный 500Нм. Это может быть как следствие уменьшенного воздушного зазора машины по сравнению с проектным, так и из-за погрешности измерений в эксперименте. Интересно, что лучшее совпадение расчетного и экспериментального моментов проходит в зоне пропорционального изменения тока статора и тока возбуждения – т.е. в рабочей зоне. В области же большого тока статора и малого тока возбуждения расхождение наибольшее – там сильно проявляется реактивный момент двигателя. Вероятно, расхождение момента в той области проявляется из-за метода измерения – в расчете учитывался только активный момент привода, а в эксперименте снималась сумма реактивного и активного моментов при определенном угловом положении.

5.2.3 Проверка работы разработанной системы управления при работе двигателя на холостом ходе

Помимо приведенных испытаний на заторможенном роторе, проводилась также проверка работы двигателя на холостом ходе во всем диапазоне частот вращения, снятие шумовых и вибрационных показателей. Заодно этот же эксперимент проверял работоспособность и устойчивость разработанной системы управления на максимальных частотах вращения, а также проверялась работа блока ограничения максимальной частоты вращения. Замечено, что на частоте тока, подходящей к 500Гц устойчивость системы управления ухудшается – время отработки тока ПИ-регуляторами тока заметно возрастает, начинает влиять задержка на микропроцессорный расчет структуры управления, в результате чего преобразования координат (переход из неподвижных осей координат к подвижным и назад) начинают вносить фазовую ошибку. Однако более тонкой настройкой системы и программным учетом фазы ошибки при преобразовании координат удалось обеспечить приемлемую устойчивость на максимальной частоте вращения.

Еще одной проблемой оказался датчик положения ротора. Из-за особенностей расчета магнитной геометрии датчика, разной силы применяемых магнитов, а также допусков в изготовлении датчик положения оказался плохой точности. Для пояснения сути проблемы необходимо подробнее пояснить принцип функционирования датчика. Как было указано в разделе 2.4, ДПР состоит из трех дискретных элементов Холла, которые меняют свое выходное электрическое состояние в зависимости от положения ротора двигателя. На Рис. 5.17 показаны временные диаграммы работы датчика. Из дискретных сигналов, поступающих на вход контроллера преобразователя, программным драйвером формируется дискретное значение углового положения с шагом в 60 градусов. На основе этого углового положения и текущей частоты вращения формируется экстраполированное значение углового положения, непрерывное на электрическом периоде

двигателя. Именно это значение используется далее для векторной системы управления.

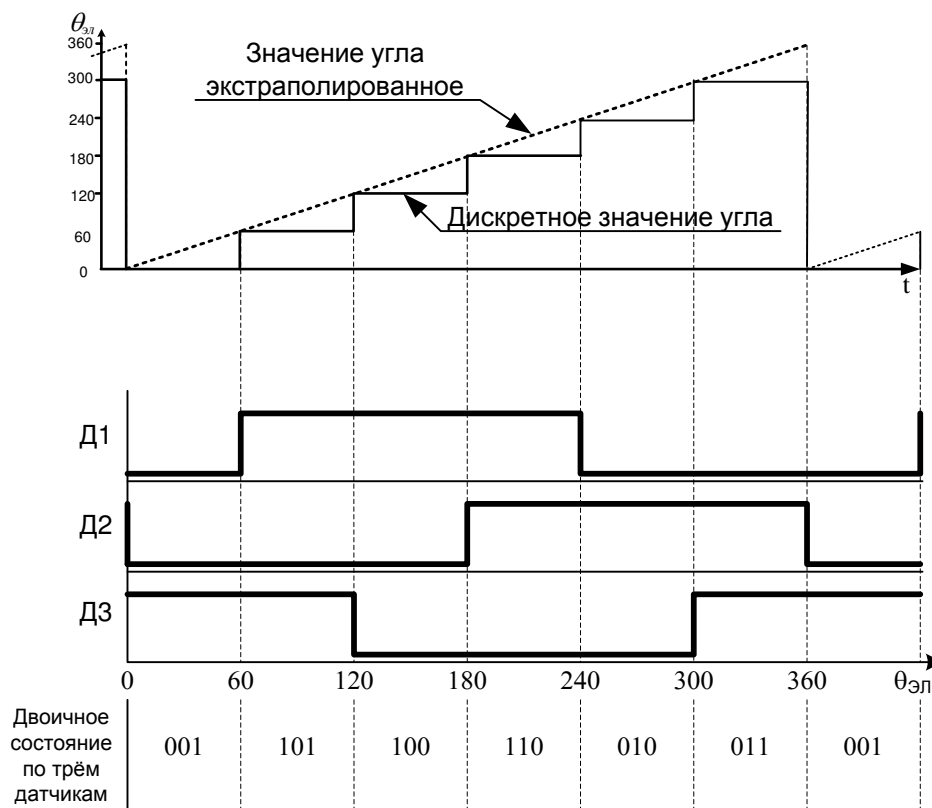


Рис. 5.17. Временные диаграммы работы датчика положения ротора. Снизу: срабатывание дискретных датчиков Холла. Сверху: Формируемое программным драйвером ДПР дискретное значение углового положения и экстраполированное значение углового положения.

Снятая экспериментально осциллограмма дискретного значения углового положения показана на Рис. 5.18.

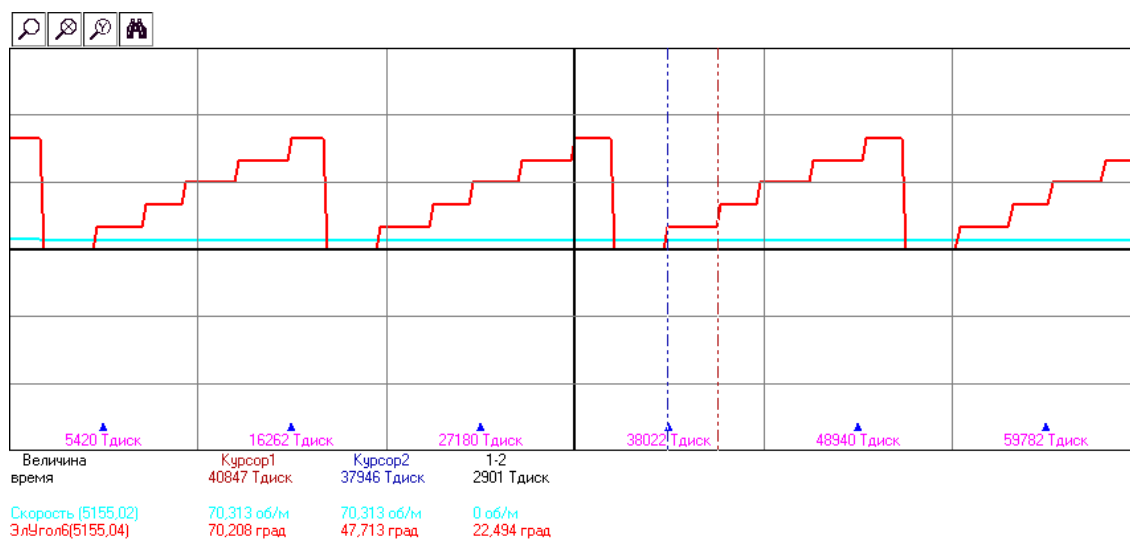


Рис. 5.18. Экспериментально полученная осциллограмма дискретного углового положения с ДПР

По осциллограмме невооруженным глазом видна непропорциональность ширины площадок, соответствующая разным угловым положениям, несмотря на постоянную частоту вращения. Так, значение углового положения 60 градусов (выделено курсорами) держится почти в два раза дольше, чем следующее за ним значение 120 градусов. Это говорит о неточности следования дискретных импульсов с датчика положения. Данные искажения приводили к заметному ухудшению формы тока статора при работе векторной системы управления - Рис. 5.19.

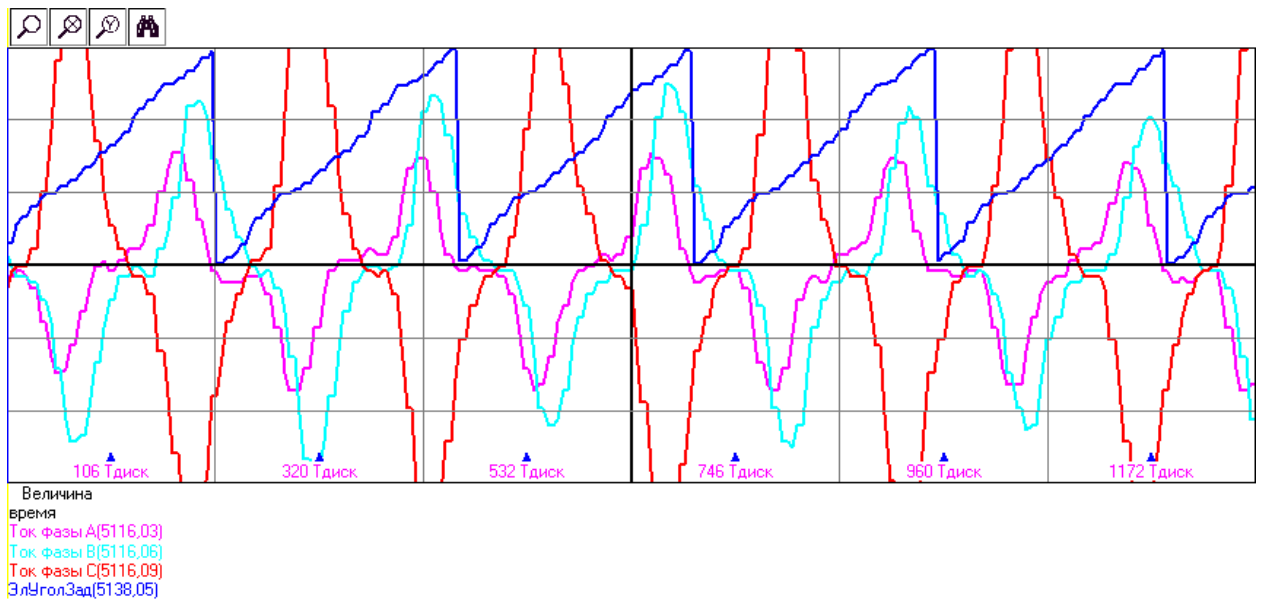


Рис. 5.19. Экстраполированное значение углового положения, формируемое драйвером ДПР на основе сигналов датчика и форма токов векторной системы управления

На осциллограмме показано экстраполированное значение углового положения при работе двигателя на 5000 об/мин, а также протекающие при этом токи фаз. Из-за неточности дискретных сигналов датчика положения экстраполированное значение также имеет заметную нелинейность, что приводит к очень сильному отклонению формы токов фаз от синусоидальной формы. Кроме того, иногда вследствие помех контроллер преобразователя фиксировал ложные короткие переключения датчика положения – ложные импульсы по какому-либо из каналов датчика положения. Это также приводило к «всплеску» токов фаз, пульсациям.

Решением является программная фильтрация углового положения датчика перед вводом его сигнала в векторную систему управления. Однако

использование обычного фильтра первого порядка в виде инерционного звена невозможна – такой фильтр будет давать заметную фазовую задержку, в результате чего поступающий в векторную систему управления угол будет сильно отличаться от реального. И чем выше частота вращения, тем это отличие будет сильнее. Выходом является применение программного синусно-косинусного фильтра Калмана, примеры использования которого показаны в [5, 27, 29]. От требующего фильтрации экстраполированного углового положения вычисляется значение синуса и косинуса, после чего эти значения вводятся в фильтр в качестве входных сигналов. На основе этих данных внутренняя структура фильтра пытается оценить текущую частоту вращения, а на основе нее формирует на выходе фильтра свое собственное «оцениваемое» угловое положение ротора, которое лишь косвенно связано с поступающими на вход сигналами. Фильтр пытается совместить фазу своего выходного углового значения с фазой поступающего. При соответствующей постоянной времени фильтра (а точнее при правильной настройке его матриц) его выходной сигнал совпадает по фазе с первой гармоникой входного сигнала, а все остальные изменения фазы и помехи на выход фильтра не проходят. Таким образом, фильтр обеспечивает качественную фильтрацию углового положения от нелинейностей и помех, при этом не внося фазовой задержки в статическом режиме работы. Такой фильтр был внедрен в систему управления приводом на основе материалов работы [5], после чего получена следующая осциллограмма при работе двигателя в точке 5000 об/мин (Рис. 5.20).

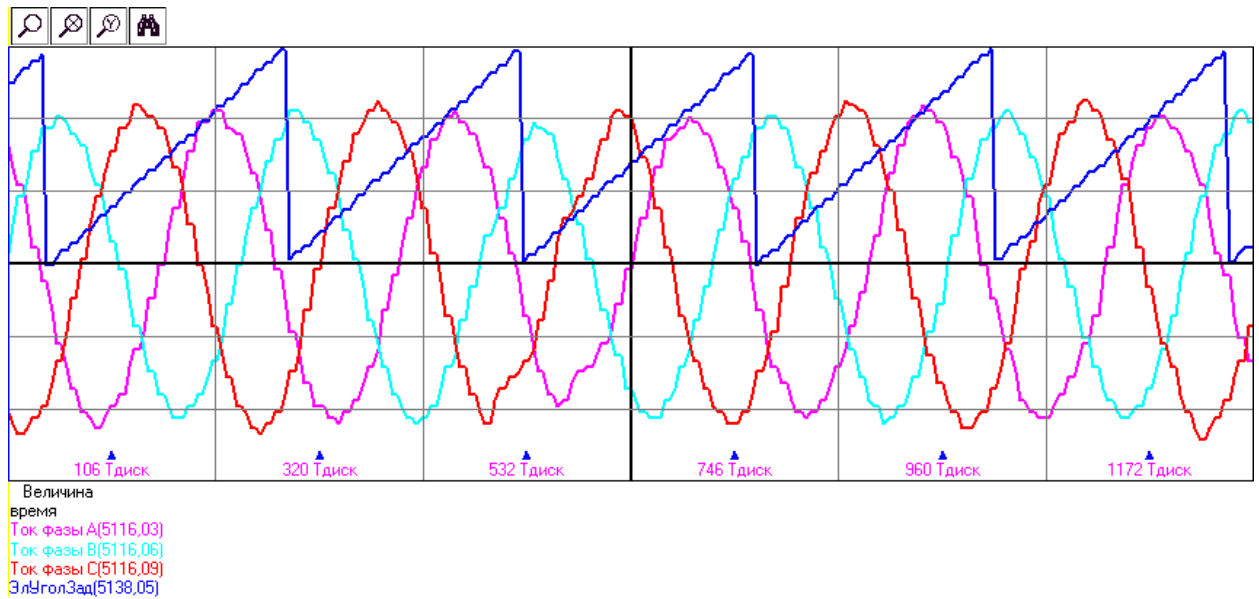


Рис. 5.20. Значение углового положения с выхода синусно-косинусного фильтра Калмана и форма токов векторной системы управления

Из осциллограммы видно, что форма тока фаз значительно улучшилась и стала очень близка к синусоидальной.

Недостатком применения такого фильтра является появление некоторой фазовой задержки в выходном сигнале относительно входного при быстром изменении частоты входного сигнала (при быстром разгоне двигателя), так как фильтру требуется время для перестройки на новую частоту сигнала. Кроме того, такой фильтр очень затратен в вычислительном плане, требуется производительный микроконтроллер для возможности применения такого фильтра, а также значительная общая оптимизация ПО. Однако в данном случае применение этого фильтра видится единственным выходом.

5.2.4 Эксперимент по измерению времени спада магнитного поля возбуждения

В процессе испытаний была также замечена интересная особенность двигателя. Поле возбуждения двигателя, несмотря на быстрое падение тока возбуждения, спадает очень долго. Это было проверено следующим экспериментом: двигатель разгоняется при работе на холостом ходе на фиксированную частоту вращения, ток возбуждения принудительно фиксируется на определенном уровне (например, 4А), после чего инвертор напряжения и возбудитель выключается. В результате размыкания всех IGBT

ключей токи (и статора, и возбуждения) спадают с максимальным темпом (расфорсировка с приложением напряжения $-U$), при этом датчиками напряжения статора, установленными в преобразователе, снимается осциллограмма ЭДС машины. Время спадания ЭДС машины определяет время спадания поля возбуждения. Такая осциллограмма приведена на Рис. 5.21.

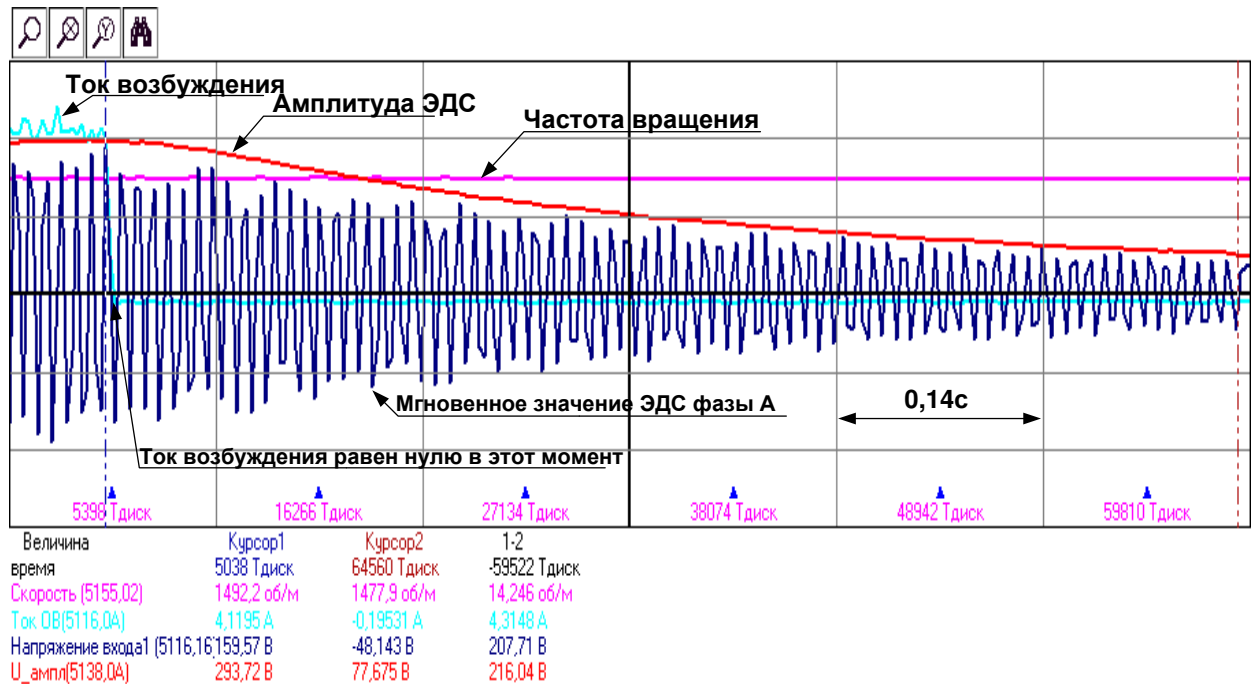


Рис. 5.21. Осциллограмма спадающего поля машины и тока возбуждения

На осциллограмме показан ток возбуждения, частота вращения двигателя, мгновенное значение ЭДС фазы А, полученное с датчиков напряжения статора, а также вычисляемая программно на основе этого напряжения амплитуда ЭДС двигателя. В начале осциллограммы двигатель был запитан и вращался на холостом ходе при работе от преобразователя. Ток возбуждения составлял около 4А. Далее, в момент времени, показанный курсором, преобразователь был отключен. Ток возбуждения спадает практически мгновенно (не дольше 10мс), а вот ЭДС машины не успевает упасть до установившегося значения вплоть до конца осциллограммы (0.7 секунды). При этом частота вращения двигателя остается постоянной, т.е. медленное спадание ЭДС вызвано электромагнитными процессами в машине, а не снижением частоты вращения.

После консультации с конструкторами двигателя было выдвинуто предположение, что такое долгое спадание ЭДС машины вызвано наличием в контуре возбуждения вихревых токов. При увеличении или уменьшении потока возбуждения в стальном нешихтованном корпусе машины, а также в вале ротора возникают вихревые токи, препятствующие изменению потока возбуждения. На Рис. 5.22 стрелками схематично показаны контуры протекания вихревых токов.

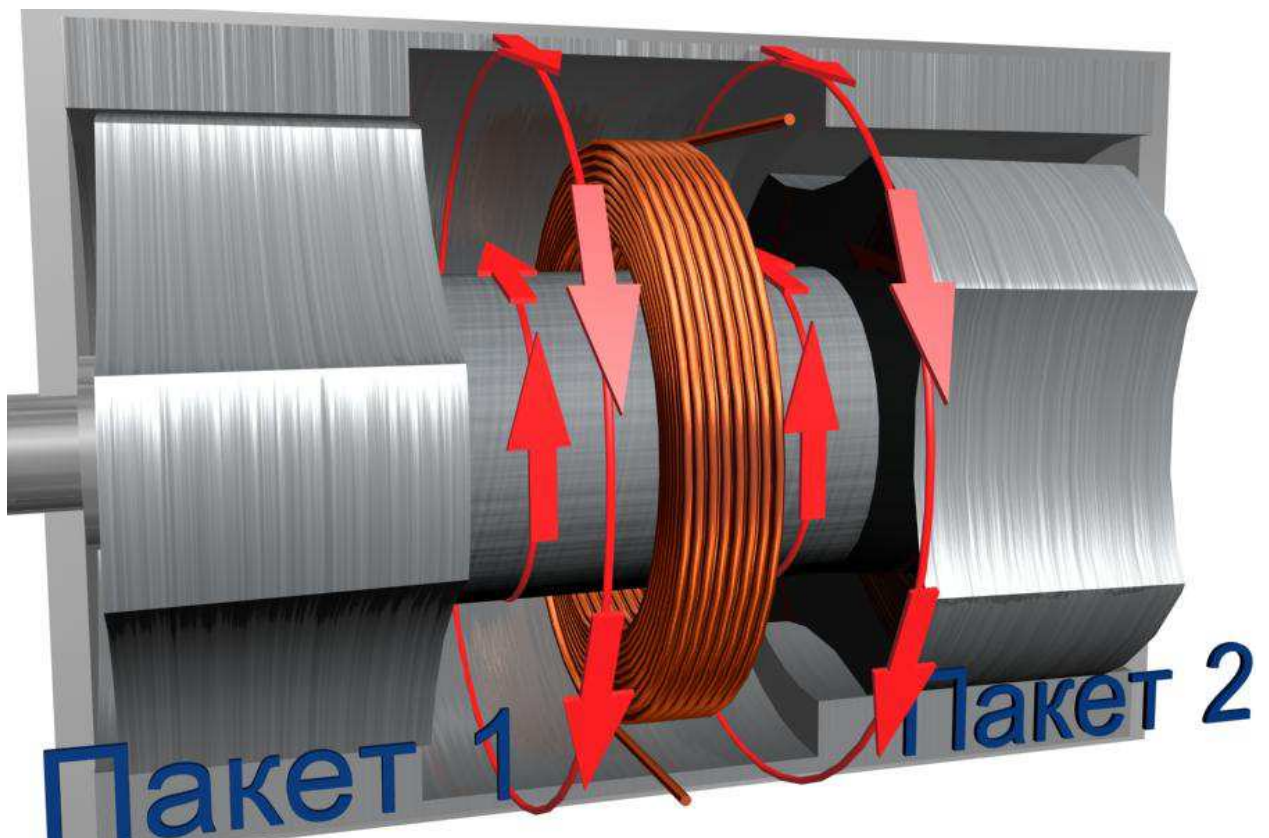


Рис. 5.22. Пути протекания вихревого тока при изменении потока возбуждения машины

Для косвенного подтверждения этого предположения была снята еще одна осциллограмма, показывающая нарастание тока возбуждения при подаче фиксированного напряжения на обмотку при разомкнутых фазах двигателя.

модели в других целях – например, для моделирования электротрансмиссии и транспортного средства целиком. Учет вихревого тока в модели двигателя был приведен в разделе 3.2.

Вывод. Несмотря на невысокую динамику нарастания момента ВИД НВ, общие ожидания оправдались: двигатель развивает расчетный момент, кривая холостого хода, короткого замыкания, зависимость момента от уровня токов близки к расчетным. Это позволяет сделать уверенный прогноз, что двигатель обеспечивает требуемую тяговую характеристику и пригоден для тягового применения. По результатам испытания выявлено, что система управления требовала доработки – модуля фильтрации сигнала датчика положения ротора, что было сделано и проверено на месте испытаний. В том объеме испытаний, что были проведены, спроектированная система управления и программное обеспечение работали устойчиво, что позволяет рассчитывать на их работу и в дальнейшем. К сожалению, в отсутствие стенда с нагрузочной машиной полные испытания системы управления и двигателя под нагрузкой в лабораторных условиях провести невозможно.

5.3 Испытания электротрансмиссии с двигателями ВИД НВ на макете транспортного средства

После успешных испытаний тяговых двигателей, их преобразователей и системы управления заказчиком было принято решение монтировать опытные образцы двигателей и преобразователей на макете транспортного средства. Макет представляет собой 8-ми колесное транспортное средство на базе БТР-90 - Рис. 5.24.



Рис. 5.24. Внешний вид макета транспортного средства, на котором испытывалась разработанная электротрансмиссия

Испытанные тяговые мотор-редукторы установлены вместо штатных угловых редукторов на борту машины. Ходовая часть осталась без изменений от БТР-90. Полная масса машины составила 22т. На макетном образце установлен дизельный двигатель ЯМЗ 650, мощностью 412 л.с. (300 кВт), который приводит во вращение вентильно-индукторный генератор с независимым возбуждением аналогичной мощности. Генератор имеет 3 секции по 3 фазы, т.е. 9 фаз, обмотки сосредоточенные. Одна из секций подключена к звену постоянного тока через неуправляемый выпрямитель, две другие через преобразователи с инверторами для обеспечения двигательного режима генератора (для задач торможения двигателем и запуска ДВС). Также макет имеет батарею на напряжение 300-500В из 12ти блоков молекулярных накопителей, емкостью 470Ф каждый и преобразователь накопителя, выполненного по схеме DC/DC мощностью 80кВт. Управлением трансмиссией в целом занимается контроллер верхнего уровня. Его задачи – включение/отключение всех устройств, обработка органов управления водителя, задание моментов на тяговые двигатели с

обеспечением функций антипробусковочной и антиблокировочной систем. Тормозные резисторы на макете не установлены. Номинальное напряжение звена постоянного тока 540В. Кроме описанных выше устройств, к звену постоянного тока подключены преобразователи вентиляторов охлаждения, работающих от 380В 50Гц. На Рис. 5.25 графически показана схема электротрансмиссии (гибридной трансмиссии) макетного образца.

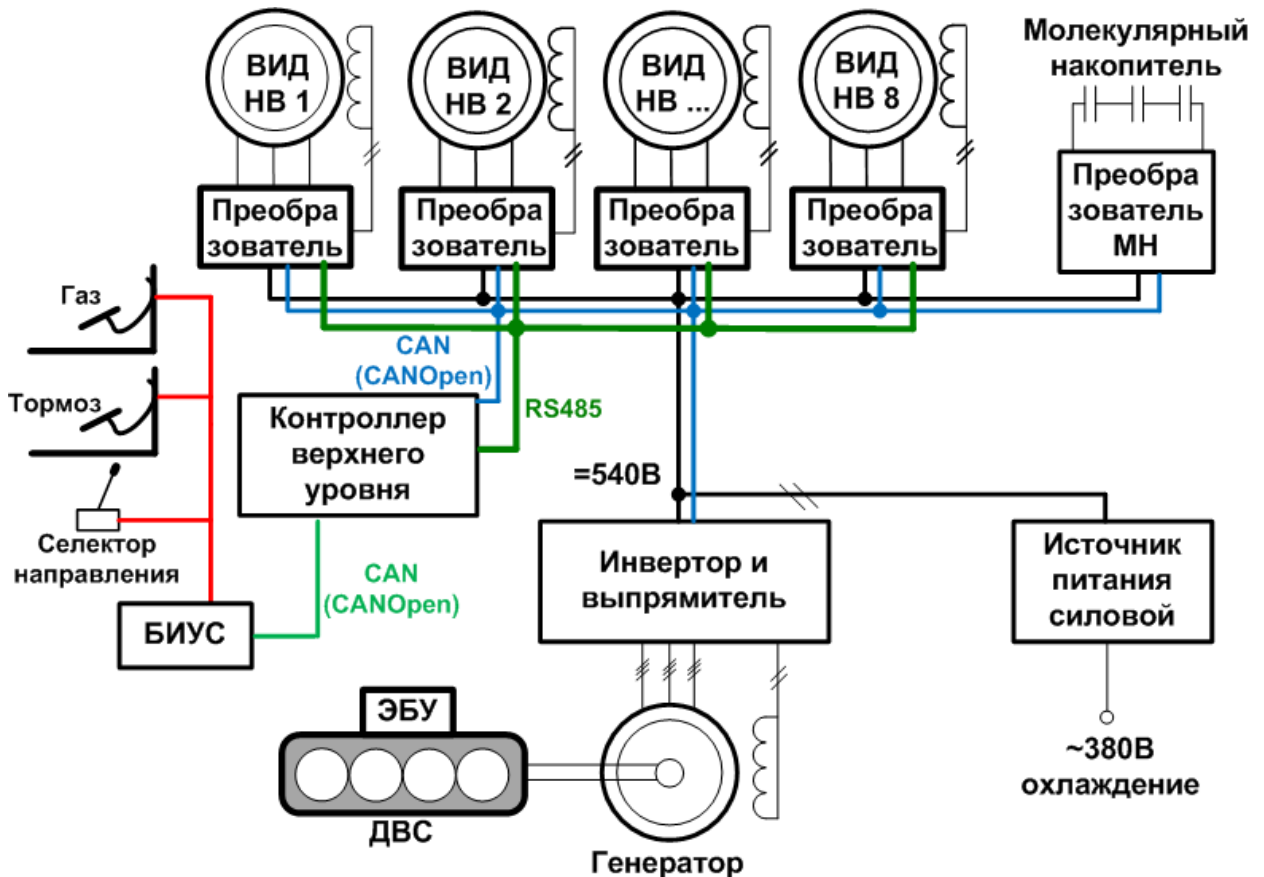


Рис. 5.25. Схема электротрансмиссии (гибридной трансмиссии) макетного образца

Макетное транспортное средство использовалось для отладки системы управления электротрансмиссией, проверки правильности заложенных при проектировании всей системы идей. Результатом испытаний должна стать проверка требований ТЗ – преодоление подъема 30 градусов, разгон до скорости не менее 90 км/ч, проверка режима электрического торможения, тихого хода при движении от молекулярных накопителей и т.п.

Отладка программного обеспечения и настройка параметров заняла достаточно долгое время из-за множества различных режимов работы, несмотря на помощь разработанных средств для осциллографирования и

параметрирования преобразователей по сети CAN. Сложность представляли настройка регуляторов всех преобразователей на достаточное быстродействие, устранение появляющихся в переходных режимах автоколебаний, отладка режима пуска ДВС от генератора и накопителя, автоматический переход генератора в режим «торможения дизелем» и обратно при движении, отладка алгоритма совместного управления генератором, дизелем и накопителем, отладка противобуксовочной и антиблокировочной систем и т.п. Доработки ПО тяговых двигателей по сравнению с уже описанным в данной работе практически не потребовалось, за исключением видоизменения сетевого обмена между двигателями и контроллером верхнего уровня, а также исправления некоторых ошибок программного характера.

Испытания макетного образца прошли успешно:

- Макетный образец удалось разогнать до скорости 97км/ч на бетонной трассе аэродрома.
- Проверены все алгоритмы управления: езда «от молекулярного накопителя», запуск ДВС от генератора, режим «торможения дизелем», накопление энергии торможения в молекулярный накопитель, разворот машины на месте по-танковому.
- Измерена топливная экономичность.
- Преодолен подъем 30 градусов на бетонном покрытии (фотография Рис. 5.26).
- Проверена работа интеллектуальных систем помощи водителю АБС и ПБС.



Рис. 5.26. Преодоление макетным образцом подъема 30 градусов

ПО для преобразователей тяговых двигателей и генератора разрабатывал автор данной работы, ПО преобразователя молекулярного накопителя и контроллера верхнего уровня разрабатывали коллеги в соответствии с алгоритмами согласованной работы устройств. Алгоритмы управления генератором не рассмотрены в данной работе, так как не представляют большого научного интереса: работа в генераторном режиме обеспечивается пропорциональным регулятором, управляющим током обмотки возбуждения, а двигательный режим генератора использует векторную систему управления, аналогичную используемой в двигателях и уже подробно рассмотренную.

На Рис. 5.27 показана осциллограмма разгона макетного образца до 60 км/ч и последующее электрическое и механическое торможение. Осциллограмма получена программным путем при помощи разработанного ПО для персонального компьютера.

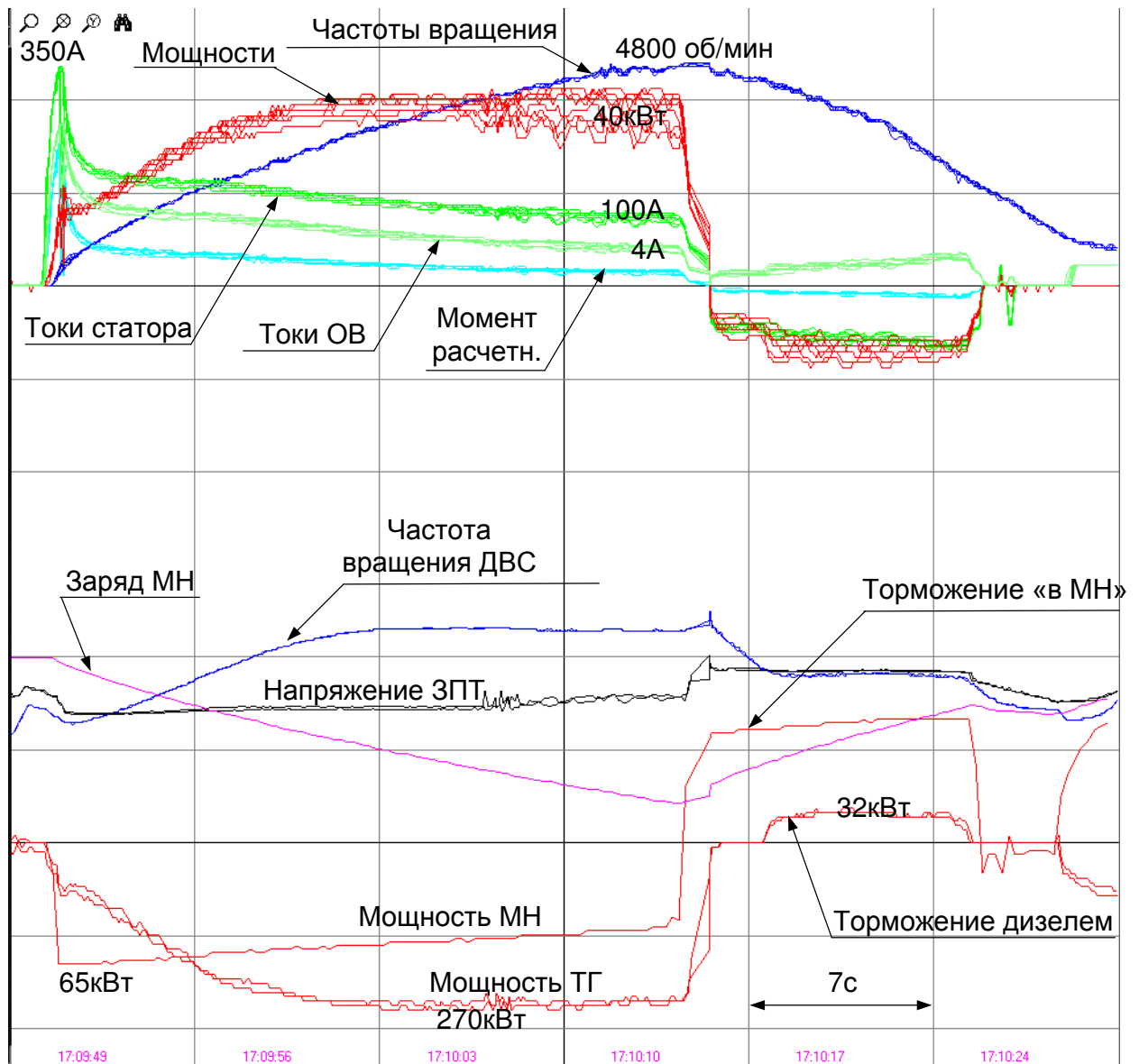


Рис. 5.27. Осциллограмма разгона макетного образца до 60 км/ч и последующее электрическое торможение

На осциллограмме в верхней части приведены частоты вращения тяговых двигателей, мощности, токи статора и возбуждения, текущий момент. При этом графики всех 8-ми двигателей наложены друг на друга. На нижней части осциллограммы приведена частота вращения ДВС, заряд молекулярного накопителя в процентах, напряжение на звене постоянного тока, мощность молекулярного накопителя, мощность тягового генератора.

При разгоне мощности накопителя и генератора отрицательны, что говорит об отдаче ими энергии, а мощность двигателей положительна, что говорит о потреблении энергии. Мощность накопителя составляла 65 кВт, генератора 265-270 кВт. При торможении знаки мощности меняются –

двигатели отдают энергию, накопитель и генератор принимают энергию. При этом накопитель мгновенно переходит из режима отдачи энергии в режим приема, а генератор, из-за инерционности контура возбуждения, сначала плавно снижает отдаваемую мощность, затем происходит пауза, за время которой поток возбуждения генератора снижается до уровня, необходимого для двигательного режима, а затем уже обе секции генератора переходят в двигательный режим. При этом мощность приема энергии накопителем составляет 65 кВт, а каждой из секций генератора 16кВт, что дает 32 кВт рассеиваемой в ДВС мощности.

В данной осциллограмме комплексно продемонстрирована работа всей электротрансмиссии:

- Пропорциональное изменение тока статора и тока возбуждения тяговых двигателей. Так, в начале разгона при трогании амплитудное значение тока статора составляло 350А, тока возбуждения 15А. При последующем разгоне ток статора упал до 100А, ток ОВ до 4А.
- Автоматическое снижение момента двигателей при снижении напряжения в звене постоянного тока. Это позволяет двигателям всегда отбирать всю доступную мощность, а напряжению находиться в допустимом диапазоне. В самом начале разгона при трогании с места напряжение в звене постоянного тока «просело» с 540 до 510В и сохранялось на данном уровне в процессе всего разгона, при этом генератор повышал свою мощность с разгоном ДВС.
- Автоматическое снижение момента двигателей при повышении напряжения в звене постоянного тока. После окончания разгона водитель применил электрическое торможение, в результате чего напряжение в звене постоянного тока поднялось до 600В за счет рекуперации тяговыми двигателями и ограничивалось на этом уровне алгоритмами управления тяговыми двигателями. При этом молекулярный накопитель и генератор, работая в двигательном

режиме, забирали такую мощность, которую имели возможность забрать.

- На осциллограмме графики всех восьми тяговых двигателей наложены друг на друга. Видно, что с определенной долей погрешности кривые совпадают, как по токам, так и по мощности, что говорит о единой настройке преобразователей, датчиков положения двигателей – нет заметного разброса параметров от экземпляра к экземпляру.
- Также по осциллограмме можно проследить за автоматической работой генератора, молекулярного накопителя. Они автоматически переходили из режима отдачи энергии в режим приема энергии, изменяли свою мощность в соответствии с разработанными алгоритмами согласованной работы устройств по напряжению звена постоянного тока.
- При разгоне видно автоматическое управление частотой вращения ДВС в зависимости от текущей нагрузки генератора, однако этот алгоритм не входит в тему данной работы и не рассматривается.

Несмотря на то, что тяговая характеристика двигателя не снималась с использованием датчика момента, её можно построить косвенным путем, используя данные ходовых испытаний. Зная потребляемую двигателем мощность (фиксируют силовые преобразователи), частоту вращения и расчетный КПД двигателя можно построить тяговую характеристику и сравнить её с расчетной. Точка с нулевой частотой вращения и максимальным моментом получена из стендовых испытаний двигателя с заторможенным ротором с учетом увеличенного в ходовых экспериментах током статора (пояснено ниже, в разделе 5.3.1). На Рис. 5.28 показана таким образом построенная экспериментальная характеристика в сравнении с расчетной заданной тяговой характеристикой.

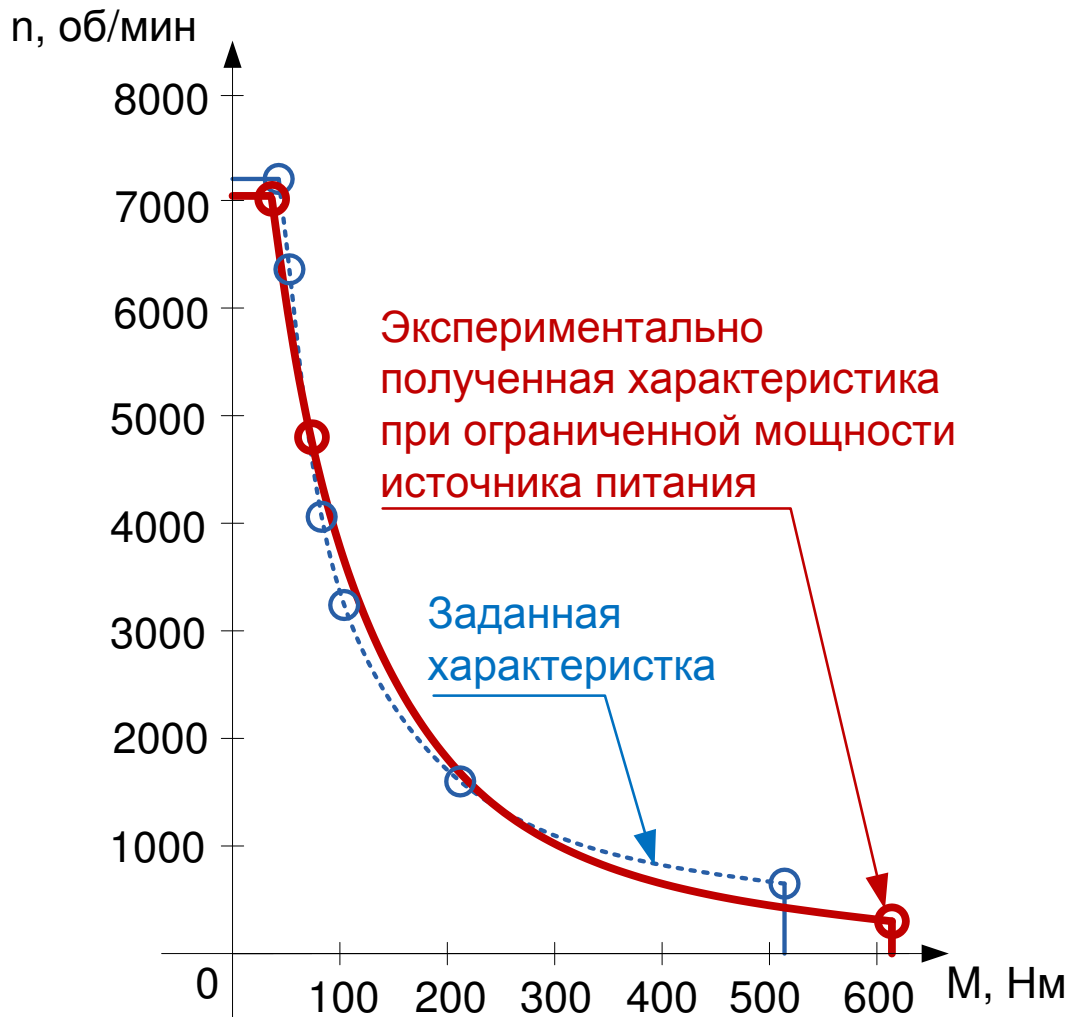


Рис. 5.28. Экспериментально полученная тяговая характеристика ВИД НВ 35кВт при питании от источника ограниченной мощности в сравнении с заданной

Следует отметить, что экспериментальная тяговая характеристика ограничена мощностью источника питания. Так, максимальная мощность дизель-генератора составила по результатам экспериментов 270кВт, молекулярного накопителя 65кВт, что в сумме дает 335кВт мощности. Таким образом, на вход каждого преобразователя двигателя приходится около 40кВт. Расчетный КПД двигателя меняется от 0.55 до 0.95 для низкой и высокой частоты вращения соответственно, КПД преобразователя составляет около 0.97 на всех частотах вращения. Поэтому на низкой частоте вращения экспериментальная кривая проходит ниже расчетной (вследствие больших потерь), на средней частоте (где КПД хороший) проходит немного выше, а на максимальной частоте снова опускается ниже расчетной, так как когда

макетный образец разгонялся до максимальной скорости, молекулярный накопитель разряжался и прекращал отдавать энергию.

Помимо успешных результатов экспериментов выявились и слабые стороны, описанные далее.

5.3.1 Необходимость большего тягового момента для преодоления подъема 30 градусов

Проектный максимальный момент для тяговых двигателей выбирался исходя из требований ТЗ по преодолению макетным образцом транспортного средства 30-ти градусного подъема на бетонном покрытии. Так как транспортное средство при подъеме находится под уклоном, то задние колеса находятся в гораздо более сильном зацеплении с покрытием дороги, чем передние. Вследствие этого при выборе требований к максимальному моменту двигателей должно учитываться возможное буксование передних колес из-за плохого сцепления, в результате чего основную нагрузку по подъему берут задние колеса. Такое ухудшение сцепления было учтено, но недостаточно: при максимальном проектном моменте на двигателях 522Нм макетный образец не мог преодолеть подъем 30 градусов: передние четыре колеса буксовали, в результате чего суммарного общего момента для подъема оказалось недостаточно. Однако преобразователи и двигатели были спроектированы с запасом: для успешного подъема максимальный амплитудный ток статора был увеличен сверх номинального с 550А до 600А, а ток возбуждения с 27А до 30А. Каким при этом оказался результирующий момент можно сказать только при детальном пересчете характеристик тягового двигателя конструкторами двигателя, однако приблизительно можно рассчитать увеличение момента по следующей линейной формуле:

$$M = \left(\frac{600 - 550}{550} + \frac{30 - 27}{27} \right) \cdot 100\% = 20\%$$

Максимальный момент двигателя, соответствующий 100%:

$$M_{\text{max}} = M_{\text{расчетный}} \cdot 1.2 = 522 \cdot 1.2 = 626 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Если в данном расчете учитывать не проектный максимальный момент 522Нм, а экспериментально полученный, то максимальный момент после увеличения токов уже приближается к 700Нм.

Такого момента стало достаточно для преодоления подъема 30 градусов. Интересно при этом рассмотреть осциллограмму уровней текущего момента на колесах и частоты вращения тяговых двигателей при подъеме. На Рис. 5.29 и Рис. 5.30 показаны текущие моменты тяговых двигателей по время преодоления подъема, измеряемые в процентах, где за 100% принят максимальный момент, приведенный выше. На первом графике друг на друга наложены графики моментов передних четырех двигателей (первые две «оси»), а на втором задних четыре двигателя (задние две «оси»). Момент на двигателе получен расчетным путем от системы управления согласно структуре, показанной на Рис. 2.7. Началу подъема соответствует время 7-й секунды графика, в момент времени 24-й секунды был достигнут край подъема и передние колеса вывесились, вследствие чего момент на них упал (ТД1 и ТД2). В результате этого вторая ось (ТД3 и ТД4) приняла на себя полный момент, а на 27-й секунде вывесились и потеряли сцепление уже два задних колеса (ТД7 и ТД8), после чего макетный образец преодолел край подъема.

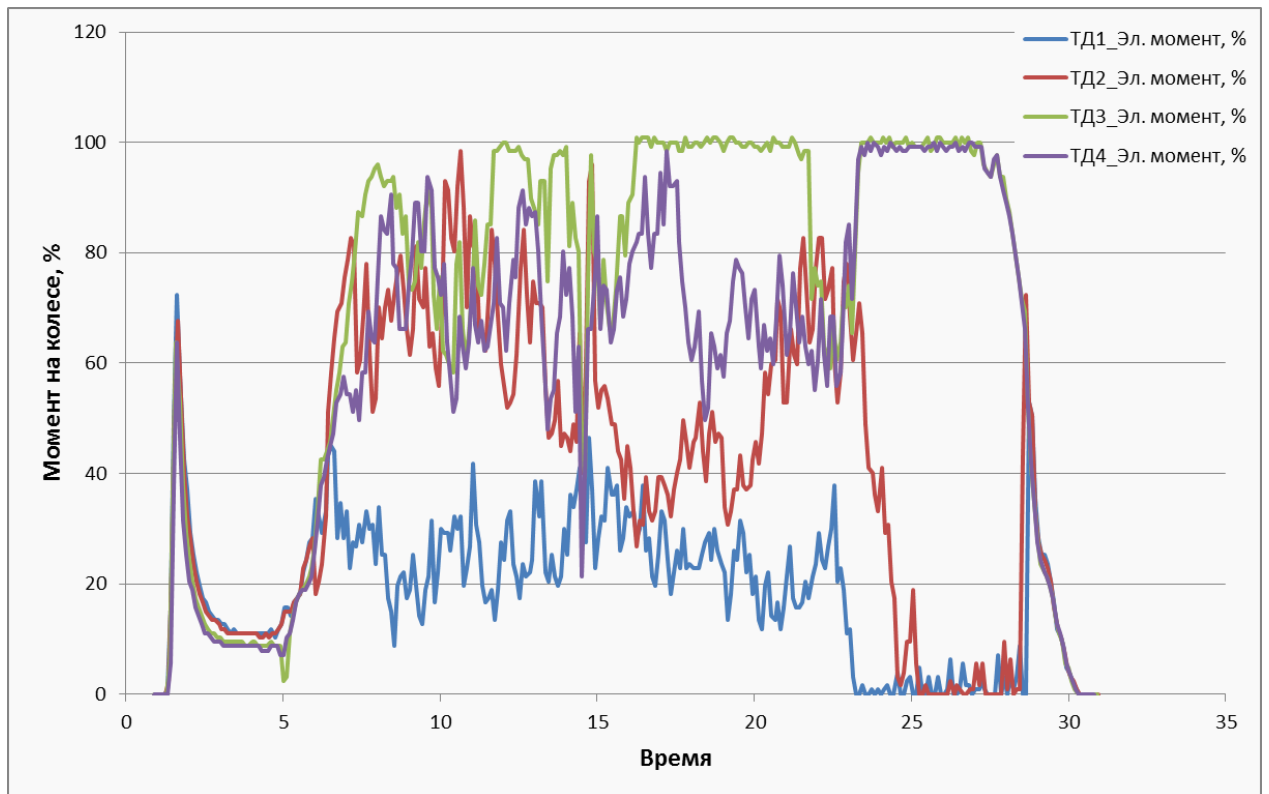


Рис. 5.29. Момент на передних четырех тяговых двигателях в процентах во время преодоления подъема 30 градусов

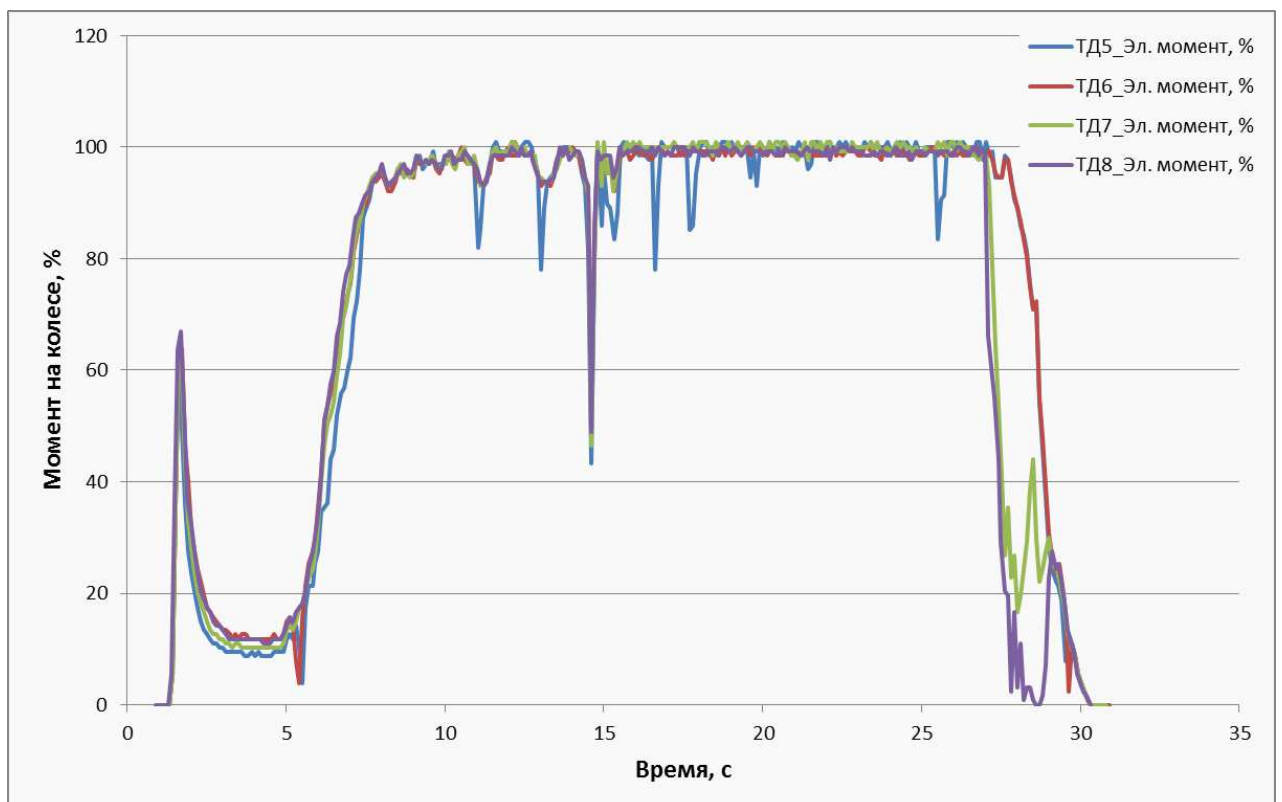


Рис. 5.30. Момент на задних четырех тяговых двигателях в процентах во время преодоления подъема 30 градусов

Пульсирующий вид момента буксующих колес связан с работой противобуксовочной системы, реализованной контроллером верхнего уровня. Противобуксовочная система снижала задание момента на колесе, пытаясь удерживать каждое колесо на грани зацепления, чтобы реализовать из текущего сцепления с дорогой максимальную тягу. Из графика моментов колес приблизительно можно оценить средний момент на каждом колесе в процентах и свести моменты в таблицу:

| ТД1 | ТД2 | ТД3 | ТД4 | ТД5 | ТД6 | ТД7 | ТД8 |
|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|
| 25% | 50% | 80% | 70% | 100% | 100% | 100% | 100% |

Чтобы не приводить соответствия принятых номеров двигателей с расположением их в машине, покажем получившийся средний момент по осям при подъеме на фотографии – Рис. 5.31.

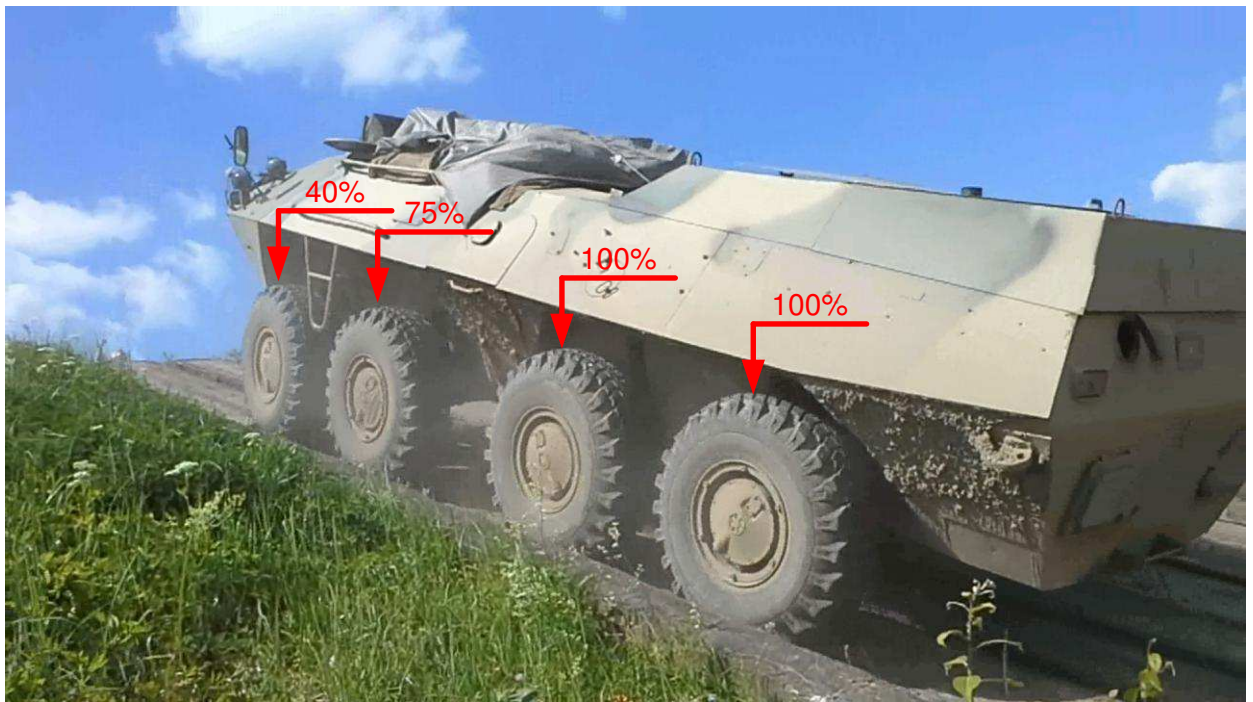


Рис. 5.31. Средний момент на осях при преодолении подъема 30 градусов

На Рис. 5.32 показаны частоты вращения тяговых двигателей при преодолении подъема 30 градусов. При этом теплыми цветами отмечены задние 4 двигателя, холодными цветами передние 4.

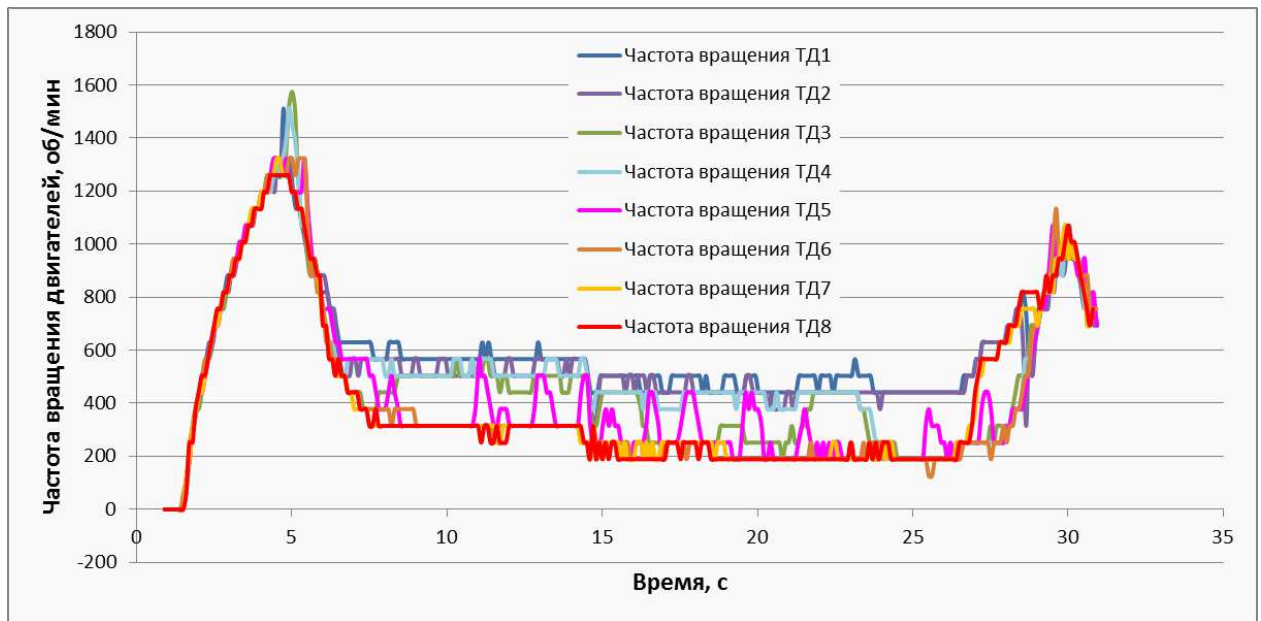


Рис. 5.32. Частоты вращения тяговых двигателей во время преодоления подъема 30 градусов

Из графика видно, что самая низкая частота вращения 200-300 об/мин соответствует задним четырем двигателям, что составляет около 3 км/ч скорости макетного образца. Передние четыре колеса пробуксовывают и их двигатели имеют частоту вращения 350-500 об/мин.

Из этих данных можно сделать ряд интересных выводов. Во-первых, конструкторам транспортного средства с электротрансмиссией следует более тщательно подходить к вопросу пробуксовки и потери зацепления колес при преодолении подъема. Во-вторых, по данным результатам интересно сравнить независимый электропривод колес с традиционной механической трансмиссией. При преодолении подъема на механической трансмиссии используется блокировка межосевого и межколесного дифференциала (автоматическая или ручная), в результате чего весь крутящий момент ДВС уходит на те колеса, сцепление с дорогой у которых максимальное. В результате этого задние колеса могут развить момент в разы больший, чем если бы все колеса находились в равном зацеплении. Это является как положительным, так и отрицательным свойством. С одной стороны, если сцепление с дорогой хотя бы у некоторых колес достаточно, машина с механической трансмиссией всегда сумеет преодолеть подъем, так как весь крутящий момент ДВС уйдет на них. С другой стороны, увеличение момента

на одном колесе/оси в разы сверх номинального может легко привести к поломке соответствующих валов, шестерней и шарниров трансмиссии. В электрическом независимом приводе колес такого свойства нет: если передние колеса потеряли сцепление, задние колеса не разовьют момент выше своего максимального. В результате этого редуктора и карданы привода колеса, будучи рассчитанными на максимальный момент электродвигателя, не сломаются, так как электродвигатель не сможет «вдруг» реализовать момент в разы больший. С другой стороны, суммарного момента на колесах может не хватить для преодоления транспортным средством подъема, как это было до увеличения момента на 20% у данного макетного образца. Какие свойства трансмиссии являются более предпочтительными, вопрос сложный: дальнейший более детальный сравнительный анализ электрической и механической трансмиссий выходит за рамки данной работы и квалификации её автора.

5.3.2 Плохая устойчивость системы управления на высоких частотах вращения двигателей

При повышении частоты вращения тяговых двигателей наблюдается ухудшение устойчивости работы системы управления, что видно по увеличивающимся колебаниям кривой мощности на осциллограмме при частотах вращения от 4500 об/мин. Колебания связаны с плохой устойчивостью в зоне нехватки напряжения инвертора, когда весь запас по напряжению израсходован. Путем увеличения разрешенного тока по оси d (тока ослабления поля со стороны статора, см. структуру Рис. 2.7) зону начала колебаний удалось отодвинуть вверх по частоте – колебания стали появляться только при частотах выше 5800 об/мин. Однако эти колебания не приводили к значимым ухудшениям тяговых показателей двигателей. Несмотря на колебания, макетный образец транспортного средства продолжал разгоняться. Для устранения колебаний требуются дополнительные исследования с применением лабораторного стенда с

двигателем и нагрузочной машиной, так как на движущемся с высокой скоростью макетном образце тонкую отладку векторной системы управления производить проблематично.

5.3.3 Перенапряжения генератора вследствие долгого спада поля возбуждения

Самая большая проблема проекта заключалась в проявлении вихревых токов возбуждения генератора. Так как применяемый генератор, как и двигатели, также вентильно-индукторный с независимым возбуждением, но еще большей мощности и габаритов, то вихревые токи контура возбуждения, описанные в разделе 5.2.4, имели еще большее время спада. Генератор ВИД НВ имеет достаточно мягкую характеристику выпрямленного напряжения о тока нагрузки (Рис. 5.33).

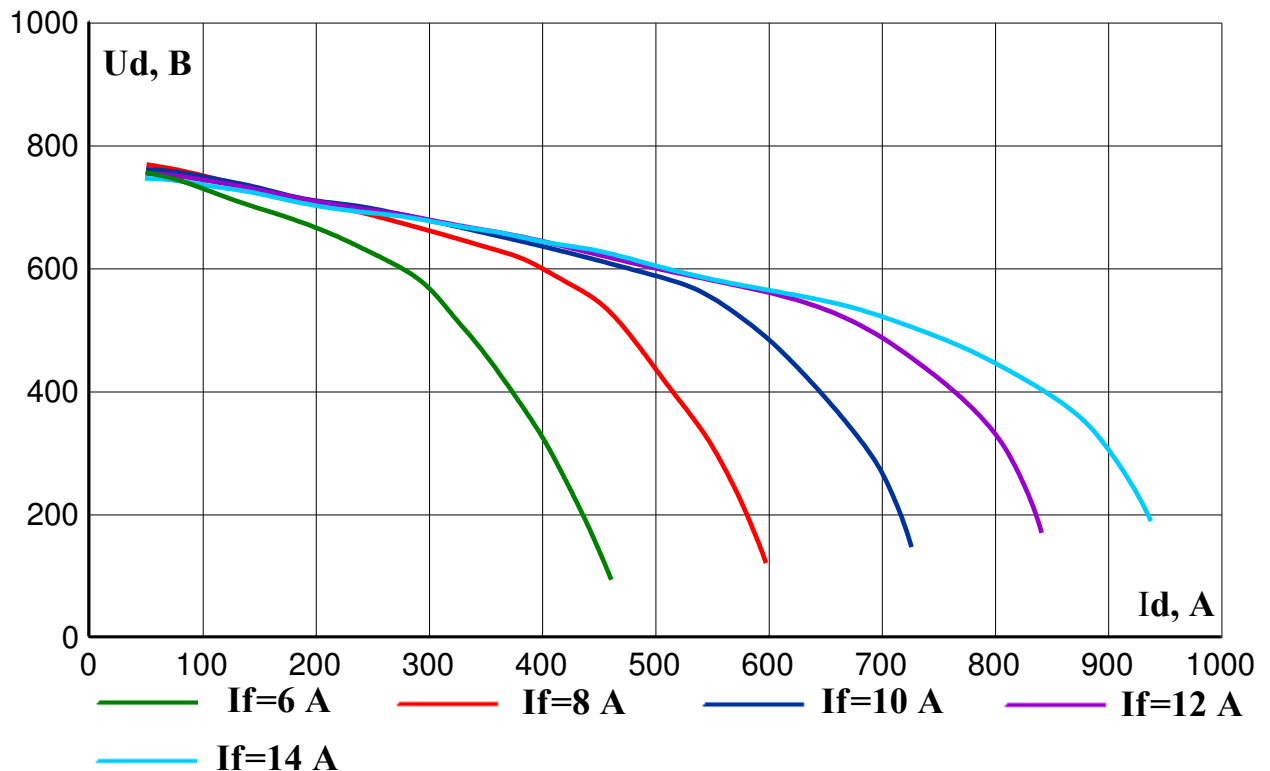


Рис. 5.33. Зависимости выпрямленного напряжения (U_d) вентильно-индукторного генератора от тока нагрузки (I_d) при различных значениях тока возбуждения (I_f) при $n=1600$ об/мин, по данным конструкторов генератора

К примеру, при поддержании номинального напряжения 540В постоянного тока и номинальной мощности 300кВт необходимо обеспечивать частоту вращения 1600-1800 об/мин и максимальный ток

возбуждения. При резком сбросе нагрузки с генератора напряжение, согласно кривой холостого хода генератора, становится равным 820В, что является аварийным для всего электрооборудования. Система управления генератором оперативно сбрасывает ток возбуждения, пытаясь отрегулировать напряжение, но из-за вихревых токов поле возбуждения сбрасывается очень медленно, и напряжение приходит в норму лишь спустя пару секунд. Вследствие этого при любом резком сбросе большой нагрузки с генератора возникает аварийная ситуация связанная с повышением напряжения в звене постоянного тока. Молекулярный накопитель не может полностью погасить всплеск перенапряжения, так как мощность его преобразователя лишь 80кВт, а генератора 300кВт. Проблему бы решили тормозные резисторы, но в данном макетном транспортном средстве их предусмотрено не было. Поэтому единственным выходом из ситуации было программно ограничить темп сброса нагрузки с генератора, и именно установить специальный задатчик интенсивности на педаль газа в контроллере верхнего уровня, затягивающего на полторы секунды её отпускание. Тем не менее, всегда остается риск отключения оборудования по какой-то другой внештатной ситуации (например, пропадание приборного питания), что все равно приведет к аварийному всплеску напряжения в звене постоянного тока.

5.3.4 Необходимость автоматической подстройки датчиков напряжения звена постоянного тока

Как описано в разделе 2.7, все режимы работы оборудования электротрансмиссии связаны друг с другом через уровни напряжения в звене постоянного тока. Так, тяговые двигатели автоматически ограничивают свой момент, несмотря на задание, если напряжение начинает спускаться ниже определенной уставки (зона 5 Рис. 2.8). Чем уже ширина этой зоны, тем лучше с точки зрения недопущения снижения напряжения, но тем чувствительнее система становится к калибровке датчиков напряжения звена постоянного тока между устройствами. Так, при ширине зоны 5 в 50 В

(например, 460В – нет снижения момента, 410В – момент снижается до нуля), ошибка в показаниях датчиков напряжения между преобразователями двигателей в 10-15 В будет приводить к существенно разному моменту на двигателях. На осциллограмме Рис. 5.34 показан разгон макетного образца при плохо откалиброванных датчиках напряжения звена постоянного тока. На осциллограмме наложены друг на друга графики показаний всех восьми преобразователей тяговых двигателей: график с датчиков напряжений звена постоянного тока, график частот вращения, график текущих моментов по каждому двигателю и график общего задания момента от педали газа.

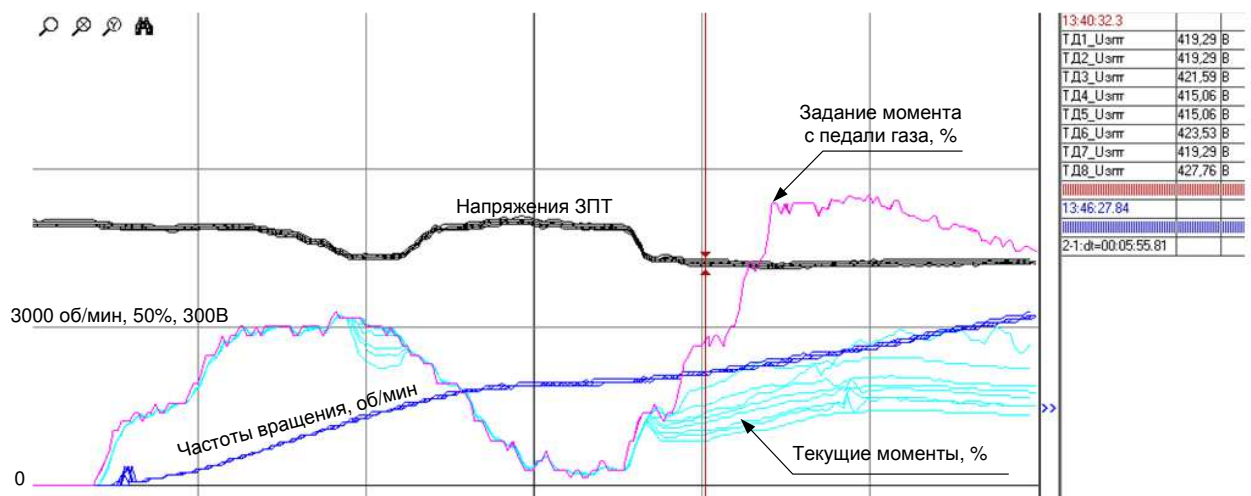


Рис. 5.34. Разгон макетного образца с плохо откалиброванными датчиками напряжения звена постоянного тока

Видно, что пока частота вращения была низка, соответственно, мощность мала, двигатели могли реализовать заданный момент полностью: текущие моменты всех двигателей совпадают между собой и совпадают с заданием педали газа. Далее, с середины осциллограммы, водитель прибавляет задание момента педалью газа, частота вращения двигателей относительно высокая, соответственно, отбираемая от генератора и молекулярного накопителя мощность тоже оказывается высокой. Они становятся не в состоянии поддерживать напряжение в звене постоянного тока на своем заданном уровне, в результате напряжение проседает и начинает работать ограничение момента в преобразователях тяговых двигателей, не допускающее дальнейшую просадку напряжения. Текущий момент тяговых двигателей становится меньше задания. Но так как датчики

напряжений у всех преобразователей откалиброваны по-разному, текущий момент становится разным на всех колесах, и меняется от 30% до 50% в зависимости от показаний датчика напряжения. На осциллограмме справа приведен список показаний датчиков напряжения в момент времени, отмеченный вертикальным курсором. Видно, что минимальные показания составляют 415В, а максимальные 427,7В. Таким образом, разница показаний датчиков в 13В приводит к неодинаковости момента на колесах почти в два раза.

Для борьбы с этим было решено организовать автоматическую калибровку датчиков напряжения всех устройств трансмиссии по какому-то одному, базовому датчику напряжения. Таким базовым датчиком был выбран датчик напряжения генератора. Причем важно не осуществить точность измерения напряжения как физической величины, а лишь выровнять показания между преобразователями – никакого образцового вольтметра для калибровки не требуется. Для осуществления калибровки в ПО преобразователей тяговых двигателей была реализована структура, показанная на Рис. 5.35.

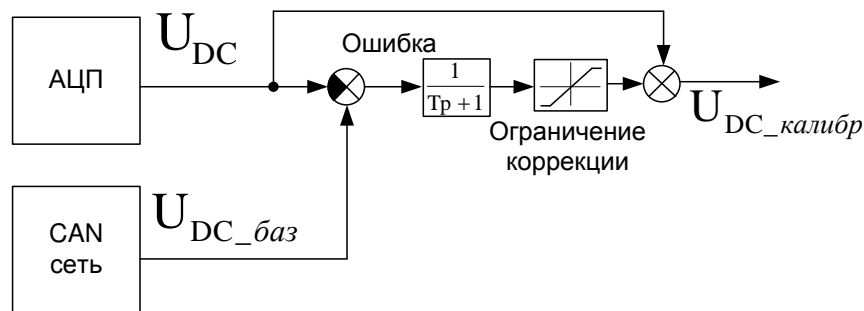


Рис. 5.35. Структура для автоматической калибровки показаний датчиков напряжения постоянного тока по базовому напряжению, полученному по сети CAN

Напряжение звена постоянного тока U_{DC} поступает от модуля АЦП контроллера. По сетевому интерфейсу CAN с периодичностью 100мс поступает значение напряжения от преобразователя генератора, которое принимается в качестве базового. После вычисления разности (ошибки) установлен инерционный фильтр с постоянной времени порядка нескольких минут. Значение выхода этого фильтра, пройдя через блок ограничения,

прибавляется к напряжению, полученному с АЦП, образуя $U_{DC_калиброванное}$, используемое далее системой управления. Такая структура работает постоянно, осуществляя выравнивание показаний всех датчиков напряжения всех устройств. Использовать напрямую полученное из сети CAN значение напряжения постоянного тока нельзя из-за низкой частоты его обновления. Блок насыщения (ограничение коррекции на рисунке) ограничивает коррекцию на уровне $\pm 15V$, чтобы при каких-либо неполадках в сетевом обмене между устройствами, отказавшем датчике напряжения генератора все другие устройства не лишились полностью показаний своих датчиков напряжения.

На Рис. 5.36 показан аналогичный разгон макетного образца с работой алгоритма калибровки показаний датчиков напряжения звена постоянного тока на всех преобразователях тяговых двигателей.

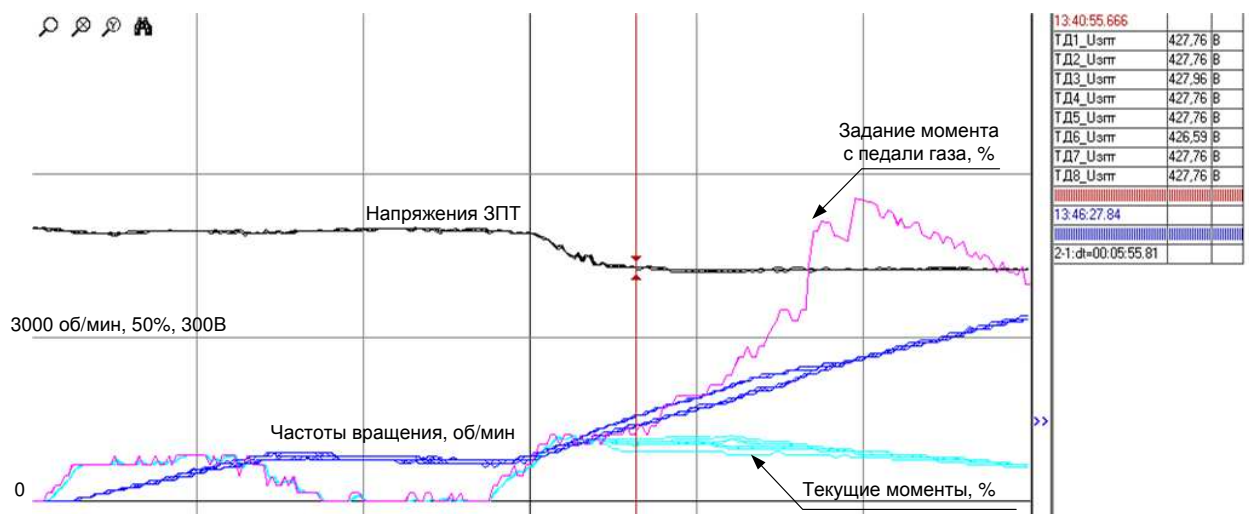


Рис. 5.36. Разгон макетного образца с работой автокалибровки показаний датчиков напряжения звена постоянного тока

Из осциллограммы видно, что линия показаний всех датчиков сливается в одну, текущие моменты всех двигателей при работе ограничения момента по напряжению в звене постоянного тока практически совпадают (разница не более 5%). При этом вертикальным курсором на осциллограмме также отмечена точка, в которой справа на рисунке приведены значения всех показаний всех датчиков. Разница между показаниями не превышает 1В. Стоит отметить, что пониженное напряжение в звене постоянного тока (420В

вместо 540В) было установлено на ранних стадиях испытаний, когда все алгоритмы управления только проверялись. Тогда и были получены приведенные осциллограммы. В дальнейших экспериментах напряжение было поднято до номинальных 540В с просадкой до 490В под нагрузкой.

Таким образом, алгоритм согласованной работы всех устройств трансмиссии в зависимости от напряжения звена постоянного тока требует наличия алгоритма автоматической калибровки показаний датчиков напряжения. В противном случае возможна несинхронная работа устройств. Ручная однократная калибровка датчиков напряжения «на заводе» также не является выходом, так как наиболее вероятно, что со временем, при различных температурных режимах, показания датчиков все равно «уплывут». Тем не менее, алгоритм автоматической калибровки несложен и может быть легко реализован, что и было сделано.

5.3.5 Вывод

Разработанная система управления тяговыми вентильно-индукторными двигателями с независимым возбуждением работоспособна и проверена экспериментально на макетном образце транспортного средства. Все заложенные идеи – векторная система управления двигателями, пропорциональное изменение тока статора и тока возбуждения, взаимосвязанная работа устройств трансмиссии в зависимости от напряжения звена постоянного тока, управление моментом каждого двигателя от контроллера верхнего уровня – нашли свое экспериментальное подтверждение. Разработанное программное обеспечение для осциллографирования и параметрирования преобразователей по сети CAN позволила провести комплексную отладку и настройку всей системы управления, получить множество интересных экспериментальных данных на макетном образце. Вентильно-индукторные двигатели с независимым возбуждением позволили реализовать макетному образцу все пункты ТЗ, обеспечивая заданную тяговую характеристику. Экспериментальные

исследования показали и недоработки – необходимость учета вихревого тока поля возбуждения как у двигателя, так и у генератора, более детальный учет проскальзывания колес при подъеме для выбора максимального момента двигателей, необходимость создания лабораторного стенда для испытания тяговых двигателей под нагрузкой для устранения неустойчивой работы на высоких частотах вращения.

Таким образом, ВИД НВ с разработанной системой управления показывает себя как перспективный тяговый электропривод переменного тока. Как объект управления ВИД НВ также удобен по сравнению с другими типами электродвигателей: независимое управление током статора и током возбуждения позволяет получить широкую зону постоянства мощности. Экспериментальные данные по испытаниям двигателей оказались близки к теоретическим. Это говорит о хорошей расчетной базе конструкторов двигателей, а значит об уверенности в возможности проектирования двигателей другой конфигурации.

Имеет смысл продолжать исследования в этой области: экспериментально получить тяговую характеристику ВИД НВ на лабораторном стенде, вычисляя КПД двигателя и преобразователя во всех точках, найти оптимальное соотношение тока статора и тока возбуждения, провести испытания на нагрев и т.п. С точки зрения улучшения системы управления стоит приложить усилия для синтеза бездатчикового векторного управления двигателями с возможностью определения положения ротора вплоть до нулевой частоты вращения – как этого требует тяговый привод.

Заключение

Основные результаты работы заключаются в следующем:

1. Разработана структура системы управления тяговым ВИД НВ с зависимым управлением током возбуждения от тока статора, программно **имитирующая машину последовательного возбуждения**. Структура проверена моделированием в пакете MATLAB/Simulink и подтверждена экспериментальными исследованиями. Получен **диапазон работы привода в зоне постоянства мощности равный 10:1**.
2. Разработаны и проверены экспериментально алгоритмы, обеспечивающие согласованную и полностью автономную работу всех устройств электротрансмиссии на основе изменения поведения устройств в зависимости от текущего напряжения в звене постоянного тока.
3. **Разработана компьютерная модель тягового ВИД НВ**, учитывающая влияние вихревых токов контура возбуждения, выявленных при испытаниях опытных образцов ВИД НВ.
4. Синтезированы энергосберегающие алгоритмы, уменьшающие потери в инверторе за счет оптимизации векторной ШИМ. Согласно моделированию и лабораторным испытаниям на макете привода **динамические потери в ключах инвертора уменьшаются на 16%**.
5. Разработано низкоуровневое программное обеспечение для микроконтроллера силового преобразователя, реализующее синтезированные для управления ВИД НВ алгоритмы.
6. Разработан комплекс специальных программных средств исследования привода и электротрансмиссии, позволяющий производить параметрирование и **осциллографирование работы всех устройств**, входящих в распределенную систему управления электротрансмиссии.
7. **Разработана методика испытаний тяговых ВИД НВ**, структура экспериментального стенда. Проведены экспериментальные исследования разработанной СУ и опытных образцов тяговых двигателей ВИД НВ мощностью 35кВт. Получена экспериментальная зависимость

выходного момента двигателя от тока статора и тока возбуждения, тяговая характеристика, согласующаяся с теоретическим расчетом.

8. **Проведены ходовые испытания макета 8-и колесного транспортного средства** массой 22 тонны на основе электротрансмиссии с ВИД НВ. На макете проверены все разработанные алгоритмы и программное обеспечение в составе электротрансмиссии. Макетный образец показал максимальную **скорость 97 км/ч**, преодолел **подъем 30 градусов**, продемонстрировал режим разворота на месте и высокую топливную экономичность. Все заложенные в систему управления идеи себя оправдали, хотя и потребовали некоторых доработок по ходу испытаний.

Список литературы

1. Алямкин Д.И. Разработка и исследование двухфазного вентильно-индукторного электропривода насосов горячего водоснабжения: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / Д.И. Алямкин. – М., 2011. – 237с.
2. Алямкин Д.И. Разработка элементов системы векторного управления асинхронного двигателя: дис. ... маг. техн. наук: 05.09.03 / Д.И. Алямкин. – М., 2007. – 87с.
3. Анучин А.С. Разработка системы управления многофазного вентильно–индукторного привода с промежуточным регулируемым звеном постоянного тока: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / А.С. Анучин – М., 2004. – 200 с.
4. Безносенко Д.М. Структура и алгоритмы управления электротрансмиссией переменного тока большегрузных автосамосвалов: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / Д.М. Безносенко. – Санкт-Петербург, 2004. – 179с.
5. Дроздов А.В. Разработка системы бездатчикового векторного управления вентильно-индукторным двигателем с независимым возбуждением: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / А.В. Дроздов. – М., 2008. – 181с.
6. Дроздов А.В. Сравнительный анализ различных вариантов векторной ШИМ: // Радиоэлектроника, Электротехника и Энергетика: Тез. доклада Десятая международная научно – техническая конференция студентов и аспирантов. В 3–х т., – М.: Издательство МЭИ, 2004. – т.2. – С. 103 – 104.
7. Егоров А.Н., Кудин С.Н. Тяговый электрический привод карьерных самосвалов — настоящее и будущее.// Горная Промышленность.- 2002.- №6.
8. Жарков А.А. Разработка и исследование вентильно-индукторного электропривода с независимым возбуждением и микроконтроллерным управлением. дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / А.А. Жарков – М., 2008. – 150с.

9. Захаров А. Перспективы внедрения вентильно-индукторного электропривода. // Конструктор. Машиностроитель.-2008.-№ 5-С. 6-9;
10. Ивоботенко Б. А., Ильинский Н. Ф. И др. Разработка новых принципов, конструкций, технологий производства многопакетных электроприводов и создание на их основе нового поколения прецизионного приборного оборудования. – М.: МЭИ, КБТМ, Минск, Резюме работы по Госпремии СССР в области науки и техники, 1981. – 15 с.
11. Изосимов Д.Б., Гнездов Н.Е., Журавлев С.В. Проектирование асинхронных тяговых двигателей и синтез векторного управления тяговыми приводами.// Электронные компоненты.- 2010.- №11- С. 17-22.
12. Ключев В.И. Теория электропривода. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 704 с.
13. Козаченко В.Ф., Остриров В.Н., Русаков А.М., Дроздов А.В., Сорокин А.В., Крылов Ю.А. Новое направление в электроприводе – мощный многосекционный вентильно-индукторный электропривод с векторным управлением // «Электронные компоненты». №11, Тематический вып. «Электропривод», - 2006. – С. 30-35.
14. Козаченко В.Ф., Жарков А.А., Дроздов А.В. Серия модульных встраиваемых микроконтроллерных систем управления для современного комплектного электропривода// Приводная техника - 2007. - Вып. 5. - с.3-8
15. Козаченко В.Ф., Жарков А.А., Дроздов А.В. Мультипроцессорная система управления многосекционным вентильно–индукторным электроприводом // Труды XI Международной конференции Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты. – Алушта, 2006. – С.56– 57
16. Корпусов Д.Е. Разработка и исследование мощного вентильно–индукторного электропривода: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / Д.Е. Корпусов – М.: 2002. – 211 с.

17. Лашкевич М.М. Разработка модульной структуры программного обеспечения новой серии преобразователей частоты: Дипломная работа на соискание степени бакалавра техники и технологий. – М., 2008. – 32с.
18. Остриров В.Н. Создание гаммы электронных преобразователей для электропривода на современной элементной базе: дис. ... д-ра техн. наук: 05.09.03 / В.Н. Остриров – М., 2004. – 326 с.
19. Русаков А. М. Разработка вентильных электродвигателей на базе магнитных систем индукторных машин.: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / А. М Русаков.– М., 1982.
20. Соколовский Г. Г.: «Электроприводы переменного тока с частотным регулированием», М: «Академия», 2006, ISBN: 5-7695-2306-9.
21. Флоренцев С.Н., Изосимов Д.Б. Тяговый электропривод в гибридных транспортных средствах. Идеология проектирования комплектного тягово-энергетического оборудования для гибридных транспортных средств. Часть 1.// Электротехника.- 2009.- №7.
22. Чуев П. В. Разработка систем векторного управления асинхронными приводами на базе специализированных сигнальных микроконтроллеров: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / П. В. Чуев. – М., 2002. – 254 с.
23. Шайхиев А. Р. Улучшение тяговых свойств электроподвижного состава с вентильно-индукторным тяговым электроприводом путем снижения пульсаций электромагнитного момента: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07, 05.09.03 / А. Р. Шайхиев – Ростов н/Д, 2004. – 135 с.
24. Шалыто А.А. Switch-технология. Алгоритмизация и программирование задач логического управления. — СПб.: Наука, 1998. — 628 с.
25. Шалыто А.А., Туккель Н.И. Switch–технология – автоматный подход к созданию программного обеспечения «реактивных» систем. // Программирование. – 2001. – №5 – С.45–62

26. Шатова И.В. Разработка методики поверочного расчета вентильного индукторного двигателя с последовательной обмоткой возбуждения: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / И.В. Шатова — М., 2007. — 154с.
27. A.Bado, S.Bolognani, M.Zigliotto Effective Estimation of speed and rotor position of a PMSM drive by a Kalman filtering technique. // Proc. Of 1992 Power Electronics Specialists Conference – pp.951– 957.
28. Baoquan Kou, Chunyan Li, Shukang Cheng: "A New Flux-Weakening Method for Permanent Magnet Synchronous Machine". Dept. of Electr. Eng., Harbin Inst. of Technol., China.
29. Bejerke S. Digital Signal Processing Solutions for Motor Control Using the TMS320F240DSP– Controller. – Paris, 1996.
30. Binder A., Greubel K., Piepenbreier B., Tölle H.J.: «Permanent-magnet synchronous drive with wide field-weakening range» European Transactions on Electrical Power, 8.
31. Kondo. М. Совершенствование синхронного тягового двигателя на постоянных магнитах. Железные дороги мира». - 2009. - N 7. - С. 56-59.
32. TAKAHARU TAKESHITA, AKIRA USUI, and NOBUYUKI MATSUI N: «Sensorless Salient-Pole PM Synchronous Motor Drive in All Speed Ranges». agoya Institute of Technology, Japan.
33. Texas Instruments. TMS320F2810, TMS320F2812 DSP (Rev. H). Data Sheet.
34. Woolaghan, S., Schofield, N.: «Current Source Inverters for PM machine control» Sch. Electr. & Electron. Eng., Univ. of Manchester, Manchester.

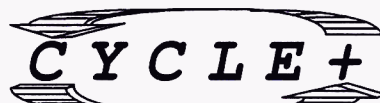
Приложение 1

Акт внедрения



НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ
ПРЕДПРИЯТИЕ (ООО)

Россия, 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, 17Г, стр. 3.
Тел/факс: (495)362-79-96



ENGINEERING COMPANY
(LTD)

Krasnokazarmennaya str., 17G, b.3, 111250, Moscow, Russia
Tel/fax: (495)362-79-96

Общество с ограниченной ответственностью
«Научно-производственное предприятие
«ЦИКЛ ПЛЮС»

Адрес: 111250, г. Москва, ул.
Красноказарменная, д.17Г, стр.3
ИНН 7722006004, КПП 772201001
В ОАО «Банк Москвы» г. Москва,
Митинское отд.

Р/с 40702810100120000420

К/с 30101810500000000219

БИК 044525219

Тел./факс (495)-362-79-96.

Эл. почта : OstrirovVN@cycle-p.ru

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

Настоящим подтверждается, что Лашкевич Максим Михайлович, работая по договору №3_Ц/10 от 01.03.2010 между ООО "НПФ Вектор" и ООО "ЦИКЛ ПЛЮС", разработал алгоритмическое и программное обеспечение контроллера силового преобразователя для управления электромагнитным моментом тягового мотор-редуктора МРИ-35 на базе индукторной машины с независимым возбуждением, а также программное обеспечение контроллера управления силовым преобразователем секции тягового вентильного генератора ГВИТ-300, включая управление инвертором секции в двигательном режиме работы генератора и управление контуром возбуждения генератора.

На дату написания акта проведены экспериментальные исследования тягового мотор-редуктора МРИ-35, тягового вентильного генератора ГВИТ-300, макетного образца транспортного средства с электрической трансмиссией, с использованием указанного программного обеспечения и алгоритмов управления.

Генеральный директор,
д.т.н., профессор



Остриров В.Н.