

ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
(национальный исследовательский университет)



На правах рукописи

Белоусов Евгений Викторович

УДК 62-83::621.313.3

**ЭЛЕКТРОПРИВОД МЕХАНИЗМА ПОДАЧИ СТАНА ХОЛОДНОЙ
ПРОКАТКИ ТРУБ с СИНХРОННОЙ РЕАКТИВНОЙ МАШИНОЙ
НЕЗАВИСИМОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ**

Специальность 05.09.03 – “Электротехнические комплексы и системы”
Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук

Научный руководитель –
кандидат технических наук
Григорьев М.А.

Челябинск – 2014

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|--|-----------|
| Оглавление | 2 |
| Введение | 4 |
| Глава 1. Анализ работы стана ХПТ | 10 |
| 1.1 Особенности технологических процессов электроприводов станов холодной прокатки труб | 10 |
| 1.2 Техничко-экономическое обоснование повышения производительности..... | 13 |
| 1.3. Анализ нагрузочных диаграмм электропривода с позиции быстрогодействия | 15 |
| 1.4. Анализ нагрузочных диаграмм электропривода с позиции точности | 22 |
| 1.5. Недостатки существующих решений | 26 |
| 1.6. Выводы по первой главе..... | 33 |
| Глава 2. выбор силовой части оборудования | 34 |
| 2.1 Математическая модель механизма подачи трубы | 34 |
| 2.1.1 Модель электромеханического преобразователя | 34 |
| 2.1.2 Улучшение массогабаритных показателей электрической машины | 37 |
| 2.1.3 Оптимизация геометрии ротора | 41 |
| 2.1.4 Модель электропривода | 45 |
| 2.1.5 Упрощенная математическая модель | 53 |
| 2.2 Оптимальные кривые переходных процессов в электроприводе подачи..... | 55 |
| 2.3 Пути повышения точности и быстрогодействия..... | 61 |
| 2.4 Быстродействие контура регулирования момента | 65 |
| 2.5 Особенности проектирования системы «преобразователь – двигатель»..... | 69 |
| 2.6 Оценка перегрузочной способности СРМНВ | 71 |
| Выводы по второй главе..... | 78 |
| Глава 3. Синтез системы управления с максимальным быстродействием контура момента | 80 |

| | |
|--|------------|
| 3.1 Эволюция системы управления..... | 80 |
| 3.2 Прямое управление моментом..... | 83 |
| 3.2.1 Особенности математической модели..... | 83 |
| 3.2.2. Синтез системы <i>DTC</i> управления электроприводом на базе CPM..... | 86 |
| 3.2.3 Оценка робастности системы <i>DTC</i> -CPM..... | 92 |
| 3.2.4 Сравнительный анализ математических моделей..... | 95 |
| Выводы по третьей главе..... | 100 |
| ГЛАВА 4. Адаптация системы к работе на повышенных скоростях и в зоне перегрузок..... | 101 |
| 4.1 Оценка потерь при работе на повышенных скоростях, обусловленных инерционностью обмотки статора..... | 101 |
| 4.2 Модальное управление в двухмассовой системе..... | 103 |
| 4.3 Адаптивная система с самонастройкой параметров..... | 108 |
| Выводы по четвертой главе..... | 114 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ..... | 116 |
| Литература..... | 120 |

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы

Холодная прокатка позволяет достичь уменьшения сечения заготовки на 75–85 % и получить трубы со сверхтонкой стенкой и высоким качеством поверхности. Кроме того, прочность изготовленной таким способом продукции получается заметно выше по сравнению с продукцией, полученной при горячей прокатке. Основным же недостатком данной технологии является высокие удельные энергозатраты и низкая производительность (не более 1 м./мин.).

Анализ работы станов холодной прокатки показывает, что наиболее «слабым» звеном в технологическом процессе с точки зрения производительности является механизм подачи, к которому предъявляются наиболее высокие требования по быстродействию и точности позиционирования.

В качестве наиболее эффективного способа повышения производительности стана ХПТ-450, расположенного в пятом цехе ОАО «ЧТПЗ» автор видит модернизацию электропривода подачи в основу построения которого положен критерий его максимального быстродействия. Важно отметить, что такой подход позволит снизить процент отбраковки продукции, повысит её качество, что в конечном итоге даст больший экономический эффект, чем применение электропривода изначально спроектированного по критерию максимального КПД системы.

Степень научной разработанности проблемы

Модернизацией электропривода подачи на данном объекте происходила вместе с развитием силовой и информационной техники. В 1986г. проф. А.М. Вейнгер впервые показал условия и возможности применения регулируемого электропривода переменного тока на данном классе механизмов. Был внедрен электропривод на элементной базе с совместным управлением вентильными группами и с аналоговой системой управления.

В 2008г. к.т.н. Остроухов В.В. производил модернизация ЭП подачи с использованием современных микропроцессорных систем управления по принципу «электронной ванны». Такое решение несколько снизило быстродействие системы в целом, однако, позволило значительно увеличить её надежность.

Наконец, в 2013г. М.А. Григорьевым в рамках докторской диссертации задача решалась с позиции обеспечения максимального быстродействия с целью показать возможности новых типов электромеханических преобразователей.

Объект исследования – электропривод подачи стана ХПТ–450.

Предмет исследования – переходные процессы в контуре скорости и момента при использовании в качестве электромеханического преобразователя синхронной реактивной машины с различными способами управления.

Целью работы является создание электропривода, который отличается максимальным быстродействием при высокой точности позиционирования, что достигается применением новых типов электрических машин учетом их особенностей при синтезе системы управления.

Идея работы заключается в следующем. Проектирование системы электропривода подачи осуществляется одновременно по критериям максимального быстродействия системы и точности позиционирования. Данную задачу можно решить только при комплексном подходе к проектированию системы «преобразователь–двигатель». Одной из основных задач исследования является выбор силового оборудования и синтез системы управления.

Одним из подходов к минимизации времени переходного процесса при позиционировании заготовки является выбор оптимального передаточного числа редуктора. Однако в системе с наличием упругостей редуктор, выбранный исключительно по этому принципу может стать причиной неустойчивости системы, колебательных процессов в контуре регулирования скорости.

Решить данную проблему можно с помощью методики, предложенной проф. Ю.С. Усыниным. Однако главным условием возможности такого решения является высокое быстродействие электропривода, когда частота среза контура скорости двигателя лежит значительно правее частоты среза контура, содержащего упругое звено.

Достичь такого быстродействия можно применением новых типов электрических машин. Лучше всего данным требованиям по мнению автора удовлетворяет синхронная реактивная машина с независимым управлением по каналу возбуждения. Другой способ – применение системы управления с наиболее быстродействующим контуром момента. Здесь автор выделяет систему прямого управления моментом.

Методы исследований. В работе использовались методы теоретического и экспериментального исследований.

Теоретические методы исследования: теория электромагнитного поля, теория электропривода и полупроводниковой преобразовательной техники, метод конечных элементов, частотные методы теории регулирования, методы математического моделирования с использованием суперкомпьютерных технологий, статистические методы исследований.

Методы экспериментального исследования: наблюдение, измерение, которые производились как непосредственно на работающем стане, так и в лабораторных условиях, где в качестве объекта измерений было оборудование, аналогичное используемому на производстве.

Достоверность полученных методов определялась экспериментальным подтверждением основных теоретических выводов, а также статистической обработкой исходных данных.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Предложена обобщенная математическая модель электропривода подачи, отличающаяся представлением электрической машины в виде модели с распределенными параметрами и учитывающей упругость

рабочего органа, что позволило увеличить добротность электропривода M/J и оптимизировать его работу на повышенных скоростях.

2. Показан комплексный подход к выбору силового оборудования и синтезу системы управления по критериям максимального быстродействия системы и точности позиционирования.

Практическое значение работы заключается в следующем.

Обобщенная математическая модель позволяет произвести предварительную настройку параметров регуляторов системы управления с учетом пульсаций электромагнитного момента электрической машины.

Предложенный алгоритм построения адаптивной системы, устойчивой к изменению параметров электрической машины делает её более робастной при работе с частыми перегрузками.

Предложенные решения приняты к внедрению в пятом цехе ОАО «ЧТПЗ».

Апробация работы.

В полном объеме работа докладывалась и обсуждалась на заседаниях кафедр:

- «Электропривод и автоматизация промышленных установок» ФГБОУ ВПО Южно-Уральского государственного университета, г. Челябинск;
- «Электропривод и электрооборудование» ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский университет».

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на конференциях и семинарах, в том числе на

XV научно-технической конференции «Электроприводы переменного тока», Екатеринбург, 2012г., Отраслевой конференции «ANSYS в энергетике», Санкт-Петербург, 11-12 апреля 2012г., Пользовательской конференции «ANSYS 2012: направления развития инженерного анализа», Москва, 14-15 июня 2012г., Симпозиуме по фундаментальным и прикладным проблемам науки, Непряхино, 11-13 сентября 2012г., VII международной конференции по

автоматизированному электроприводу АЭП-2012, Иваново, 2-4 октября 2012г., Конференции «Перспективные научные исследования», 17-25 февраля 2013г., София, Болгария, V научной конференции аспирантов и докторантов ЮУрГУ, Челябинск, 8-15 февраля 2013г., 65 научной конференции профессорско-преподавательского состава, аспирантов и сотрудников ЮУрГУ, Пользовательской конференции «ANSYS 2013: направления развития инженерного анализа», Москва, 14-15 июня 2013г., Научно-практической конференции «Актуальные проблемы автоматизации и управления», Челябинск, 5-7 июня 2013г., «Актуальные проблемы современной науки, техники и образования», Магнитогорск, 2013г., XXX Международной научно-практической конференции "Технические науки - от теории к практике", Новосибирск, 22 января, 2014г., Международной научно-практической конференции «Фундаментальные проблемы технических наук», 19 февраля 2014 г., Уфа, РИЦ БашГУ.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 22 научные статьи (**из них – 6** в периодических изданиях, **рекомендованных ВАК РФ**), 15 докладов на конференциях, 1 патент РФ на изобретение, 16 свидетельств РФ об официальной регистрации программ для ЭВМ.

Личный вклад автора состоит в разработке математической модели с применением современных технологий распараллеливания вычислений.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения, изложенных на 145 страницах машинописного текста, содержит 42 рисунка, 6 таблиц, список используемой литературы их 214 наименований.

В первой главе обозначены проблемы, связанные с работой стана, и приведены возможные пути их решения. В частности на основании произведенного макетирования обозначены ограничения при проектировании системы электропривода.

Во второй главе выполнялось построение обобщенной математической модели электропривода на базе синхронной реактивной машины с независимым управлением по каналу возбуждения, в которой двигатель представлен в

виде конечно-элементной модели. С целью увеличения добротности электрической машины М/Д производилась многопараметрическая оптимизация геометрии электрической машины при учете её работы от преобразователя частоты.

Учет неравномерного характера момента сопротивления, обусловленного влиянием на работу электропривода подачи главного привода позволил определить оптимальные нагрузочные диаграммы скорости и момента, что позволило в дальнейшем корректно произвести выбор силового оборудования с позиции высокого быстродействия и устойчивости системы.

В третьей главе производился синтез системы управления электроприводом исходя опять же из требований максимального быстродействия и точности позиционирования. Была предложена система прямого управления моментом, учитывающая особенности синхронной реактивной машины.

В четвертой главе производился анализ причин ухудшения регулировочных характеристик электропривода при работе на повышенных скоростях и в зоне перегрузок, на основании которого производился синтез адаптивной системы управления, повышающей устойчивость работы при изменении параметров электрической машины и при работе на повышенных скоростях.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ РАБОТЫ СТАНА ХПТ

1.1 Особенности технологических процессов электроприводов станов холодной прокатки труб

Холодная прокатка позволяет достичь уменьшения сечения заготовки на 75–85 % и получить полосы, листы и трубы толщиной менее 0,4 мм, вплоть до нескольких микрон, что практически недостижимо при горячей прокатке. Конкурентоспособность данной технологии определяется также тем, что она является безотходным способом обработки металлов давлением. При этом равномерность толщины, повышенная прочность и высокое качество поверхности изделия делают такую прокатку наиболее прогрессивной, что обуславливает её широкое распространение. Трубы, полученные с помощью холодной прокатки используются в атомной промышленности, для лопастей вертолетов (лонжеронов) и при изготовлении гидроцилиндров. Трубы со сверхтонкой стенкой получили применение при изготовлении котлов.

На сегодняшний день в мире работает более 700 станов холодной прокатки, более 200 станов в России. В пятом цехе ОАО «Челябинский трубопрокатный завод» эксплуатируется два стана ХПТ-450, позволяющие выпускать трубы широкого сортамента с постоянным или переменным сечением готового изделия диаметром от 150 до 450 мм. Трубные заготовки могут быть бесшовные или сварные, из углеродистых, легированных или высоколегированных сталей высокой прочности, а также из цветных металлов и их сплавов.

Технология прокатки остается практически неизменной с 60-х годов прошлого века, совершенствуется лишь электрическая часть, позволяющая увеличить производительность стана.

Для уточнения режимов работы стана ХПТ 450 был создан макет механической части в масштабе 400:1 (рис.1.1). Данное макетирование производилось в САД системе Solid Works по лицензии ЮУрГУ Solid Works Education Edition.

Прокатка трубы осуществляется частями по всей её длине. Основная клеть 1 приводится в движение посредством кривошипно-шатунного механизма главным электроприводом и совершает возвратно-поступательное движение. Вращение валков 2 производится механически через зацепление шестерни на валке 3 и зубчатой рейки 4, закрепленной на станине. Валки представляют собой металлические диски повышенной прочности, имеющие по окружности ручей переменного сечения. Исходный размер ручья соответствует наружному диаметру заготовки, конечный размер – наружному диаметру готовой трубы. Внутренний диаметр трубы регулируется положением конической оправки 5. В случае постоянного диаметра положение рабочего конуса во время прокатки остается неизменной. Если же требуется изготовление трубы, например, конической формы во время хода клетки производится сдвиг рабочего конуса в зоне деформации по требуемому закону.

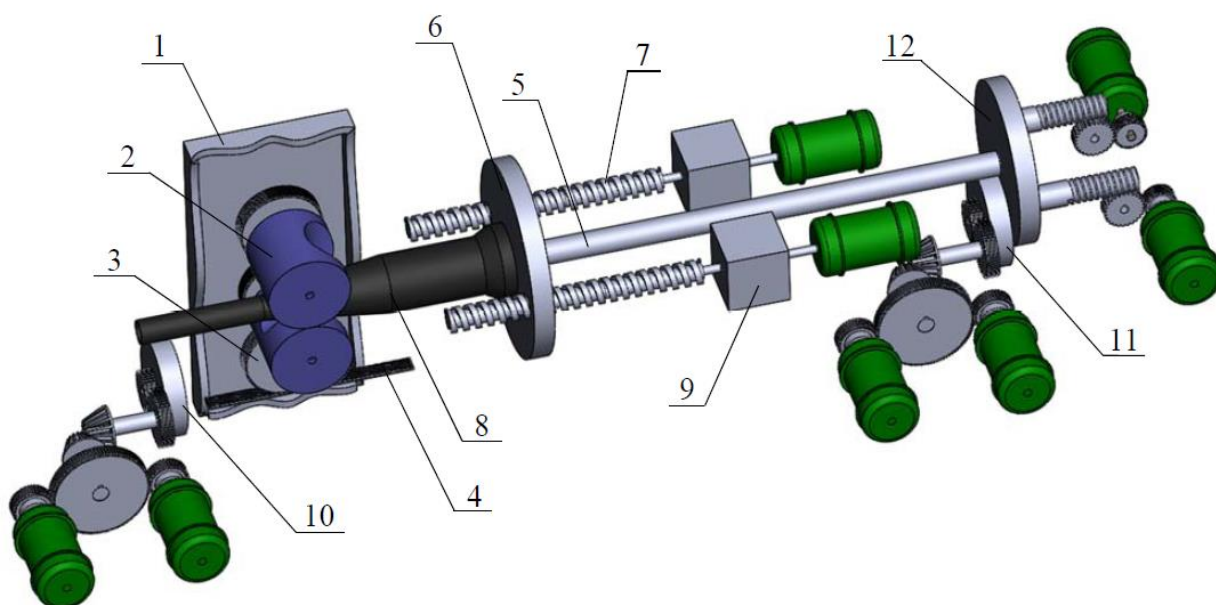


Рис. 1.1. Макет стана ХПТ: 1 – клеть, 2 – валки, 3 – шестерня, 4 – зубчатая рейка, 5 – коническая оправка, 6 – толкатель, 7 – винтовая передача, 8 – заготовка, 9 – редуктор, 10 – механизм поворота трубы, 11 – механизм поворота оправки, 12 – механизм перемещения оправки

Задний конец заготовки закреплен и неподвижен в осевом направлении. В начальный момент толкатель 6 посредством винтовой передачи 7 производит перемещение заготовки 8 в направлении клетки. Такое перемещение назы-

вается подачей. При движении рабочей клетки вперед происходит редуцирование поданного участка заготовки. Редуцирование – это процесс обжатия трубной заготовки для получения заданного диаметра и толщины стенки готовой трубы. При ходе вперед происходит обжатие трубы, придание металлу требуемой формы. Затем производится реверс (обратный ход). Данный цикл называется двойным ходом. В крайнем переднем положении, т.е. после каждого двойного хода рабочей клетки происходит поворот прокатываемой заготовки на 60-90°. Это делается для того, чтобы металл, заполнивший в предыдущем рабочем ходе выпуск калибра, раскатывался в круглом участке калибра при последующем рабочем ходе.

Для стана холодной прокатки труб ХПТ-450 способность оперативно отработать срыв трубы с оправки, обеспечив (3–4) Мн, а также позиционировать заготовку за заданное время, позволит исключить аварийные режимы. Для того, чтобы пояснить данный тезис рассмотрим более подробно технологию прокатки. Основная клеть приводится в движение посредством кривошипно-шатунного механизма главным электроприводом и совершает возвратно-ступательное движение. Главный привод работает непрерывно, из-за чего клеть находится в положении, когда возможно осуществлять подачу или поворот трубной заготовки менее 5% от времени цикла. На калибрах в начале и в конце ручья имеются выточки, называемые зевами, исключающие соприкосновение заготовки и трубы с калибрами при подаче и повороте. В тот момент, когда труба находится в пределах зоны работы зева, необходимо произвести подачу трубы или её поворот. Очевидно, что наибольшие риски здесь «испытывает» привод подачи, т.к. в случае его работы при уже зажатой валками трубе возможна её деформация (скручивание или изгиб) и протекание недопустимо больших токов в двигателе. Обезопасить себя от данных режимов можно двумя способами. Первый – увеличить возможное время позиционирования, снизив скорость главного привода, что приведет к снижению производительности всего стана, второй – обеспечить быстрое действие привода подачи.

Как показывает опыт, основные проблемы при эксплуатации стана связаны с точностью подачи трубы, срывом её с оправки. Как следствие, основной проблемой здесь является быстроедействие привода подачи. Традиционно, одним из основных является требование надежности. В Табл.1.1 приведены основные характеристики и требования к работе стана.

Таблица 1.1. Требования к производительности стана

| Параметр | Значение | ед. изм. |
|--|-----------------|-----------------|
| Наружный диаметр заготовки | 180–480 | мм. |
| Длина заготовки | 3–12 | м. |
| Максимальная масса заготовки | 3,5 | т. |
| Наружный диаметр трубы | 140–450 | мм. |
| Толщина стенки трубы | 2,4 – 50 | мм. |
| Длина трубы | 6–25 | м. |
| Число двойных ходов клетки | 10–40 | дв.ходов/мин. |
| Подача за один двойной ход | 2–25 | мм. |
| Минимальное время цикла | 1,5 | с. |
| Время «подачи» при максимальной производительности | 0,25 | с. |

1.2 Технико-экономическое обоснование повышения производительности

При постоянстве затрат на организацию производства (освещение, заработная плата рабочих, транспортные расходы) увеличение производительности стана позволит снизить себестоимость выпускаемой продукции и тем самым повысить её конкурентоспособность. Как было отмечено выше, основным этапом прокатки, требующим модернизации является подача трубы. Повышение точности позиционирования заготовки позволит снизить отбраковку продукции на 9-12%. По технологическим данным ОАО «ЧТПЗ» за 9 месяцев

цехом №5 произведено около 15272 тонн труб. Себестоимость каждой тонны трубы 40 тыс. рублей.

В Табл. 1.2 приведена оценка технико-экономических показателей работы стана до и после модернизации.

Таблица 1.2 – Техничко-экономические показатели работы стана

| Параметр | Технический показатель | Экономический показатель | |
|---|------------------------|--------------------------|----------|
| | | Единица измерения | Значение |
| Себестоимость трубы в год до модернизации | | тыс.руб./т | 40,000 |
| Средняя отбраковка до модернизации, % | 4 | | |
| Произведено труб в т/год до модернизации | 20 362 | | |
| Примерное количество труб в год до модернизации в шт | 13 575 | | |
| Себестоимость производства труб до модернизации в год | | тыс. руб/год | 814 480 |
| Средняя отбраковка после модернизации, % | 2 | | |
| Произведено труб в т/год после реконструкции | 21 450 | | |
| Примерное количество труб в год после модернизации в шт | 14 371 | | |

| | | | |
|--|--|-----------------|-----------|
| Себестоимость производства труб после модернизации в год | | тыс. руб/год | 812 969 |
| Себестоимость трубы в год после модернизации | | тыс.руб./т | 39,861 |
| Ожидаемый экономический эффект | | тыс.руб. / год. | 1 511,000 |

Не мало важным остается вопрос качества продукции. Основным требованием, предъявляемым к готовой трубе является равномерность стенки. По данным руководства цеха №5 ОАО «ЧТПЗ» порядка 55% продукции производится для изготовления гидроцилиндров, 15% - для атомной промышленности (в основном ТВЭЛы), 25% - лонжероны для сверхтяжелого вертолета МИ-28, 5% – остальная продукция. В Таблице 1.3 приведены требования к разностенности готовой продукции для основных категорий выпускаемого сортамента.

Таблица 1.3–Требования к разностенности готовой продукции

| Объект | Толщина стенки, мм. | Допустимая разностенность, мм |
|---------------|---------------------|-------------------------------|
| Лонжероны | 5 | ±0,2 |
| ТВЭЛ | 2 | ±0,15 |
| Гидроцилиндры | 10 | ±0,6 |

1.3. Анализ нагрузочных диаграмм электропривода с позиции быстрогодействия

Для оценки потенциальных возможностей использования стана попытаемся проанализировать участки работы, которые имеют существенную долю во всем переходном процессе. Наиболее характерным для такого анализа является статистическая обработка. Исходные данные были предоставлены Челябинским трубопрокатным заводом, а также были частично заимствованы из

диссертации Остроухова В.В. [87]. Анализ проводился для максимально широкого диапазона возможностей работы стана и включал, в частности, следующие режимы: прокатка максимально податливой трубы (длиной 25м., диаметром 140мм., толщиной стенки 2,5 мм.), прокатка максимально жесткой трубы (длиной 6 м., диаметром 450 мм., толщиной стенки 50 мм.), работа с наивысшей скоростью 40 двойных ходов в минуту, и с наименьшей производительностью 10 двойных ходов в минуту. Одна из наиболее характерных осциллограмм представлена на рис. 1.2. Здесь же обозначены наиболее значимые участки работы.

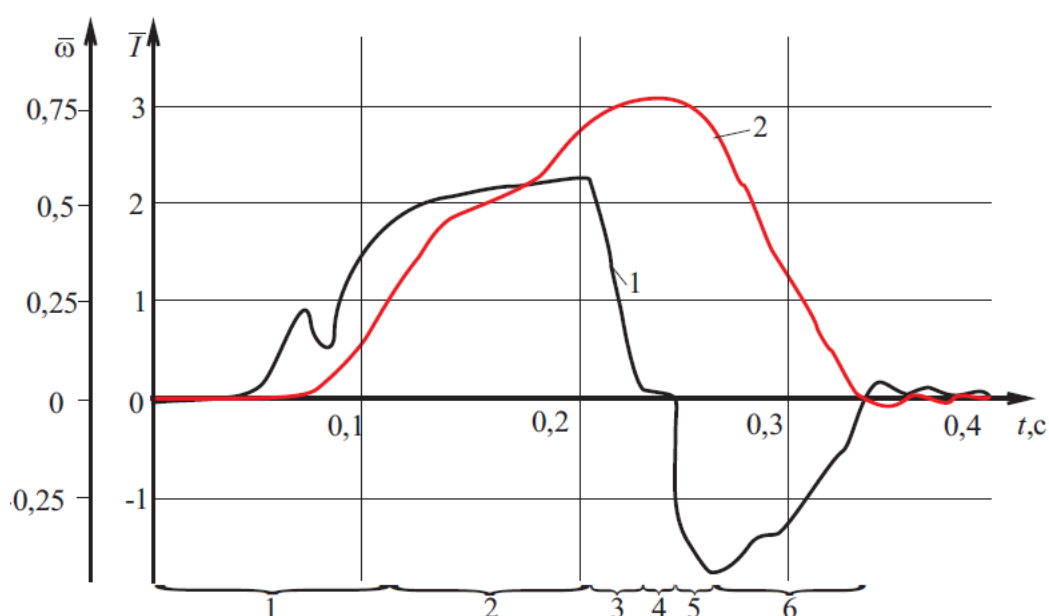


Рис 1.2 Осциллограммы тока (1) и скорости (2) привода подачи

В качестве электропривода подачи выступает позиционный электропривод с подчиненным регулированием тока, скорости и положения. Силовая часть организована посредством тиристорного преобразователя. Задание на ток поступает с выхода регулятора скорости. Перемещение осуществляется с оптимальной характеристикой скорости, представленной на рис. 1.2, 2. Анализ осциллограммы тока (рис. 1.2, 1) показывает, что при разгоне привода регулятор скорости работает сначала в линейном режиме, а затем происходит его насыщение. Просадка тока в данном случае обусловлена наличием бестоковой

паузы при раздельном управлении вентильными группами. Увеличение быстрого действия контура тока позволит осуществлять разгон с максимальным ускорением, что обеспечит увеличение производительности стана.

Для оценки доли времени нарастания тока в общем времени разгона была проведена статистическая обработка осциллограмм тока и скорости, полученных экспериментально (рис. 1.3). В качестве метода статистической обработки гипотез был выбран критерий Стьюдента. Доказано (Таблица 1.1), что максимальное отклонение исследуемой величины от среднего значения не превышает допустимого, т.к. полученный квантиль Стьюдента получился меньше критического. Это обстоятельство позволяет нам в качестве итоговой оценки брать среднее значение доли времени нарастания тока.

Поскольку процесс снятия осциллограмм на работающем объекте является довольно затруднительным, количество экспериментов n было ограничено 10. При этом для степени свободы $f=n-1$ критический односторонний квантиль Стьюдента будет равен $t_k=1,83$ (вероятность 95%). В качестве ожидаемой величины $T_{ож}$ возьмем среднее значение доли времени нарастания тока. Разность наблюдаемого и ожидаемого значений d и её квадрат позволяют вычислить нам стандартное отклонение s_d и квантиль Стьюдента (Таблица 1.4).

Таблица 1.4 – Статистическая обработка осциллограмм тока

| Параметр | T | $T_{ож}$ | d | d^2 |
|--|------|----------|-------|--------|
| Номер выборки | | | | |
| 1 | 0,42 | 0,54 | -0,12 | 0,0144 |
| 2 | 0,56 | 0,54 | 0,02 | 0,0004 |
| 3 | 0,52 | 0,54 | -0,02 | 0,0004 |
| ... | ... | ... | ... | ... |
| 10 | 0,64 | 0,54 | 0,1 | 0,01 |
| $s_d = \sqrt{\frac{\sum d^2 - \frac{(\sum d)^2}{n}}{n-1}}$ | 0,07 | | | |
| $t = \frac{\bar{d} - \mu_d}{\frac{s_d}{\sqrt{n}}}$ | 0,6 | | | |
| $t_{КРИТ}$ | 1,83 | | | |

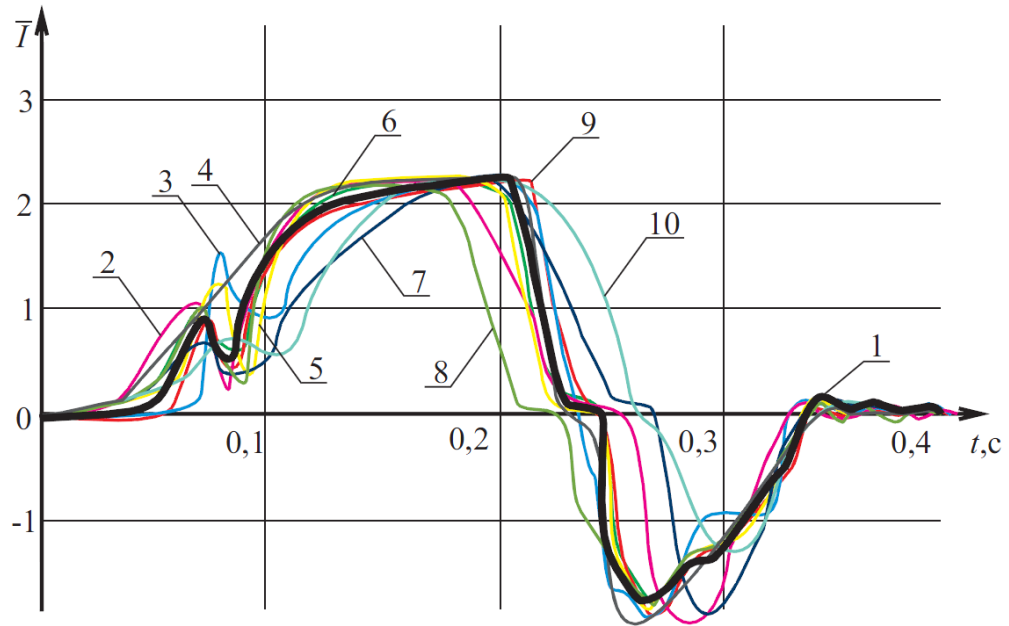


Рис. 1.3. Экспериментальные осциллограммы тока электропривода подачи (выборка из десяти переходных процессов: 1 – наиболее характерный процесс, 2 – процесс 2, 3 – процесс 3, 4 – процесс 4, 5 – процесс 5, 6 – процесс 6, 7 – процесс 7, 8 – процесс 8, 9 – процесс 9, 10 – процесс 10)

Таким образом средняя доля времени нарастания тока составляет 54% от времени разгона. Столь низкий темп обусловлен ограниченными возможностями тиристорного преобразователя. Далее будут рассмотрены пути его увеличения.

Аналогичные расчеты производились для остальных участков переходного процесса. Во всех случаях полученный квантиль Стьюдента получился меньше критического, что позволяет нам с вероятностью 95% утверждать, что каждый из участков имеет следующие доли в общем времени переходного процесса: участок 1 – 33,5%; участок 2 – 28,5%; участок 3 – 7%; участок 4 – 5%; участок 5 – 6%; участок 6 – 20%.

На втором участке регулятор скорости насыщается и электропривод работает с максимальным ускорением. Данное ограничение необходимо для того, чтобы механические усилия, в частности в зубчатых передачах не превышали допустимые. Кроме того, это ограничение обусловлено низкой перегрузочной способностью работающего электромеханического преобразователя. Наиболее же оптимальным с нашей точки зрения в этом ключе является

синхронный электропривод с независимым управлением по каналу возбуждения [31].

Третий участок спадания тока до нуля ограничен лишь индуктивностью обмотки и быстродействием контура скорости. На четвертом участке привод работает с постоянной максимальной скоростью, которая ограничена максимумом сигнала на выходе регулятора положения. Пятый и шестой участки аналогичны по своей сути участкам 1 и 2 соответственно с той лишь разницей, что при торможении электроприводу необходимо развивать меньший момент за счет активного характера момента сопротивления (силы трения трубы).

С учетом произведенного анализа рассмотрим пути уменьшения времени позиционирования трубы. Для обеспечения высоких энергетических и производственных показателей стана ХПТ с точки зрения электропривода подачи необходимо обеспечить оптимальную кривую переходного процесса ограничив при этом ускорения уязвимых частей механизмов в пределах допустимых значений. Чаще всего таковыми узлами являются зубцы шестерни редуктора. Традиционно для уменьшения динамических нагрузок в кинематических цепях стремятся увеличить добротность электромеханического преобразователя M/J , уменьшить маховые массы и минимизировать люфты. Это позволяет уменьшить долю динамических нагрузок в общей нагрузке с 90...95% до 55...65%. Для ограничения усилий в пределах допуска используют программнореализуемые блоки ограничения.

Оптимальность кривой переходного процесса рассматривается с позиции наибольшей величины подачи при минимальном моменте сил упругости в элементах механизма. Обеспечить данную кривую можно с помощью постоянства ускорения электропривода. Другими словами, траектория скорости во времени будет представлять собой «треугольник». В [65] говорится о том, что наиболее выгодно распределить время разгона и торможения двигателя таким образом, чтобы на разгон отводилось $2/3$ общего времени подачи, а на торможение – оставшаяся $1/3$.

Учитывая постоянство данного соотношения попытаемся уменьшить время позиционирования трубы. Очевидно, что это возможно осуществить только увеличив максимальную скорость. Возможность такого увеличения будет рассмотрена в следующем параграфе.

Особым режимом работы привода подачи является процесс срыва трубы с оправки. В работе Остроухова В.В. [87] утверждается, что удар механизма подачи о трубу при срыве имеет неупругий характер. Доказывается данный тезис вычислением возможного перемещения трубы. Автор рассуждает следующим образом. При упругом ударе вся энергия сжатых винтов передается трубе. Другими словами, вся накопленная энергия переходит в кинетическую энергию движения трубы в виде импульса силы за бесконечно малое время. Тогда по закону сохранения энергии, путь пройденный трубой после соударения составит

$$s = \frac{m_T v_2^2}{2F_{\text{тр}}},$$

где m_T – масса трубы, v_2 – начальная скорость, $F_{\text{тр}}$ – сила трения.

Начальная скорость зависит от усилия срыва трубы с оправки и определяется как:

$$v_2 = \frac{F_{\text{срыва}}}{m_2}.$$

При неупругом ударе механическая энергия системы переходит во внутреннюю энергию трубы, что приводит к её нагреванию. После соударения все элементы механизма движутся как одно целое. Тогда скорость после соударения будет равна:

$$v_2 = \frac{F_{\text{срыва}}}{m_{\Pi} + m_T},$$

где m_{Π} – эквивалентная сосредоточенная масса электропривода, представляющая собой приведенные к поступательному движению механизма моменты инерции двигателя и редуктора.

После неупругого соударения обе сосредоточенные массы m_{Π} и m_T двигаются равнозамедленно под действием силы трения. Путь, пройденный кареткой и трубой, согласно закону сохранения энергии равен:

$$s = \frac{(m_{\Pi} + m_T)v_2^2}{2F_{\text{тр}}}$$

Далее, подставив в уравнения численные значения автор приходит к выводу о том, что при упругом ударе труба переместится после удара на значительно большее расстояние, чем при неупругом. На основании сравнения двух моделей с экспериментом делается заключение о том, что удар является неупругим т.к. величина перемещения, полученного экспериментально, имеет тот же порядок, что и вычисленное перемещение при упругом ударе.

Однако, мы считаем, что меньшее перемещение трубы обусловлено не упругим характером удара, а очередным попаданием её в валки прокатной клетки. В [65] приведены диаграммы скорости, подтверждающие данное утверждение (рис. 1.4). Как видно из рисунка, время за которое происходит равно-

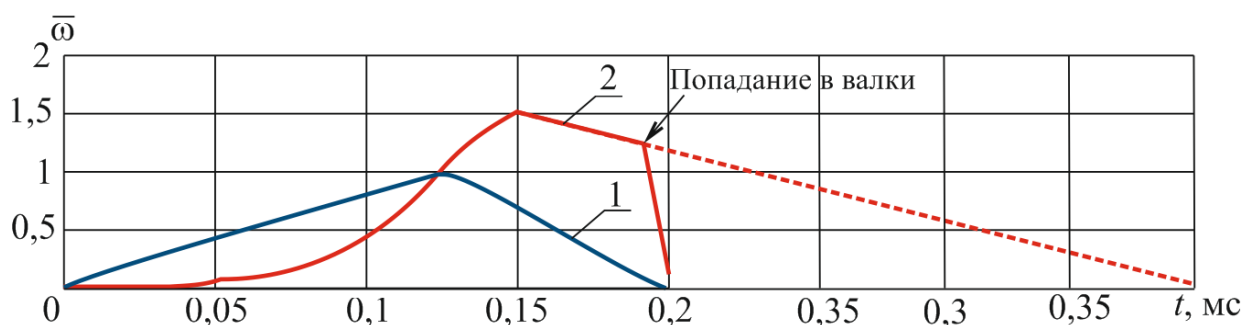


Рис. 1.4. Диаграмма скорости привода подачи при срыве трубы с оправки двигателя (1) и трубы (2)

замедленное движение трубы под действием силы трения в два раза больше времени за которое труба проходит путь до остановки под действием попадания в валки прокатной клетки.

1.4. Анализ нагрузочных диаграмм электропривода с позиции точности

К производимой с помощью стана холодной прокатки труб продукции предъявляются достаточно высокие требования по метрологическим показателям. Так, согласно [15] разнотолщинность обсадных труб должна находиться в пределах допуска, составляющего в пределе 0,1 мм. Известно, что в позиционных электроприводах основными проблемами являются перерегулирование и статическая ошибка $\Delta\alpha = \alpha_{\text{зад.}} - \alpha_{\text{уст.}}$.

Вопрос точности позиционирования является актуальным и для систем с переменными параметрами. Так, в случае привода подачи, в зависимости от размеров, массы и податливости трубы существенно могут изменяться статический момент на валу двигателя, а также приведенный к нему момент инерции масс всей системы. Данное обстоятельство существенно осложняет процесс синтеза и наладки параметров регуляторов (положения, скорости, момента).

Система подачи трубы в общем случае может рассматриваться как многомассовая. Однако, опираясь на доказательство, приведенное в [110], данную систему можно представить в виде двухмассовой (рис 1.5).

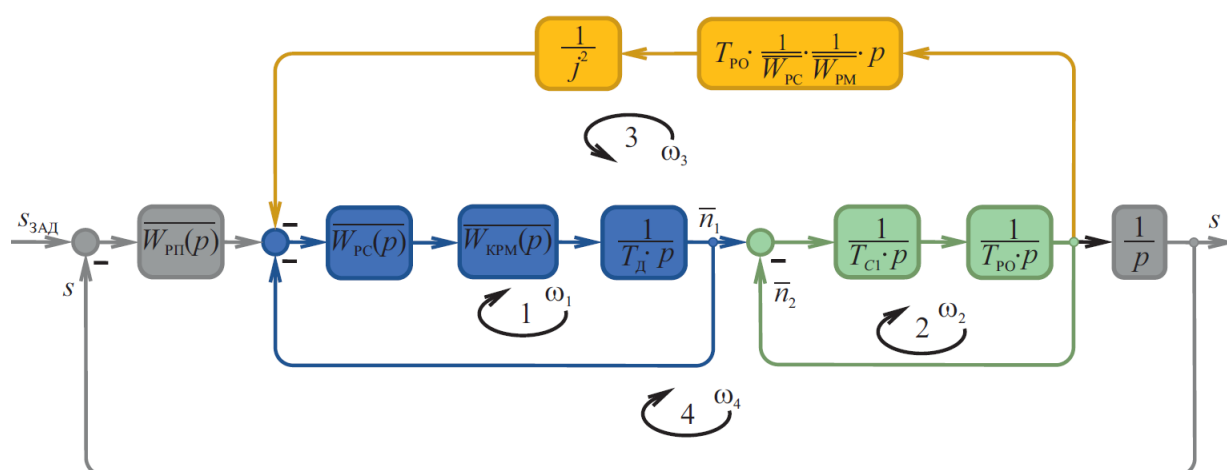


Рис. 1.5. Двухмассовая система электропривода подачи

Обобщенную структуру привода подачи можно представить как совокупность нескольких контуров: 1 – контур регулирования скорости, характеризующийся частотой среза $\omega_1 = \frac{k_{PM} \cdot k_{PC} \cdot k_{DC}}{J_{PO}}$, 2 – контур, учитывающий упругость винтовой передачи, характеризующийся частотой резонанса $\omega_2 = \sqrt{\frac{C_1}{J_{PO}}}$, 3 – контур обратной электромеханической связи, обобщенным параметром для которого является его постоянная времени $\omega_3 = \frac{1}{T_M} = \frac{k_{PM} \cdot k_{PC} \cdot k_{DC} \cdot j^2}{J_{PO}}$, 4 – контур регулирования положения, речь о настройке которого подробно пойдет позже.

Для начала определим соотношение между вышеуказанными частотами и на основании полученных результатов анализа воспользуемся рекомендациями по настройке, приведенными в [145].

В первую очередь рассмотрим контур упругости, поскольку именно здесь практически нет возможности воздействовать на его параметры. По данным завода изготовителя жесткость винта составляет $C_1 = 26 \cdot 10^7$ Н/м. Масса трубы в зависимости от её возможных параметров, приведенных в Табл. 1.1 может варьироваться от 180 до 3000 кг. Тогда приведенный к валу момент инерции трубы, рассчитанный как $J_T = \frac{m_{\text{трубы}}}{\mu} \left(i_{\text{ВП}} \frac{z_1}{z_3} \right)^2$, где μ – КПД винтовой передачи, $i_{\text{ВП}}$ – коэффициент передачи винтовой пары, $\frac{z_1}{z_3}$ – передаточное число редуктора; будет лежать в пределах от 0,02 до 0,3 кг·м² [87]. Жесткость трубы находится в диапазоне $(9 \dots 275) \cdot 10^7$ Н/м. Используя вышеуказанные данные можно рассчитать диапазон частоты резонансного максимума $\omega_2 = 30 \text{--} 80$ рад/с. Следует отметить, что амплитуда данного резонанса может достигать $A_m = 3 \dots 5$, что заметно усложняет настройку системы и значительно влияет на качество переходных процессов, в частности на точность позиционирования.

Параметры звеньев контура 1 более доступны для регулирования. В существующей системе суммарный момент инерции двигателей равен $J_{\text{дв}} = 30$ кг·м². Настройку регулятора скорости рекомендуется производить таким образом, чтобы частота среза ω_1 получалась порядка 100...120 рад/с.

Наконец, величина, обратная электромеханической постоянной времени может легко варьироваться, например, изменением передаточного числа редуктора j . Данное воздействие, согласно методике, предложенной профессором Усыниным Ю.С., может значительно уменьшить величину вышеуказанного резонансного максимума, что позволит значительно улучшить динамические показатели электропривода в целом и повысит точность позиционирования заготовки.

Так, например, для случая, когда $\omega_2 < 1/T_m$ рекомендуется подбирать передаточное число редуктора таким образом, чтобы частота ω_3 была максимально приближена к ω_2 . В этом случае резонансный характер результирующей частотной характеристики переходит в монотонный.

Зачастую в сложных системах, описываемых дифференциальными уравнениями третьего порядка и выше обеспечить требуемую точность простыми методами становится практически невозможно. В этом случае выбирают другой путь, позволяющий уменьшить статическую ошибку по положению – применение структур с модальным управлением. Суть его сводится к следующему.

В системе, приведенной на рис. 1.5 введем обратную связь по каждой из координат прямого канала (рис 1.6). Таким образом у нас получится 4 контура

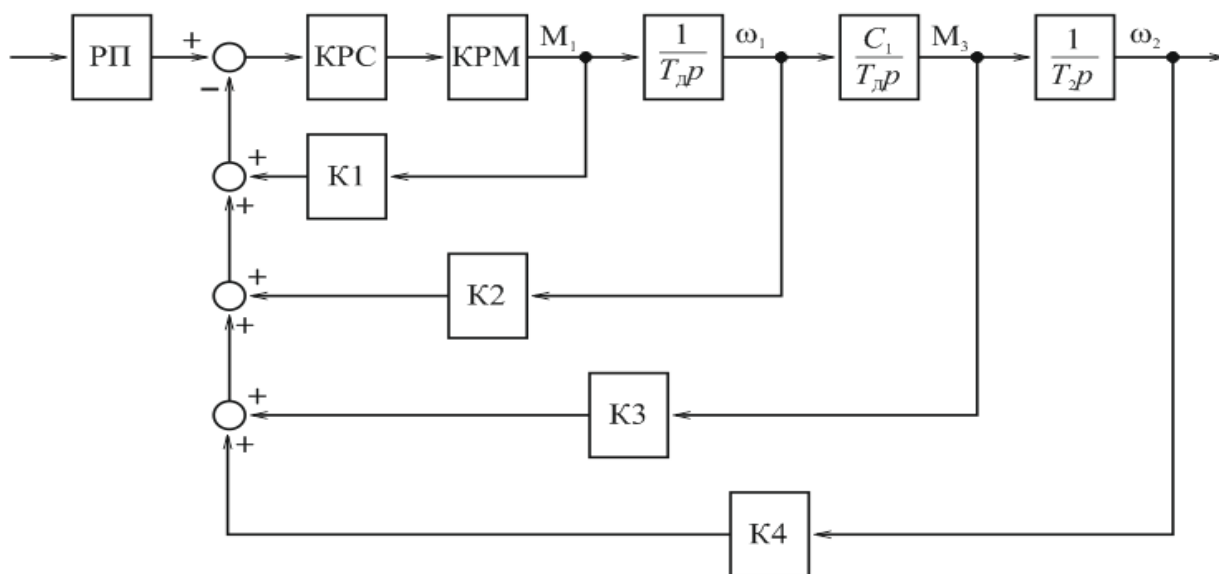


Рис. 1.6. Структура модального управления

регулирования: момента M , скорости вала двигателя n_1 , момента упругости M_y и скорости перемещения каретки n_2 . Настройку начнем с контура момента, выполним его максимально быстродействующим, выбрав соответствующую величину коэффициента k_1 . Далее, варьируя величину коэффициента обратной связи контура скорости вала двигателя k_2 , добьемся постоянной времени данного контура $T_2=(2\dots4)T_1$. Настройку всех последующих контуров произведем аналогичным образом. В конечном итоге получим систему, в которой постоянная времени каждого последующего внешнего контура будет в $2\dots4$ раза больше. Перекрестные связи можно учесть двумя способами: либо привести к сумматору, расположенному на выходе регулятора положения по правилам переноса, либо отбросить [148].

Получившаяся система регулирования позволяет достичь высоких динамических показателей. Однако, за счет большого числа обратных связей требует большого количества датчиков, что ведет к существенному её удорожанию. Для решения этой проблемы принято использовать «наблюдатели» – устройства, вычисляющие в режиме реального времени координаты привода по одному или нескольким, доступным для измерения сигналам. С учетом развития современной микропроцессорной техники реализация данных устройств не представляет особой сложности. Однако, следует отметить, что полноценно просчитать все координаты реального объекта с учетом возмущающих воздействий и внешних факторов практически невозможно. Для увеличения точности расчета наблюдатель обычно охватывают обратной связью по положению (рис 1.7).

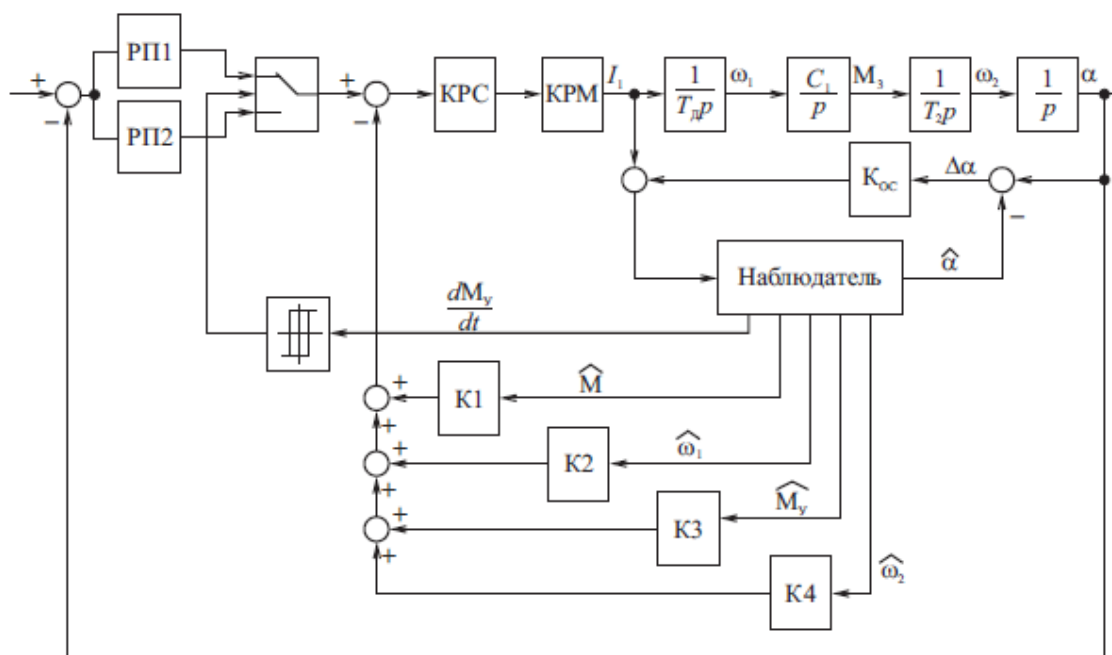


Рис. 1.7. Структурная схема модального управления привода подачи

Отличительной особенностью приведенной схемы является выбор структуры регулятора положения в функции производной момента упругости по времени. Такое решение позволяет упростить передаточную функцию самого регулятора.

1.5. Недостатки существующих решений

Дадим оценку предельных возможностей существующей системы.

Технический прогресс XXI века во многом обусловлен развитием полупроводниковой техники. Современные транзисторные преобразователи частоты работают с несущей частотой инвертора до 20 кГц. При этом амплитуда тока IGBT-транзисторов может достигать 1кА. Несомненно, такое развитие преобразовательной техники оказывает существенное влияние на работу электроприводов.

Рассмотрим частотно-токовое управление электроприводом [148]. Каждая фаза двигателя в этом случае запитана от индивидуального преобразователя, выполненного по мостовой схеме выпрямления. Управляющие импульсы поступают на ключи таким образом, чтобы ток фазы соответствовал

заданному. Реализуется это обычным охватом преобразователя обратной связью по току. В такой системе быстродействие контура тока будет ограничено лишь возможностью коммутационной аппаратуры. В случае применения в качестве ключей транзисторов, частота среза контура тока может достигать 1500 рад/с. Данное обстоятельство объясняет причину, по которой транзисторные преобразователи постепенно вытесняют тиристорные, у которых частота среза контура тока в случае вышеприведенного примера ограничена значением в 200 рад/с. Кроме того, для закрытия тиристора необходимо подавать на него отдельный импульс, что безусловно, усложняет систему управления.

На сегодняшний день на стане ХПТ-450 Челябинского трубопрокатного завода установлен тиристорный синхронный электропривод подачи. Существующее техническое решение имеет ряд недостатков. Анализ нагрузочных диаграмм электропривода показал, что постоянная времени контура тока составляет порядка 54% от времени разгона. Обусловлено это несколькими причинами:

- наличие постоянной времени задержки тиристорного преобразователя;
- неизбежность бестоковой паузы при раздельном управлении вентиляльными группами;
- Ограниченность полосы равномерного пропускания частот за счет канала АЦП-ЦАП;
- Ограниченная полоса равномерного пропускания частот тиристорного модуля;
- Наличие люфтов в механической системе.

Остановимся подробнее на каждом из этих пунктов. Отпирающие импульсы подаются на ключи тиристорного преобразователя в зависимости от сигнала регулятора тока. Адекватно оценить величину выпрямленного напряжения можно только за период хотя бы одной полуволны. Данный временной промежуток и является постоянной времени задержки тиристорного преобразователя. На рис. 1.8 показана зависимость постоянной времени задержки в

зависимости от угла отпирания тиристорov. Данная диаграмма была предложена Р. Шёндфельдом и основана на среднестатистических значениях.

В приводе постоянного тока зачастую имеется необходимость обеспечения реверса. Для того чтобы ток через двигатель начал протекать в противоположном направлении вводят дополнительную группу вентиляев. Если теперь в такой системе нам потребуется обеспечить переменный ток, данные группы будут работать по очереди. Важным здесь является то, что в силу наличия собственной индуктивности электрической машины, ток не может прекратиться мгновенно и не исключена ситуация, когда ток протекает ещё по вентилям одной группы, а в этот момент начинают коммутировать ключи второй группы. Для того, чтобы исключить такой режим важно обеспечить бестоковую паузу при раздельном управлении вентильными группами, необходимую для восстановления запирающих свойств тиристорov. Естественно, данное обстоятельство приводит к просадке действующего значения тока и момента (рис.1.2).

В электрической машине электромагнитный момент создается только первой гармоникой тока. Она и определяет частоту вращения ротора. Большая часть высших гармоник, относительно которых ротор вращается с наибольшими скольжениями создают отрицательный электромагнитный момент, который снижает результирующий вращающий момент на валу двигателя [8].

Оценить несинусоидальность тока можно по формуле

$$v = \frac{1}{\sqrt{1 + \sum_{n=2}^{\infty} \frac{I_{1(n)}^2}{I_{1(1)}^2}}}, \quad (1.1)$$

где $I_{1(n)}$ – действующее значение n гармоники первичного тока.

Наличие бестоковой паузы может существенно влиять на гармонический состав тока. Доля первой гармоники может существенно снижаться, что, как

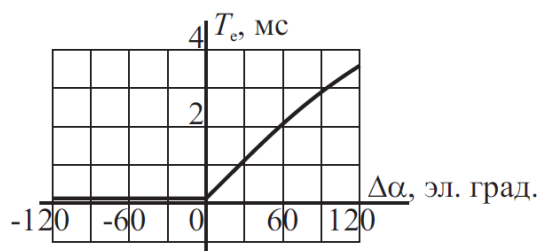


Рис.1.8. эквивалентное запаздывание шестипульсного преобразователя

было сказано выше, приведет к ухудшению удельных и регулировочных показателей электропривода, в частности отношения M/I .

Количественно время бестоковой паузы может существенно варьироваться, и зависит в первую очередь от скорости электропривода и, соответственно частоты питающего напряжения. Переключение вентиляльных групп происходит в функции сигнала датчика тока в цепи нагрузки. Чувствительность таких датчиков на примере хорошо зарекомендовавшей себя на рынке компании LEM может составлять 1–10%. Срабатывание датчика в зоне нечувствительности делает необходимым увеличение времени бестоковой паузы. Дело в том, что после отключения импульсов управления ток нагрузки, протекающий через оставшийся в работе тиристор, под действием отрицательной полуволны анодного напряжения должен спасть до нуля раньше, чем знак анодного напряжения вновь изменится на положительный. Иначе ток, который по факту еще не уменьшился до нуля, начинает вновь возрастать. Система управления при этом, получив сигнал с датчика нулевого тока, формирует отпирающие импульсы другой вентиляльной группы, что приводит к аварийной ситуации.

Для того, чтобы обезопасить себя от таких режимов время бестоковой паузы увеличивают до значения, когда ток «гарантированно» уменьшится до нуля. В [47] предлагается рассчитывать уменьшение мгновенного значения тока i от уставки I_0 до нуля по формуле

$$i = [I_0 + \sin(\psi + \varphi_H)]e^{-\frac{\omega_0 t}{\operatorname{tg} \varphi_H}},$$

где $\varphi_H = \operatorname{arctg}\left(\frac{\omega_0 L_H}{r_H}\right)$, ψ —начальная фаза, отсчитываемая от момента изменения знака анодного напряжения преобразователя с плюса на минус до момента равенства тока нагрузки уставке I_0 .

Однако, данная формула справедлива лишь в пределах работы преобразователя в зоне непрерывных токов. На рис. 1.9 представлена зависимость времени задержки в функции индуктивности нагрузки и тока уставки. Ток, при котором непрерывный режим работы вентиля сменяется на прерывистый

называется граничным и зависит от угла отпирания тиристорov и индуктивности нагрузки:

$$I_{d \text{ гр}} = \frac{BU_2}{\alpha x_a + x_d} \sin \alpha,$$

где коэффициент B зависит от схемы преобразователя, $B=0,22$ для $m=6$.

На рис. 1.9 зона граничных токов обозначена для случая, когда $\sin \alpha = 1$, при увеличении угла отпирания данная граница будет смещаться «к нам».

Для оценки влияния времени бестоковой паузы и угла отпирания тиристорov на коэффициент несинусоидальности воспользуемся формулой (1.1). Как видно из рис. 1.10, в большей степени наличие высших гармоник зависит от времени бестоковой паузы. При работе вентиля в непрерывном режиме угол отпирания практически не искажает синусоидальную форму тока.

Особенностью работы тиристорных преобразователей частоты с непосредственной связью является невозможность увеличения частоты фазного напряжения выше частоты сети $f_c=50$ Гц. Однако, при работе на частотах выше 25 Гц наблюдается заметное уменьшение первой гармоники тока, и как следствие уменьшение действующего момента. Таким образом можно сделать вывод о том, что без ухудшения динамических и удельных показателей M/I увеличение скорости электропривода подачи возможно только до частоты питающего тока порядка 25 Гц.

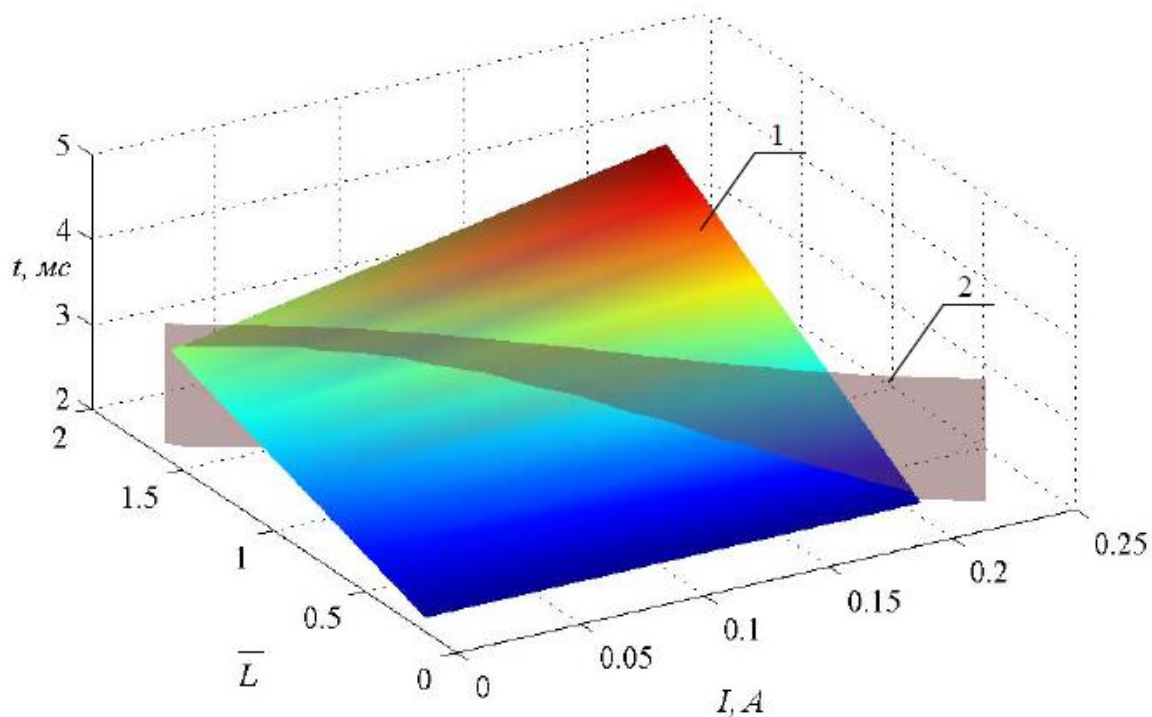


Рис. 1.9. Зависимость t бестоковой паузы от индуктивности нагрузки и тока уставки 1 и область граничных токов 2

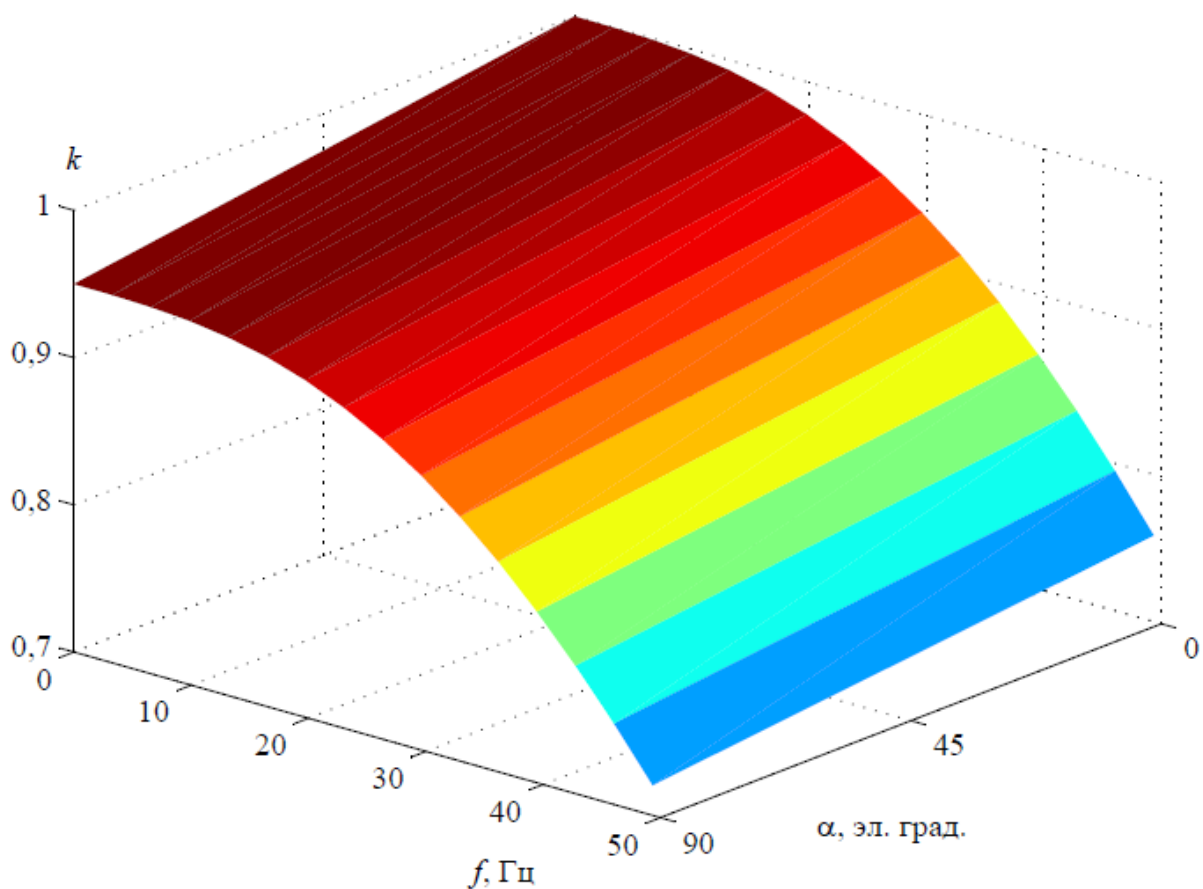


Рис. 1.10. Зависимость коэффициента несинусоидальности тока от его частоты и угла отпирания вентилей тиристорного преобразователя

Еще одной причиной низкого быстродействия контура тока существующей системы является ограниченность полосы равномерного пропускания частот блока АЦП. Как говорилось ранее, частота среза контура тока тиристорного преобразователя может достигать в пределе 200 рад/с. Однако сигнал задания, формирующийся посредством микропроцессорной техники проходит преобразование из аналоговой формы в цифровую. В существующей системе такое преобразование происходит с определенной задержкой. Частота среза всей системы будет ограничена частотой среза контура, включающего АЦП. Дело в том, что управление ключами преобразователя частоты с непосредственной связью, выполненного на базе тиристорного преобразователя Mentor 2 компании Control techniques производится посредством микропроцессорной системы управления. Аналого-цифровое преобразование сигнала задания на микроконтроллер происходит в фоновом режиме. Аналитически оценить время задержки на эту процедуру становится достаточно затруднительно. Такая оценка была дана на основании экспериментально снятых частотных характеристик, полученных с помощью прибора «Вектор» [71]. Поскольку на работающем объекте проведение такого эксперимента является затруднительным, частотные характеристики снимались на аналогичном оборудовании в лаборатории «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Южно-Уральского государственного университета. На рис. 1.11, а представлена функциональная структура эксперимента. Как видно из рис. 1.11, б частота среза контура тока (2) составляет порядка 200 рад/с, что в 2 раза больше, частоты среза контура (1), содержащего АЦП и микропроцессорную систему.

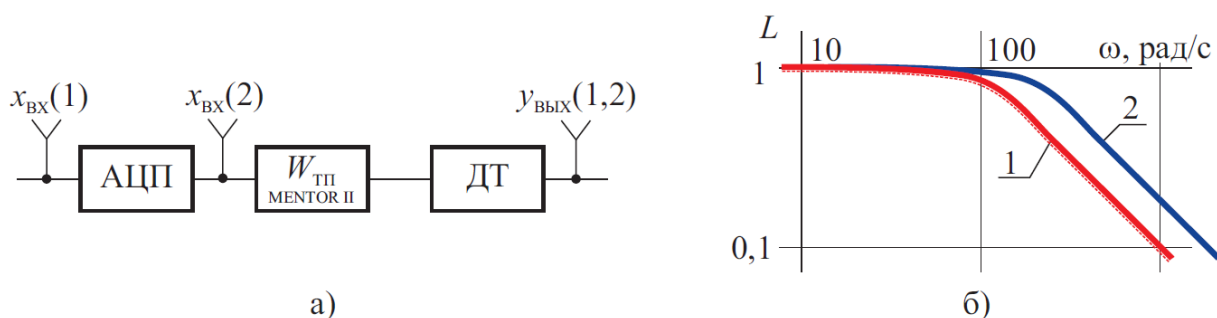


Рис. 1.11. Структурная схема эксперимента (а) и частотные характеристики (б) канала АЦП (1) и контура тока тиристорного преобразователя (2)

Проведенный анализ позволил выявить «слабые» места в аппаратной и силовой части существующей системы. Однако большую роль в увеличении быстродействия контура тока играет программная часть или система управления.

1.6. Выводы по первой главе

1. Модернизация электропривода подачи позволит снизить процент брака выпускаемой продукции, что даст значительный экономический эффект;

2. Главным недостатком существующего технического решения является низкое быстродействие контура момента, которое обусловлено низкой коммутационной возможностью тиристорного преобразователя, наличием задержки канала АЦП-ЦАП. Кроме того, из-за необходимости бестоковой паузы в работе тиристорного преобразователя увеличивается коэффициент несинусоидальности тока, что приводит к уменьшению действующего электромагнитного момента двигателя.

3. Одним из возможных решений вышеуказанной проблемы в существующей системе электропривода является применение модального управления в системе управления. Такое решение позволит повысить быстродействие системы на 5–7% без снижения точности позиционирования. Однако для достижения наибольшего эффекта есть смысл произвести модернизацию силовой части оборудования. Тогда придется вновь пересмотреть в комплексе систему преобразователь–двигатель с позиции быстродействия и точности.

ГЛАВА 2. ВЫБОР СИЛОВОЙ ЧАСТИ ОБОРУДОВАНИЯ

Существующие математические модели электропривода не позволяют оценивать возможности электротехнического комплекса с позиции их предельных возможностей. С другой стороны значительное усложнение математического аппарата (с учетом распределенного характера параметров системы) ведет к существенному усложнению математического описания и не позволяет в инженерной практике использовать предлагаемые математические модели.

Целью главы ставится обоснование необходимости и достаточности тех или иных уточнений математической модели на каждом из этапов проектирования.

2.1 Математическая модель механизма подачи трубы

2.1.1 Модель электромеханического преобразователя

Сегодня в силу высокого развития силовой полупроводниковой преобразовательной техники наиболее распространенным в промышленном применении является частотнорегулируемый асинхронный электропривод. Однако современные технологии производства предъявляют более высокие требования к быстродействию, перегрузочной способности и надежности систем электроприводов. В этой связи уместно рассмотреть другие варианты исполнения части электромеханического преобразования.

Лучше всего вышеуказанным требованиям отвечает синхронная реактивная машина независимого возбуждения (*Field regulated reluctance machine*). Большую работу в усовершенствовании конструкции данной машины проводил в своих исследованиях Е.В. Кононенко [64]. Однако в силу того, что все образцы были ведомые сетью, достичь высоких энергетических показателей не удавалось. Во многом это объясняется необходимостью иметь запас по углу между векторами потокосцепления ротора и статора для того чтобы избежать опро-

кидывания машины. В случае с электродвигателем, управляемым от преобразователя, такое ограничение отсутствует, и основной задачей становится оптимизация геометрии машины и законов управления.

Применяя новые подходы к управлению приводом можно достичь существенных результатов. Так, компания АВВ сегодня выпускает линейку электроприводов с синхронной реактивной машиной. По данным компании, инженерам удалось разработать привод, с масса-габаритными показателями на 40% лучше по сравнению с АД. Кроме того, отсутствие обмоток в роторе СРМНВ улучшает энергетические показатели машины, и, поскольку в этом случае отсутствует противо ЭДС, защита преобразователя от перенапряжения становится излишней.

Эти результаты могут быть получены при детализированном моделировании процессов, в частности методом конечных элементов. Данный метод широко применяется для решения задач прикладной физики, в частности электродинамики. Математическим фундаментом в этом случае является система дифференциальных уравнений классической электродинамики Максвелла.

Существует множество программных продуктов, позволяющих пользователю проводить МКЭ требуемый анализ, не вникая глубоко в математический аппарат (*ANSYS, ELCUT, MATLAB, FEMLAB* и др.) Наиболее подробно технология расчета описана в [117]. Суть её сводится к тому, что пользователь создает модель для плоско-параллельной или пространственной постановки задачи, задает свойства материалов, нагрузки в виде токов, напряжений и т.д., определяет граничные условия и параметры конечно-элементной сетки. Далее производится непосредственно расчет, результатом которого является картина полей для каждой точки модели (для каждого узла всех КЭ), а также возможность вычисления интегральных показателей. Наиболее интересным для нас является электромагнитный момент, создаваемый машиной.

В [72] описан принцип определения электромагнитного момента посредством тензора напряжений Максвелла. Преимуществом описанной в данной

статье методики является то, что при повороте ротора нет необходимости перестраивать КЭ сетку всей модели, т.к. зазор вручную разделяется на три «слоя», крайние из них прилегают к статору и ротору, а после поворота сетка генерируется заново только для «среднего слоя». В выбранном же нами КЭ продукте *ANSYS Maxwell* это делается автоматически.

Прежде чем переходить к результатам, хотелось бы отметить ключевые особенности конечно-элементной модели. В первую очередь важным является вопрос генерации конечно-элементной сетки. Критерием оптимизации машины являлся электромагнитный момент, вычисляемый в плоско-параллельной постановке задачи с помощью тензора напряжения Максвелла относительно оси z :

$$M = \{z\} \cdot \frac{1}{\mu_0} \int_S \{r\} \times [(\dot{n} \cdot \{B\})\{B\} - \frac{1}{2}(\{B\} \cdot \{B\})\dot{n}] ds,$$

где $\{B\}$ – магнитная индукция

$\{Z\}$ – единичный вектор вдоль оси Z

$\{r\}$ – радиус-вектор в глобальной декартовой системе координат

\dot{n} – нормаль к поверхности

Поскольку данный интеграл берется по исследуемой поверхности, в нашем случае ротора, критичным здесь было точно разбить зазор. В нашем случае точность разбиения зазора выбрана в 10 раз больше точности разбиения ротора. На рис. 2.1 приведена конечно-элементная сетка 2D расчета.

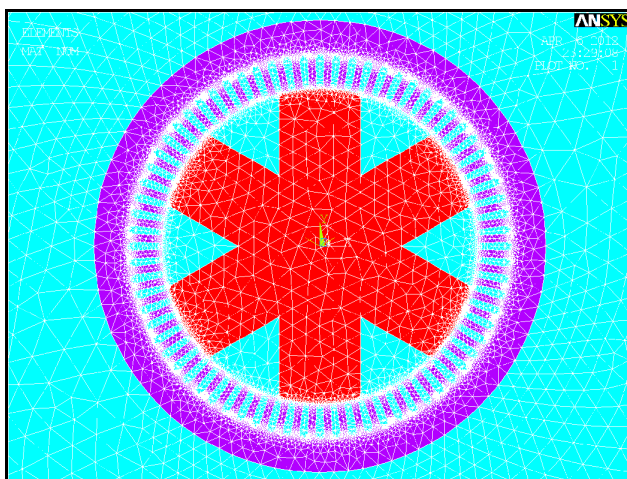


Рис. 2.1 – Конечно-элементная сетка

Важным в применении данного метода является принятие нескольких допущений. Так, мы не учитываем изменение магнитных и электрических свойств материалов при нагреве машины во время работы. Обмотку принимаем идеально уложенной в паз с учетом коэффициента заполнения. При

расчете задачи в плоско-параллельной постановке не учитываются краевые эффекты, поля рассеивания учитываются только в радиусе 0,5 м от края машины.

Верификация моделирования производилась посредством сравнения угловых характеристик электрических машин в диапазоне мощностей от 2 до 15 кВт. Данный эксперимент проводился на асинхронных, синхронных и синхронно-реактивных машинах. Под угловой характеристикой мы понимаем зависимость электромагнитного момента на валу двигателя от угла поворота ротора при постоянстве тока статора. Сходимость с натурным экспериментом составила 95%. Подробнее данный эксперимент будет описан далее.

2.1.2 Улучшение массогабаритных показателей электрической машины

На первом этапе стояла задача оптимизации электрической машины. Имея возможность глубокого анализа электромагнитных полей в машине, необходимо обратить внимание на несколько обстоятельств. В первую очередь при проектировании электрической машины обращается внимание на участки насыщения. Условно говоря, принято, что индукция в зубцах не должна превышать 1,9 Тл, в спинке 1,6 Тл, и в роторе 1,4 Тл. Это эмпирические данные, полученные из условий нагрева машины. Исходя из этих условий, на первом этапе производилась оптимизация отношения диаметра ротора к диаметру статора.

Оптимальным получилось соотношение $Dp/Dc=0,7$. При большем значении этого параметра индукция в спинке статора превышает допустимые пределы. Следует отметить, что и в случае традиционных машин принято бороться с

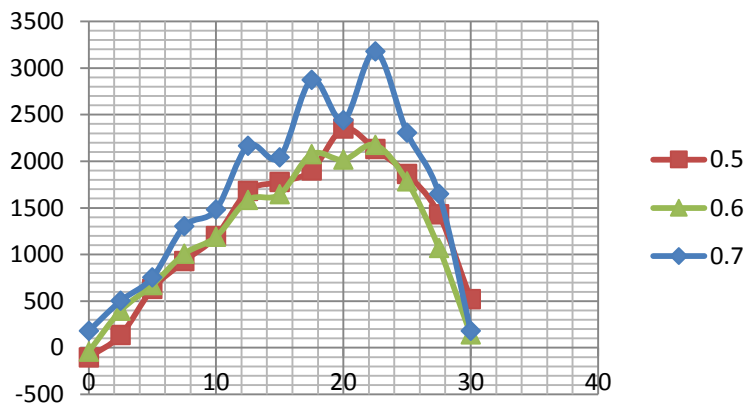


Рис. 2.2 Оптимизация Dp/Dc

насыщением спинки, в нашем же случае, это обстоятельство получается положительным. По сравнению, например, с машинами постоянного тока, нам приходится создавать большой ток возбуждения, но напряжение

при этом требуется меньшее вследствие меньшей мощности, т.к. обычная однослойная обмотка имеет меньшее сопротивление, чем обмотка возбуждения машины постоянного тока. Это в свою очередь ведет к уменьшению мощности преобразователя.

Также важным остается вопрос величины пазов. Широко известен принцип, что чем больше мы хотим насытить машину, тем больше «меди» мы должны в нее заложить. Поскольку в электроприводе с СРМНВ нет тяжелых условий пуска, и как следствие, эффект вытеснения тока не наблюдается, нет смысла делать пазы глубокими.

Так или иначе, все вопросы оптимизации электрической машины сводятся к максимальному увеличению отношения Ld/Lq . В нашем случае это означает необходимость минимизации поперечной составляющей потока на полюсе ротора. Очевидным способом реализации этого условия является оптимизация отношения ширины полюса к межполюсному промежутку.

Критерием оптимизации, как и в предыдущем эксперименте, является электромагнитный момент, создаваемый машиной. Для того чтобы понять природу поперечной составляющей потока рассмотрим магнитное поле машины как совокупность поля возбуждения и реакции якоря. Запитаем для

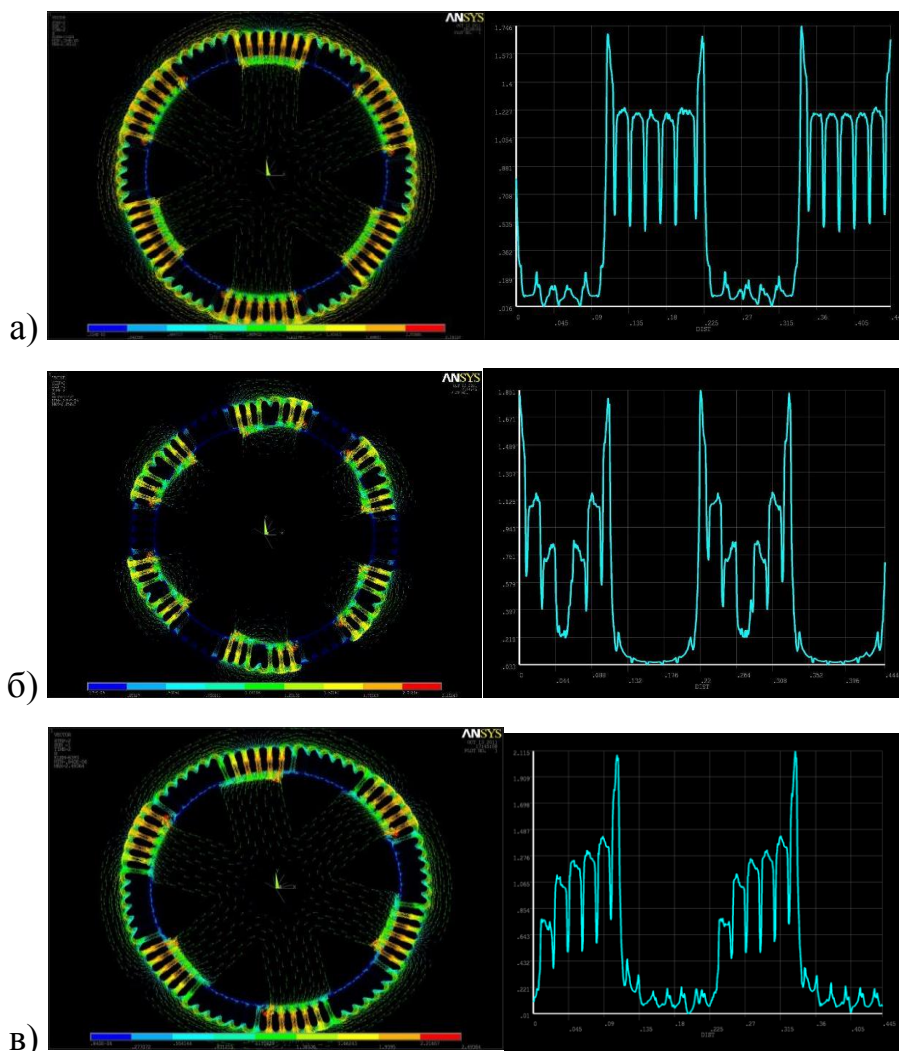


Рис. 2.3 Распределение индукции в машине и график индукции в зазоре для случаев: а) возбуждение б) якорь в) рабочий режим

начала только обмотку возбуждения, т.е. обмотку, расположенную в данный момент над межполюсным промежутком. На рис. 2.3, а показана картина индукции в поперечном разрезе машины и её распределение вдоль зазора.

Без учета «просадок» над пазыми, индукция имеет

прямоугольную форму. Теперь будем пропускать ток только по обмотке

В данном случае индукция взята по модулю, однако, как видно из рисунка, над одной половиной полюса вектор B направлен к ротору, а над другой половиной к зубцам статора. Относительно 0 данный график также симметричен. По сути, именно реакция якоря вносит поперечную составляющую потока.

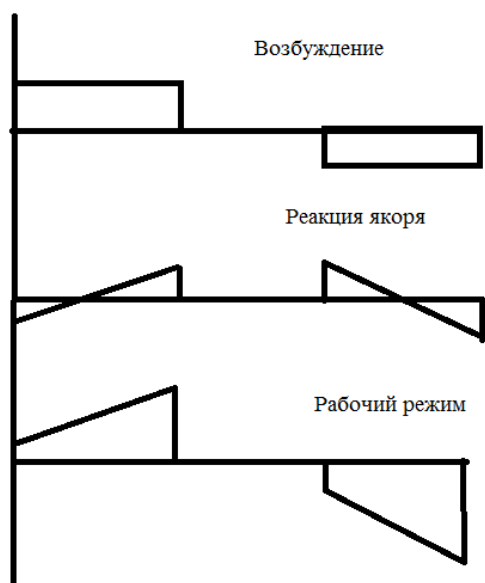


Рис. 2.4 График индукции в зазоре

При нормальном режиме работы индукция в зазоре суммируется, как это показано на рис. 2.4, что также было подтверждено при моделировании методом конечных элементов. Картина индукции в зазоре для рабочего режима приведена на рис. 2.3, в.

Данное описание приведено для случая, когда отношение полюсной дуги к полюсу равно 0,5. Если теперь мы будем делать полюс более широким, это приведет к тому, что поле, созданное якорной обмоткой, будет замыкаться в роторе точно так, как это происходит в спинке. В крайнем случае, когда ротор представляет собой сплошной круг, момент не создается вовсе,

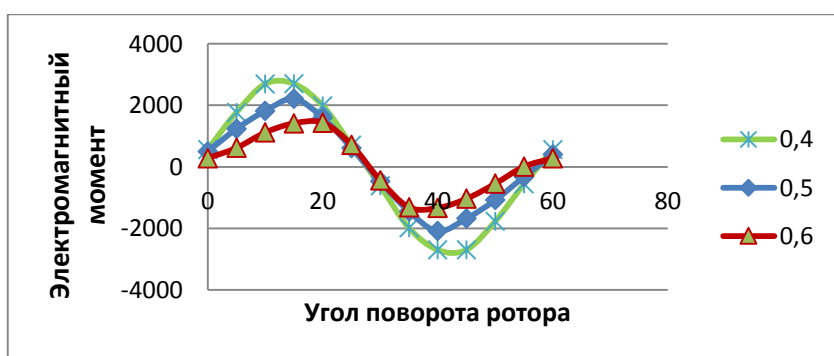


Рис. 2.5 Оптимизация ширины полюса ротора в характерных точках

мент не создается вовсе, т.к. поля возбуждения и якоря уравниваются друг друга. Чрезмерное сужение полюса сделает неэффективным использование пазов якорной обмотки, расположенных у краев полюса. Оптимальным является соотношение полюсной дуги к полюсу равное 0,4. На рис. 2.5 приведены результаты оптимизации в характерных точках.

Другим распространенным способом борьбы с поперечной составляющей потока является использование магнитонепроводящих вставок в роторе. Чаще всего такие вставки выполняются из алюминия. Суть данного метода проиллюстрирована на рис. 2.6. Поскольку магнитный поток не может проходить через материал с μ близким к 1, то наличие таких вставок вдоль продольной оси магнитного контура препятствует изменению его направления.

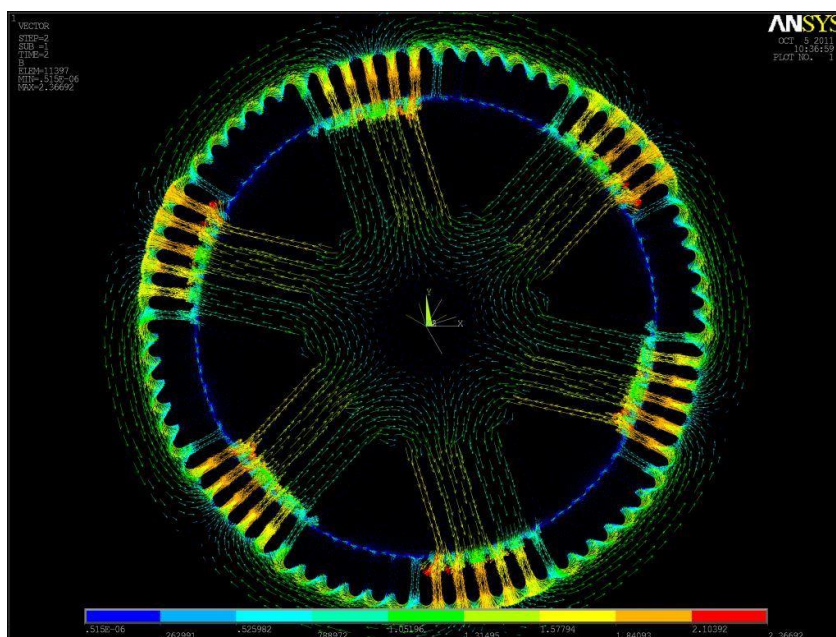


Рис. 2.6 Картина поля при использовании параллельных магнитонепроводящих вставок

конструкцию ротора. На рис. 2.6 приведен оптимальный вариант расположения параллельных алюминиевых вставок.

2.1.3 Оптимизация геометрии ротора

Другим аспектом этого вопроса является технологичность и прочность ротора. Предполагается, что ротор будет делаться шихтованным. В этом случае никакой сложности выполнения дополнительных вставок нет. С точки зрения же прочности целесообразно выполнить «скругление» межполюсного промежутка, как это показано на рис.2.7.

Актуальным в этом случае остается вопрос оптимизации числа, положения и ширины таких вставок, т.к. их избыток может привести к повышению индукции в роторе выше допустимых пределов, а недостаток необоснованно усложнит

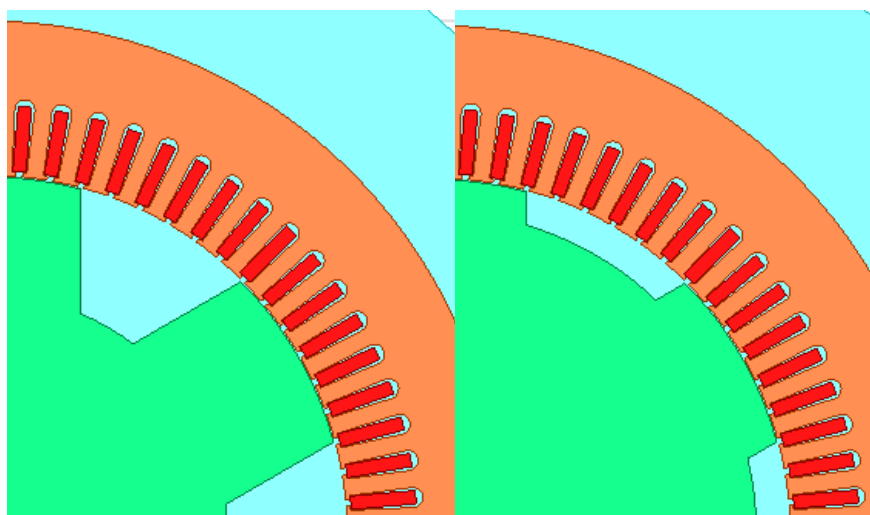


Рис. 2.7 Варьирование межполюсного промежутка

В работах [192,212] утверждается, что оптимальной глубиной межполюсного промежутка является величина, равная 20 воздушным зазорам машины. Методом конечных элементов был проведен эксперимент варьирования глубины межполюсного промежутка от 80 до 1 воздушного зазора (рис.2.8).

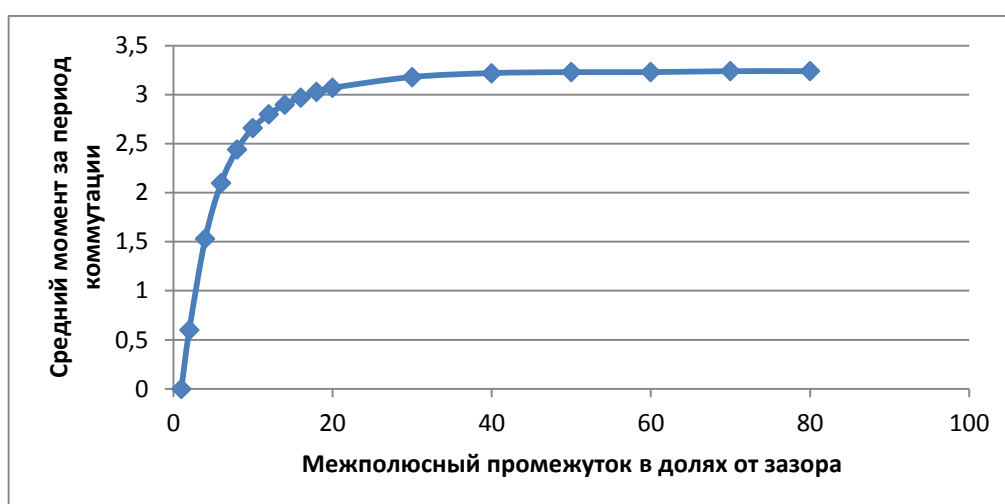


Рис. 2.8 Варьирование глубины межполюсного промежутка

Уменьшение глубины межполюсного промежутка ведет к увеличению массы ротора и снижению электромагнитного момента за счет того, что обмотка якоря создает замкнутый через ротор поток. В предельном случае, когда ротор представляет собой цельный круг, как и говорилось ранее, момент не создается вообще. Оптимальным соотношением с точки зрения прочности ротора и величины электромагнитного момента, создаваемого двигателем, является величина равная 30 воздушным зазорам.

Таким образом, используя метод конечных элементов, была произведена оптимизация геометрии машины по критерию максимума среднего электромагнитного момента за период коммутации. Средний момент СРДНВ получился всего на 5% меньше, чем у АД. Однако, величина пульсаций электромагнитного момента у СРДНВ значительно выше. Природа этих пульсаций объясняется прежде всего явнополюсностью ротора.

Традиционно для уменьшения зубцовых пульсаций применяется скос пазов статора. Для моделирования этого случая необходимо было перейти к пространственной постановке задачи. Созданная трехмерная модель состояла из 800 тыс. конечных элементов, поэтому для её решения использовался программный пакет *ANSYS APDL*, доступный в лаборатории суперкомпьютерного моделирования ЮУрГУ. Кроме того, переход к пространственной модели позволил учесть краевые эффекты, что довольно важно для машины с $L/D_c < 1$.

Как и в случае плоскопараллельной задачи следует отметить, что для корректности полученных данных необходимо было точно разбить воздушный зазор. Для этого создавался отдельный элемент, показанный на рис. 2.9.

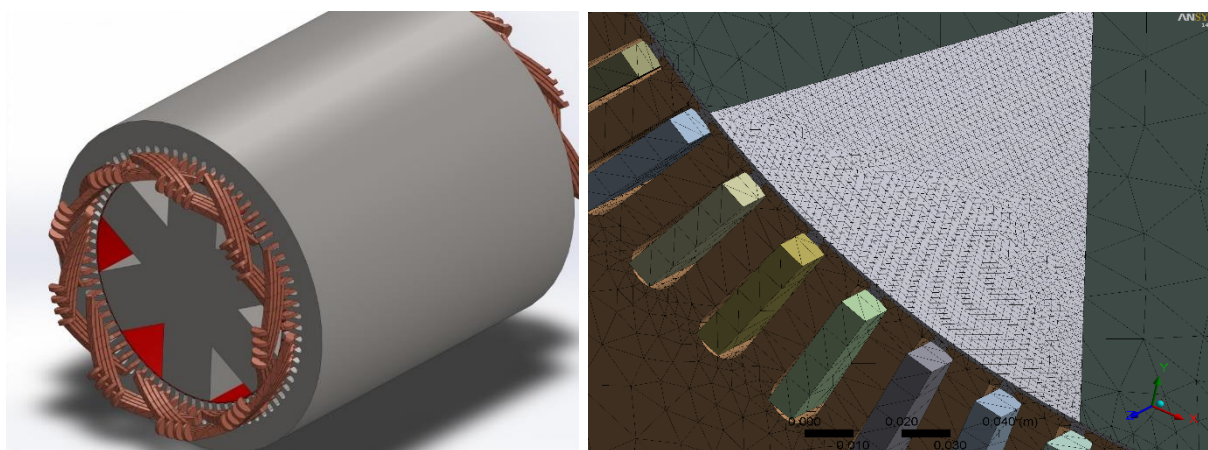


Рис. 2.9 КЭ сетка пространственной модели

Картина распределения индукции по поверхности машины приведена на рис. 2.10. В торцевой части машины она не отличается от распределения в двухмерной модели, что также свидетельствует о правомерности такого упрощения. Величина скоса пазов также варьировалась в данном эксперименте. Однако оптимальной его величиной оказался традиционный скос на одно пазовое деление.

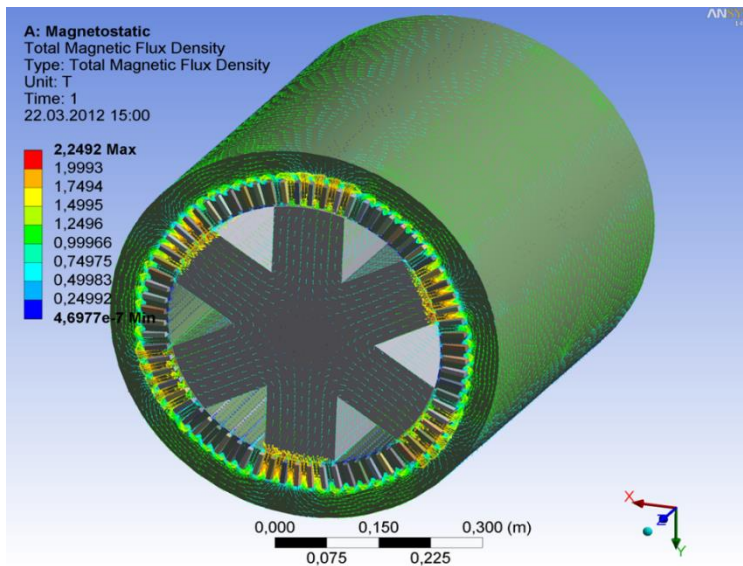


Рис. 2.10. Распределение индукции в пространственной модели

полюсностью ротора в идеальном случае необходимо выполнить его поверхность в виде окружности. Но, как уже дважды говорилось ранее, в этом случае момент машиной создаваться не будет поскольку реактивная составляющая момента отсутствует.

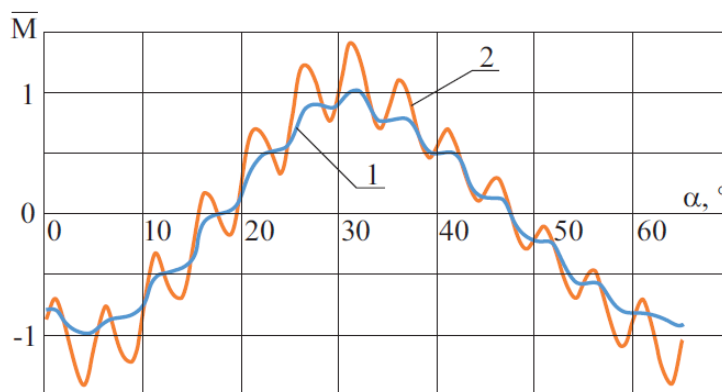


Рис. 2.11. Угловые характеристики: 1 – с учетом скоса, 2 – без учета скоса пазов статора

Данный вариант показан на рис. 2.12.

Сняв угловую характеристику для СРМНВ с радиальными магнитонепроводящими вставками на роторе, мы обнаружили, что пульсации в этом случае снизились ещё на 30 процентов. Средний момент за период коммутации уве-

На рис. 2.11 представлены угловые характеристики пространственных моделей со скосом пазов статора и без него. Эффект снижения амплитуды пульсации момента за счет применения данной технологии составляет 30%.

Для минимизации пульсаций, обусловленных явно-

Что если теперь на роторе, представляющем собой монолитный круг, используя магнитонепроводящие вставки, мы сделаем так, чтобы поле возбуждения создавалось, а для замыкания поля от якорной обмотке не было пути.

личился при этом на 10%. Однако данный ротор имеет более сложную технологию изготовления и получается менее прочным по сравнению с ротором, показанным на рис. 2.7.

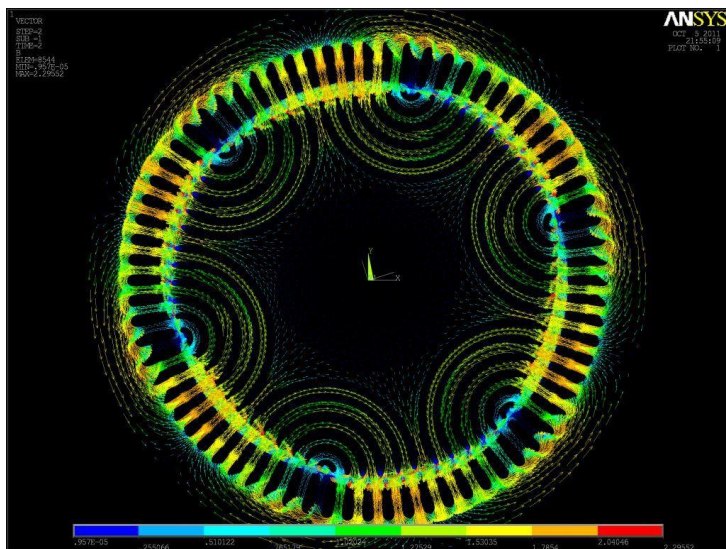


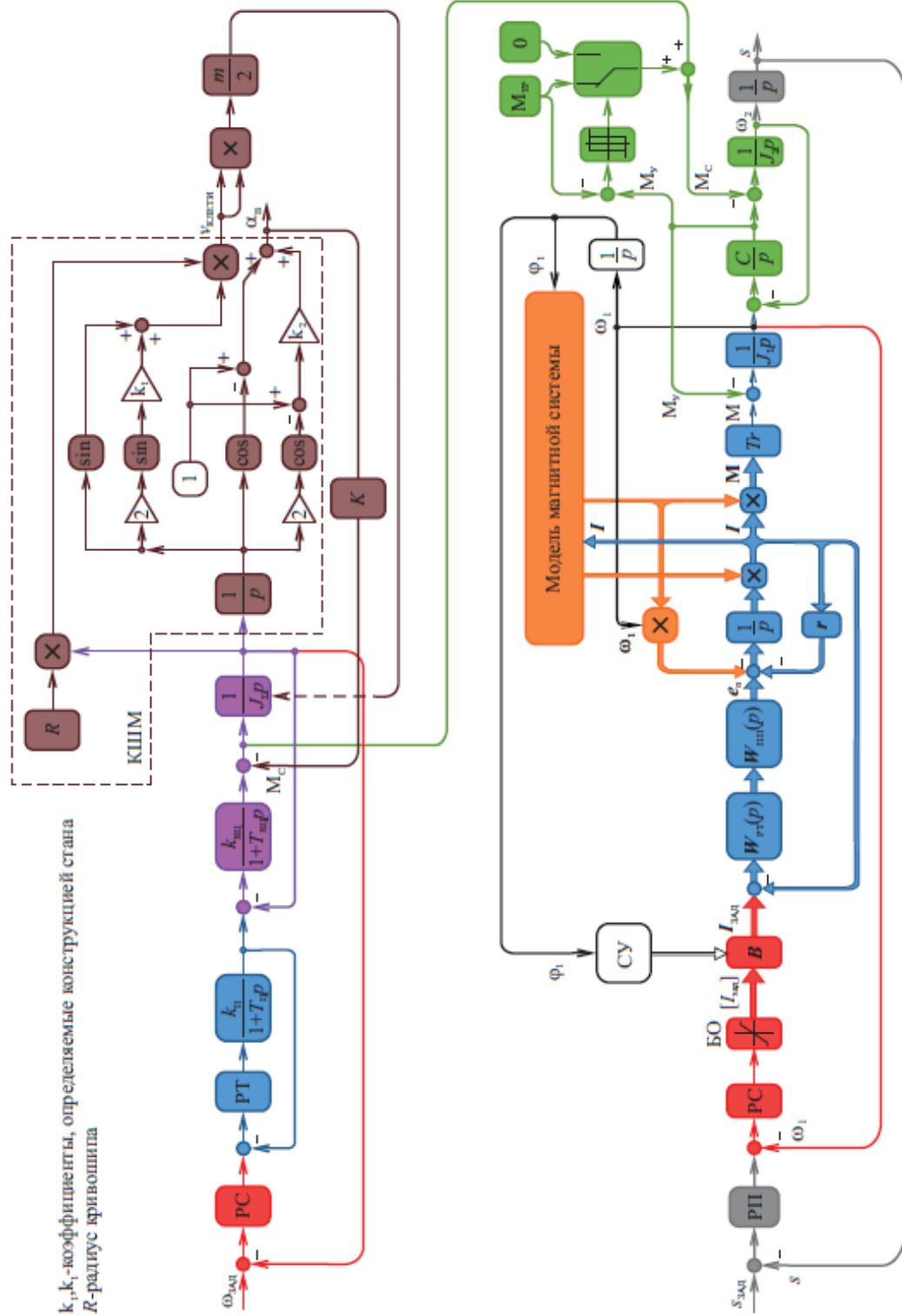
Рис. 2.12. Картина поля СРМНВ с радиальными вставками

Чтобы не прибегать к усложнению технологии производства проанализируем пути улучшения энергетических характеристик машины с явнополюсным ротором. Традиционно считается оптимальным трехфазное синусоидальное питание машины. Однако сегодня, в период интенсивного развития информационной и силовой техники,

имеется возможность улучшить энергетические показатели машины, сделав ее не сетевой, а запитав каждую фазу отдельным источником тока.

2.1.4 Модель электропривода

Моделирование процессов в электроприводе с СРМ производилось в КЭ продукте *ANSYS Maxwell*. Отличительной особенностью данного продукта является возможность его работы в связке с программой *ANSYS Simplorer*, где моделируется силовая часть электропривода и система управления, что позволяет учитывать работу электрической машины от преобразователя частоты. Также разработанная модель позволяет учесть нелинейность кривой намагничивания стали, из которой выполнена машина, насыщение источников питания, регуляторов. Структурная схема электропривода представлена на рис. 2.13.



k_1, k_2 -коэффициенты, определяемые конструкцией стана
 R -радиус кривошипа

Рис.2.13. Структурная схема двухмассовой модели привода подачи

Созданная конечно-элементная модель двигателя представлена звеном «модель магнитной системы». Система электропривода подачи выполнена в виде трехконтурной подчиненной системы управления: момента, скорости, положения. В модели учитывается насыщение регулятора скорости. В качестве сигналов задания на расчет конечно-элементной модели используются текущий угол поворота и матрица фазных токов, результатом является электромагнитный момент, создаваемый электрической машиной.

Модель учитывает упругость винтовой передачи, вследствие чего может быть представлена как двухмассовая. В качестве нагрузки выступает как приведенный момент силы трения трубы, который подается при условии, что $M_c > M_u$, так и момент сопротивления, обусловленный попаданием трубы в валки прокатной клетки. Последнее условие реализовано посредством математического описания главного электропривода, который также выполнен по подчиненному принципу на базе машины постоянного тока. Тиристорный преобразователь главного привода представлен апериодическим звеном первого порядка. Аналогичная замена выполнена для якорной цепи. Зная скорость главного привода вычисляется линейная скорость клетки и угол поворота калибров в текущий момент по формулам:

$$v_{\text{клет}} = \omega \cdot r \cdot (\sin \alpha + k_1 \sin 2\alpha),$$

$$\alpha_{\text{валков}} = 1 + \cos \alpha + k_2(1 + \cos 2\alpha).$$

Зная данный координаты главного электропривода можно на каждом шаге расчета получить момент сопротивления его движению и уточнить суммарный приведенный к валу двигателя момент инерции за счет переменной составляющей, равной $J_{\text{п}} = \frac{mv^2}{2}$.

Конечно-элементная модель электрической машины, разработанная в программном продукте *ANSYS Maxwell* интегрируется в модель системы управления, расчет обеих моделей происходит одновременно (рис.2.14). Питание машины производится от шести независимых источников тока ИТ1...ИТ6, сигнал управления на которые приходит с узла формирования фазных токов УФФТ. Амплитуда этого сигнала зависит от выхода регулятора скорости РС,

а частота переключения от скорости вращения ротора, текущее положение которого фиксируется датчиком положения ДП. Кроме того, модель позволяет имитировать статическую нагрузку на валу и варьировать момент инерции ротора.

Синтез структуры управления в установившихся режимах сводится к оптимизации зоны коммутации тока посредством корректировки сигнала, поступающего с датчика положения. Дело в том, что для обеспечения наилучших энергетических показателей необходимо, чтобы машина работала на максимуме угловой характеристике. При увеличении скорости за счет инерционности источников тока этот максимум будет смещаться. Корректирующий угол подбирается таким образом, чтобы среднеквадратичный фазный ток за период был минимальным. Более подробно решение данной проблемы будет рассмотрено в главе №4. На рис. 2.15 представлена математическая модель электропривода с СРМНВ в системе *ANSYS Simplorer*. По статорным обмоткам протекают токи, мгновенное значение которых подается на вход модели магнитной системы двигателя. Источники тока представляют собой источники ЭДС с бесконечной полосой равномерного пропускания частот, охваченные обратной связью по току. Имеется возможность слежения за текущими координатами привода, благодаря чему реализована обратная связь по скорости и работа узла формирования фазных токов в функции текущего положения ротора.

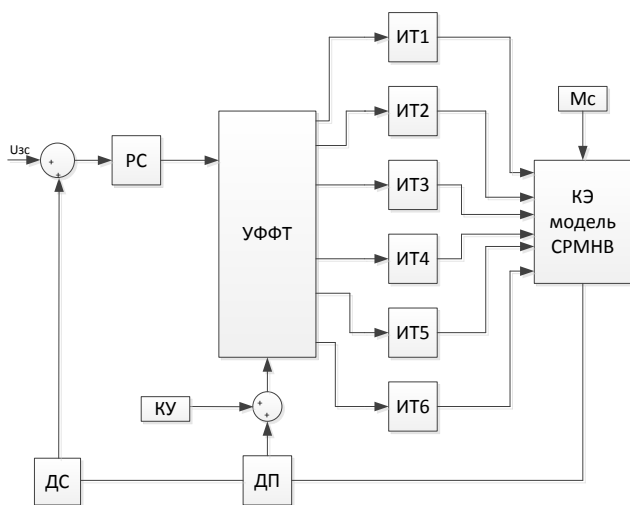


Рис. 2.14. Функциональная схема модели *Simplorer*

сти источников тока этот максимум будет смещаться. Корректирующий угол подбирается таким образом, чтобы среднеквадратичный фазный ток за период был минимальным. Более подробно решение данной проблемы будет рассмотрено в главе №4. На рис. 2.15 представлена математическая

модель электропривода с СРМНВ в системе *ANSYS Simplorer*. По статорным обмоткам протекают токи, мгновенное значение которых подается на вход модели магнитной системы двигателя. Источники тока представляют собой источники ЭДС с бесконечной полосой равномерного пропускания частот, охваченные обратной связью по току. Имеется возможность слежения за текущими координатами привода, благодаря чему реализована обратная связь по скорости и работа узла формирования фазных токов в функции текущего положения ротора.

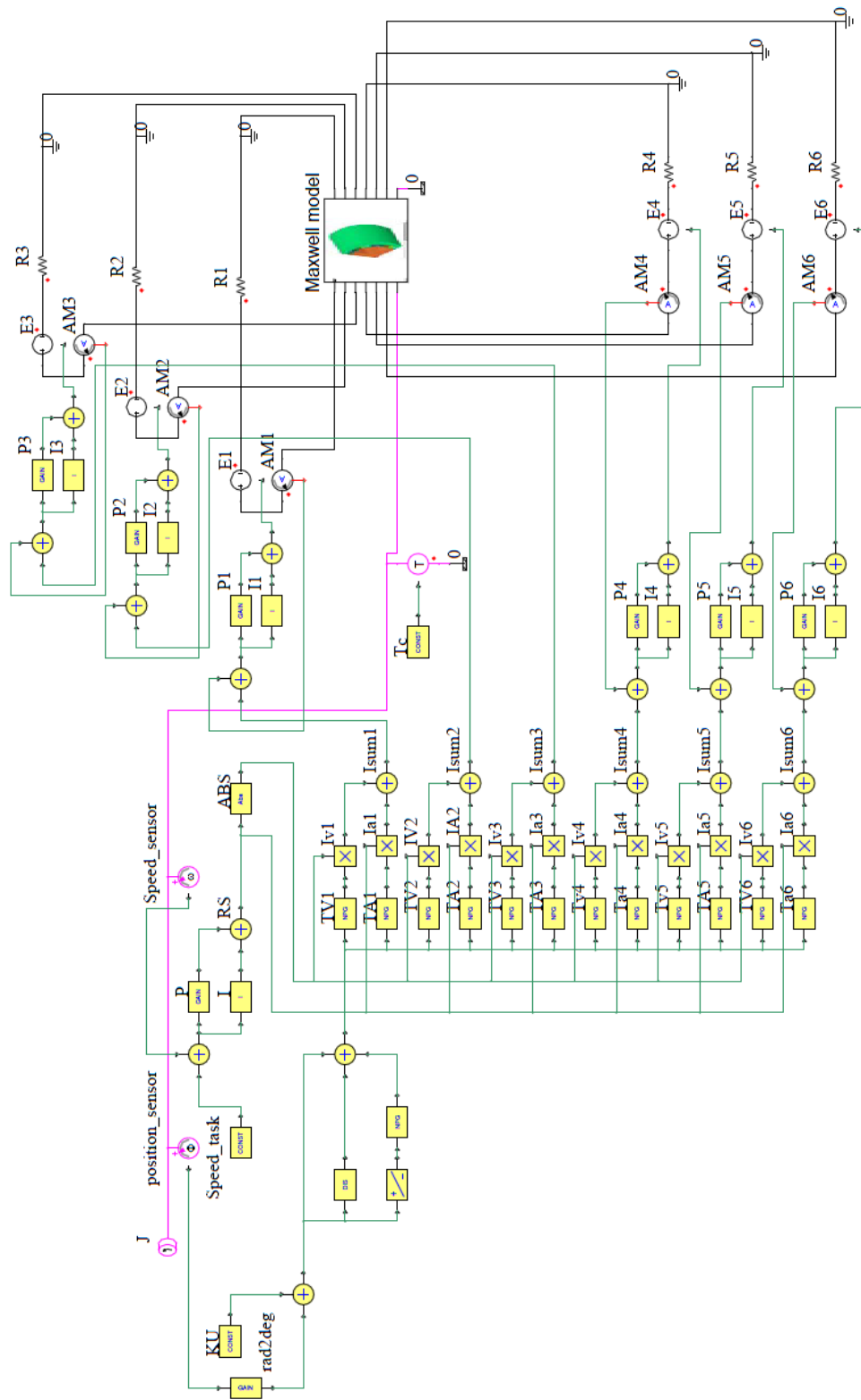


Рис. 2.15. Математическая модель СРМНВ в ANSYS Simpler

Принцип работы узла формирования фазных токов наглядно представлен на рисунке 2.16. Уровнем «1» и «-1» показаны зоны работы в зоне возбуждения и якоря. Дополнительно на эти сигналы модулируются сигналы задания, поступающие с выхода регулятора скорости. Кроме приведенной на рисунке формы сигнала в виде прямоугольника также были реализованы формы сигнала до модуляции в виде «синуса» и «трапеции». С целью обеспечения реверса модулируемый сигнал по каналу возбуждения всегда подавался по модулю.

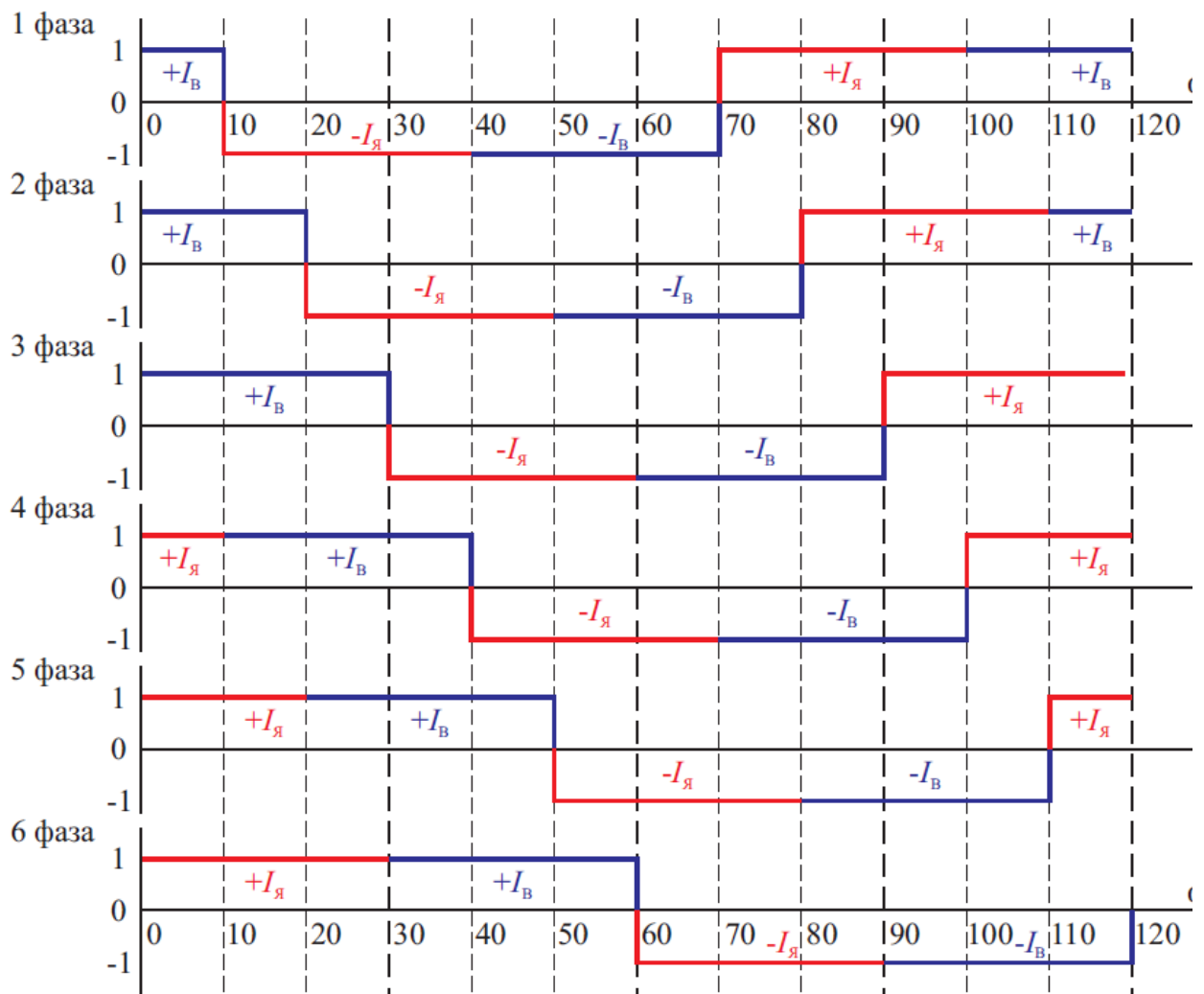


Рис. 2.16. Принцип работы узла формирования фазных токов

Отладка системы и настройка параметров регуляторов позволила добиться результатов, показанных на рис. 2.17. В данном случае на скорости вращения 1000 и 1500 об/мин производится наброс нагрузки от 0,5 до 4 Мн. Как

видно из осциллограммы скорости, привод идеально обрабатывает такое возмущение и просядок скорости не наблюдается.

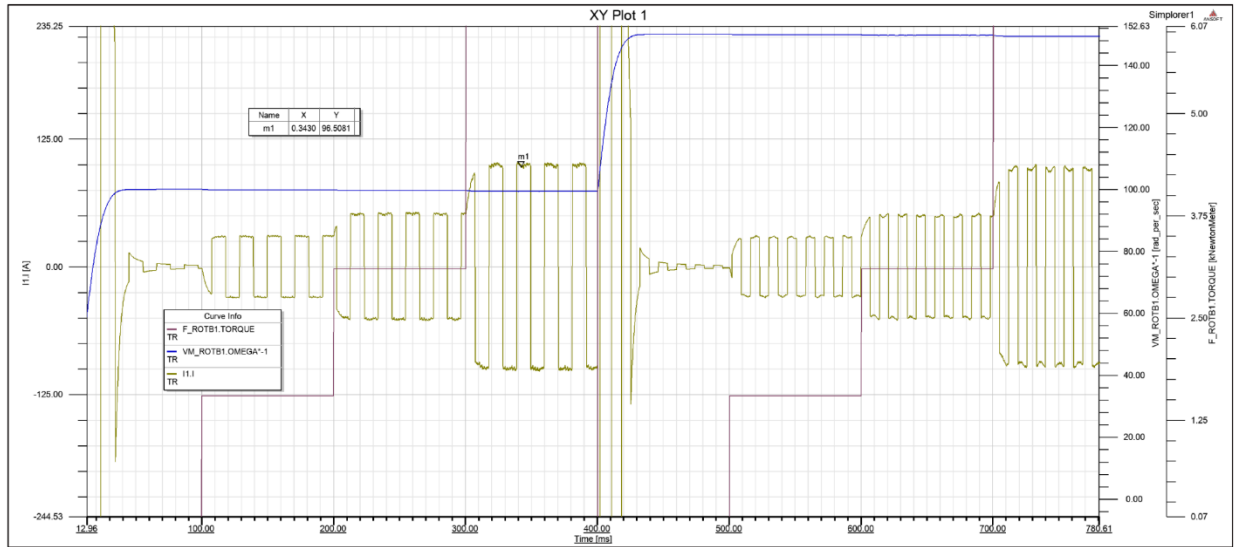


Рис. 2.17. Статика СРДНВ

Наилучшие энергетические показатели удалось получить в шестифазном электроприводе с трапецидальной формой фазного тока. Другими словами, в этом случае при постоянстве момента статической нагрузки, привод потребляет наименьший ток из сети. На рис. 2.18 представлен сравнительный анализ различных форм фазного тока и различного числа фаз питания машины.

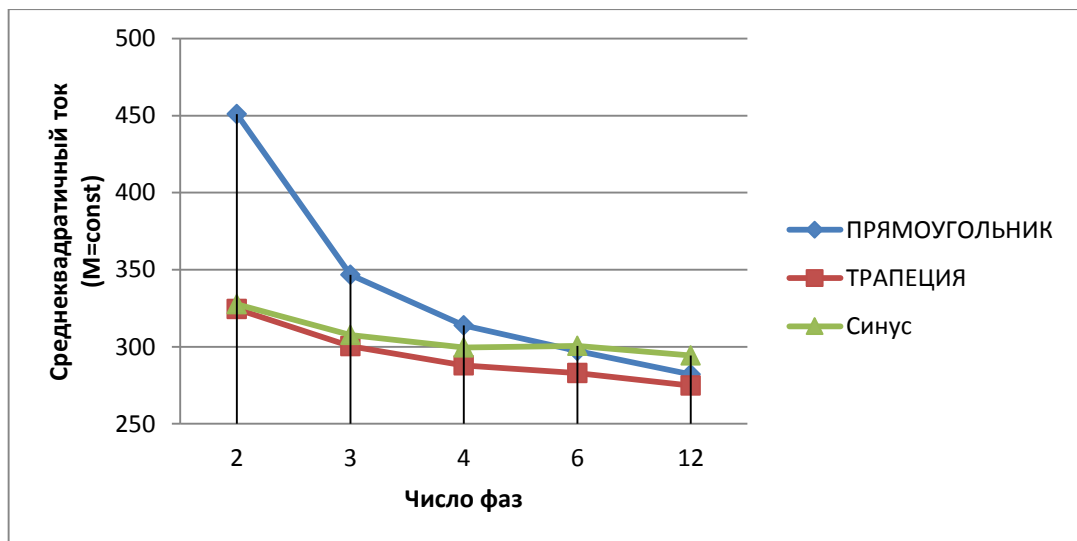


Рис. 2.18. Сравнительный анализ форм фазного тока машины

Переход к прямоугольной форме тока улучшает энергетические показатели электропривода, однако при этом появляются коммутационные пульсации мо-

мента, вызванные мгновенным переключением обмоток, и как следствие, перехода работы электропривода с одной угловой характеристики на другую (рис 2.19). Соответственно, чем меньше число фаз, тем дальше ротор отклоняется от оптимальной точки угловой характеристики.

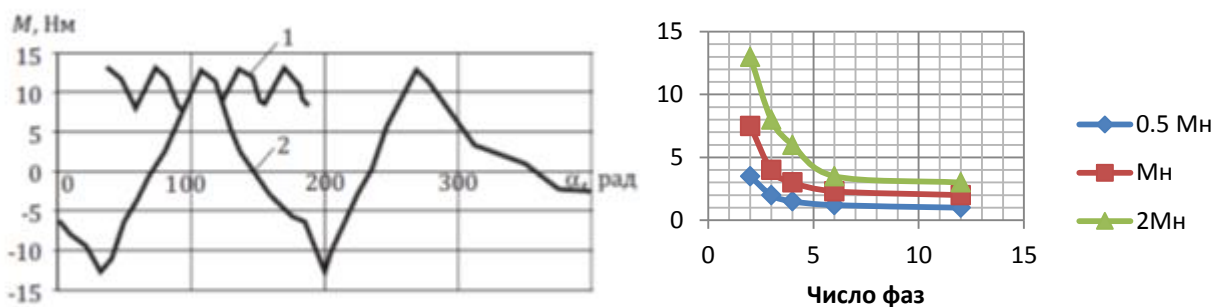


Рис. 2.19. Момент СРДНВ а) 1 – одной фазы, 2–результатирующий и зависимость амплитуды коммутационных пульсаций от числа фаз б)

В этой связи, оптимальным с нашей точки зрения является число фаз равное 6. При увеличении числа фаз схема значительно усложняется и, как следствие, удорожается. При меньшем же числе фаз заметно увеличиваются коммутационные пульсации момента, что сильно сказывается на нагреве машины.

В идеальном случае, когда число фаз привода равно бесконечности оптимальной формой тока является прямоугольник. Однако в реальном случае ток не может мгновенно изменить направление, т.к. это станет причиной перенапряжений. Особенно заметно это проявится на большей частоте коммутации. В этом случае актуальным становится переход к трапецеидальной форме фазного тока. В шестифазном электроприводе с СРДНВ такой переход дает эффект порядка 10%.

Таким образом, полученные данные, позволили нам сделать вывод о том, что оптимизация формы тока дает то же эффект, что и усложнение конструкции ротора (Таблица 2.2).

Таблица 2.2. Энергетические показатели СРДНВ

| Питание машины | M/I | |
|----------------|--------------------|--------------------|
| | Явнополюсный ротор | Ротор со вставками |
| 3 фазы, синус | 100% | 110% |

| | | |
|-----------------|------|------|
| 6 фаз, трапеция | 110% | 112% |
|-----------------|------|------|

2.1.5 Упрощенная математическая модель

Для решения поставленной задачи исследования была создана обобщённая математическая модель электропривода подачи. В работе Остроухова В.В [87] электрическая часть описывалась упрощенно, а механическая рассматривалась достаточно подробно в виде трехмассовой модели электропривода. Однако, исследования показали, что упругостью самой трубы можно пренебречь, так как частота её собственных колебаний гораздо выше частоты среза контура регулирования скорости, и при работе стана упругость трубы, вне зависимости от её массы может создавать лишь вибрацию, что не существенно влияет на характер переходного процесса. Поэтому предлагается принять модель двухмассовой.

График скорости во временной области можно условно разделить на несколько этапов:

1 – выборка зазора. Данный этап обусловлен наличием люфтов в механической системе и реализован в модели на основании экспериментальных данных (рис 2.1, б);

2 – преодоление момента статической нагрузки. На данном этапе момент сил упругости меньше M_c , обусловленного трением трубы;

3 – разгон трубы при возрастании скорости двигателя;

4 – торможение ведущей массы при продолжающемся разгоне трубы. Данный этап является одним из наиболее ответственных. Именно здесь система условно упреждающе подает сигнал на торможение двигателя, другими словами, регулятор положения переключается из положения РП1 в РП2. Существует множество методик выбора момента времени начала торможения. В нашем случае предлагается изменять структуру регулятора положения при условии $\frac{dM_y}{dt} < 0$. Очевидно, что данный сигнал не может поступать с какого-либо датчика и поэтому вычисляется наблюдателем

5 – торможение ведомой массы при торможении двигателя.

Особым режимом работы привода подачи является срыв трубы с оправки. В этом случае на 4 и 5 этапе происходит отрыв каретки с трубой от оправки, после чего труба сначала движется равнозамедленно под действием силы трения, а затем резко останавливается за счет попадания в валки. При этом график переходного процесса в точности соответствует рис 1.5. Модель контура ведомой массы при срыве трубы с оправки представлена на рис. 2.1, в.

Представленная модель выполнена с определенными допущениями. В частности, на первом этапе двигатель представлен безынерционным звеном с бесконечной полосой равномерного пропускания частот. Существующие схемы замещения двигателя (например, Т- и Г-образная) удовлетворяют требованиям приближенного исследования. Однако, данные модели не учитывают нелинейность кривой намагничивания электротехнической стали, реального распределения полей и вследствие этого для исследования модели в режимах перегрузки, которые, как показал анализ, являются актуальными для привода подачи, нуждаются в уточнении.

Рассмотрим возможные пути уменьшения времени подачи на каждом из участков. На участках 1 и 2 увеличение быстродействия возможно за счет увеличения показателей $\frac{M}{J_{\text{ЭКВ}}}$ и $\frac{M}{I}$. Увеличение максимума скорости возможно в пределах, допустимых механической прочностью узлов за счет изменения передаточного числа редуктора. Однако, при этом придется вновь возвратиться к первому этапу.

Наконец на 4 и 5 участках на первый план выходит задача увеличения точности позиционирования. Данное требование ограничивает диапазон изменение передаточного числа редуктора, что заставляет нас вновь возвращаться к 1 и 2 этапам, и пересматривать оптимум данного соотношения с учетом полученных ограничений. Также здесь важно учесть зону нечувствительности из-за наличия зубцовых пульсаций момента на малых скоростях. Остановимся подробнее на решении каждой из этих задач.

2.2 Оптимальные кривые переходных процессов в электроприводе подачи

По данным [65] оптимальным соотношением времени разгона к времени торможения является 2:1. Оптимизируется данное соотношение по критерию минимума потребляемого из сети тока при максимальном перемещении за цикл. В [148] доказывается, что оптимальной кривой скорости позиционного электропривода является равнобедренный треугольник или трапеция, т.е. соотношение времени разгона к времени торможения 1:1.

Однако, критерием оптимизации является не само перемещение, а отношение среднеквадратичного момента двигателя за время позиционирования к перемещению трубы $M_{\text{ср.кв.}}/s$, где

$$M_{\text{ср.кв.}} = \sqrt{\frac{1}{T_{\text{п.п.}}} \int_0^{T_{\text{п.п.}}} (M(t))^2 dt.}$$

Выяснилось, что весовой коэффициент среднеквадратичного момента на много больше, чем весовой коэффициент перемещения. Другими словами минимальное значение $M_{\text{ср.кв.}}/s$ будет при равном соотношении времени нарастания скорости и торможения.

В силу отсутствия обоснования данного явления в [65] выскажем ряд гипотез. Предположим, что на положение оптимума влияет наличие люфта. Тогда при том же графике скорости двигателя, что и в случае идеальной системы, труба переместится на меньшее расстояние. Будем сдвигать во времени сигнал на торможение, увеличивая тем самым время разгона (рис 2.20). Тогда при постоянстве модуля ускорения на всем времени переходного процесса

$$\overline{M_{\text{ср.кв.1}}} = \sqrt{M_{\text{п}}^2 \cdot t_{\text{п}} + M_{\text{т}}^2 \cdot t_{\text{т}}} = \sqrt{1^2 \cdot 1 + 1^2 \cdot 1} = \sqrt{2}.$$

Принимаем, что разгон осуществляется до $\bar{\omega} = 1$, время пуска $t_{\text{п}} = 1\text{с.}$, время торможения $t_{\text{т}} = 1\text{с.}$ Во втором случае, например, когда время пуска $t_{\text{п}} = 4/3\text{ с.}$, время торможения $t_{\text{т}} = 2/3\text{ с.}$, т.е. $t_{\text{п}} + t_{\text{т}}$ также равно 2с.:

$$\overline{M_{\text{ср.кв.2}}} = \sqrt{M_{\text{п}}^2 \cdot t_{\text{п}} + M_{\text{т}}^2 \cdot t_{\text{т}}} = \sqrt{\left(\frac{3}{4}\right)^2 \cdot \frac{4}{3} + \left(\frac{3}{2}\right)^2 \cdot \frac{2}{3}} = \frac{3}{2}.$$

Перемещение s трубы в системе с бесконечной жесткостью винта C , которую в общем случае можно считать одномассовой, будет равно

$$s = \int_0^{T_{\text{п.п.}}} \omega_1(t) dt.$$

В случае идеально быстродействующего контура момента, график скорости во времени будет представлять собой треугольник. Тогда перемещение можно рассчитать как площадь данного треугольника. Очевидно, что она не будет зависеть от доли времени разгона, т.к.

$$\bar{s} = \frac{1}{2} T_{\text{п.п.}} \bar{\omega} = \frac{1}{2} \cdot 2 \cdot 1 = 1.$$

При наличии люфта, равного в пределе $1/8s$, перемещение в обоих случаях будет равно $\bar{s}_1 = \bar{s}_2 = 7/8$.

Сравнивая два данных случая, можно убедиться, что

$$\frac{\overline{M_{\text{ср.кв.1}}}}{\bar{s}_1} < \frac{\overline{M_{\text{ср.кв.2}}}}{\bar{s}_2}.$$

Данное соотношение будет справедливо при любом соотношении, кроме

$$t_{\text{п}} = t_{\text{т}}.$$

Далее была выдвинута гипотеза о том, что оптимальная доля времени разгона зависит от жесткости винта. Тогда график скорости будет иметь вид, показанный на рис 1.2, а перемещение трубы можно рассчитать как

$$s = \int_0^{T_{\text{п.п.}}} \omega_2(t) dt,$$

где ω_2 приведенная угловая скорость трубы (см. рис. 2.1,б).

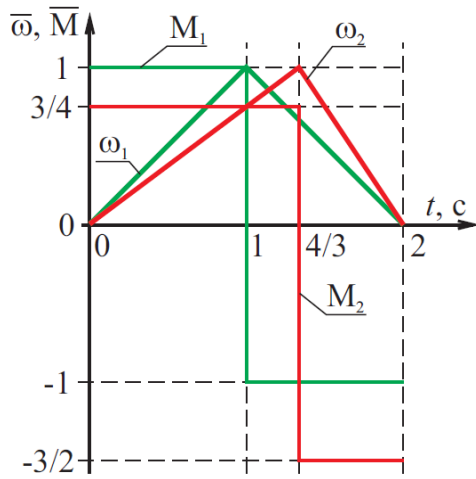


Рис. 2.20. К пояснению расчета $M_{ср.кв}/S$

Обе гипотезы также проверялись на модели двухмассовой системы. На рис. 2.21 и 2.22 приведены результаты исследований. Из графиков становится понятным, что при любой упругости винта и наличии максимально возможного люфта оптимальным остается соотношение $t_{п}:t_{р} = 1:1$. Кроме того, на рис. 2.22 можно заметить, что при значительном уменьшении жесткости винта

система становится чрезмерно податливой и при том же моменте перемещение трубы будет стремиться к 0, как и показатель M/s . При увеличении жесткости выше $\bar{C} = 120$ показатель $M/s = const$, и система в этом случае вырождается в одномассовую. Однако, данные исследования проводились при $Mс=0$, и не учитывают реального характера нагрузки.

На рис. 1.3 показаны временные диаграммы скорости при срыве трубы с оправки. Очевидно, что при позиционировании трубы наличие срыва изменяет вид графика момента сопротивления во времени с постоянного на ступенчато-образный. Это обстоятельство заставляет задуматься о необходимости оптимизации доли времени разгона во времени всего переходного процесса.

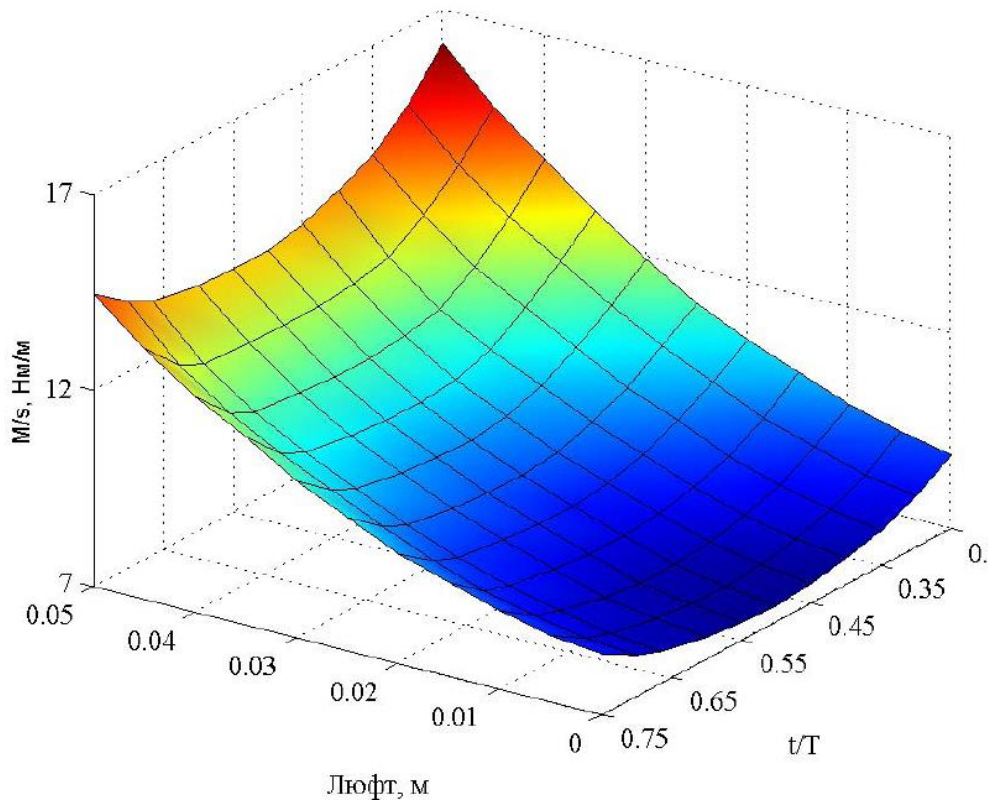


Рис. 2.21. Зависимость отношения момента двигателя M к перемещению трубы s от люфта и доли времени разгона в общем

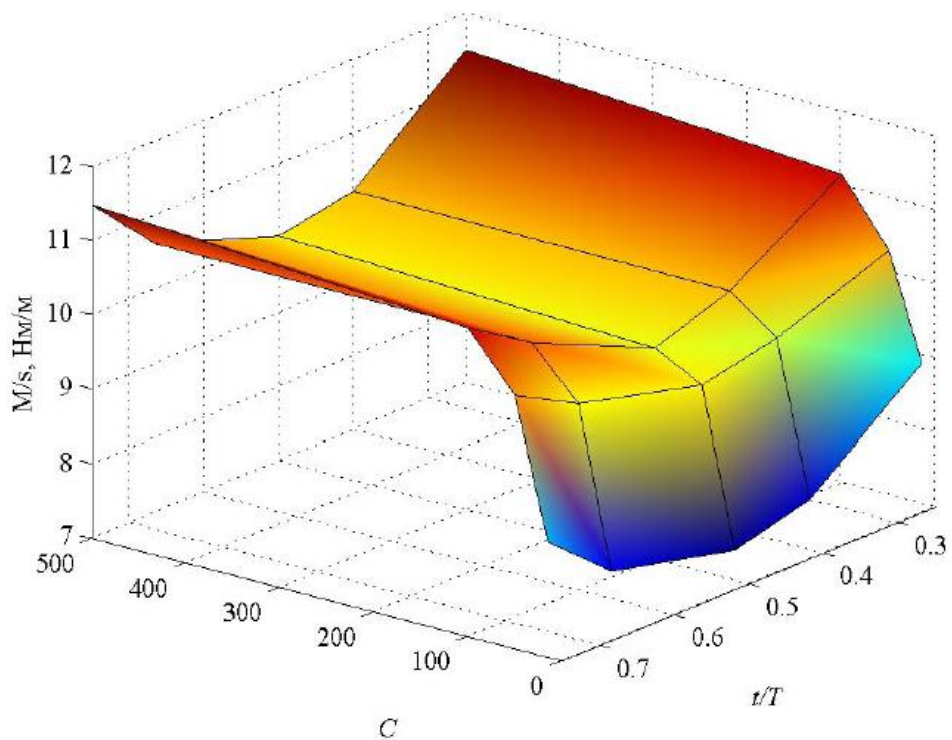


Рис. 2.22. Зависимость отношения момента двигателя M к перемещению трубы s от жесткости винта C и доли времени разгона в общем времени позиционирования..

Величина же данного скачка может варьироваться, что в существенной мере повлияет на среднеквадратичный момент двигателя за время переходного процесса и в конечном итоге на его нагрев. На рис. 2.23 представлена зависимость значения оптимального времени пуска $t_{п}/t_{ц}$ от момента срыва трубы с оправки t_{Mc} и амплитуды момента сопротивления AMc . Как и ожидалось, при отсутствии неравномерности момента ($AMc=0$) оптимальным соотношением является 0,5. При увеличении AMc оптимум сдвигается в сторону увеличения.

На рис. 2.24 показан «выигрыш» в среднеквадратичном моменте при скачкообразном изменении момента нагрузки при срыве с оправки. Осциллограммы скорости, полученные на работающем объекте, были обработаны статистически аналогично тому, как это описано в п.1.3. Поскольку реальной возможности зафиксировать изменение момента сопротивления не было, точка срыва трубы определялась косвенно по диаграмме скорости. Таким образом, удалось определить среднестатистическое время наброса нагрузки, обусловленное срывом трубы с оправки. Учитывая, что квантиль Стьюдента получился $T_C < 2,26$ для выборки из 10 экспериментов, с вероятностью 95% можно утверждать, что момент срыва трубы с оправки будет составлять $0,67t_{ц}$. Доверительный интервал для данной выборки будет составлять 0,07. Тогда, на основании статистической обработке можно утверждать, что время срыва трубы с оправки будет лежать в диапазоне $(0,6 \dots 0,75) t_{ц}$ (Таблица 2.1). Вертикальными границами на рис. 2.21 обозначена область предполагаемого времени срыва. «Выигрыш» в среднеквадратичном моменте считался для оптимального соотношения времени $t_{п}/t_{т}$ в сравнении со среднеквадратичным моментом, полученным для соотношения $t_{п}/t_{т}=1:1$. Известно, что мощность активных потерь в электроприводе определяется как $P = I^2 r$. Приближенно можно считать, что $P \approx M^2 r$. Тогда снижаться данные потери будут пропорционально квадрату от «выигрыша» в моменте.

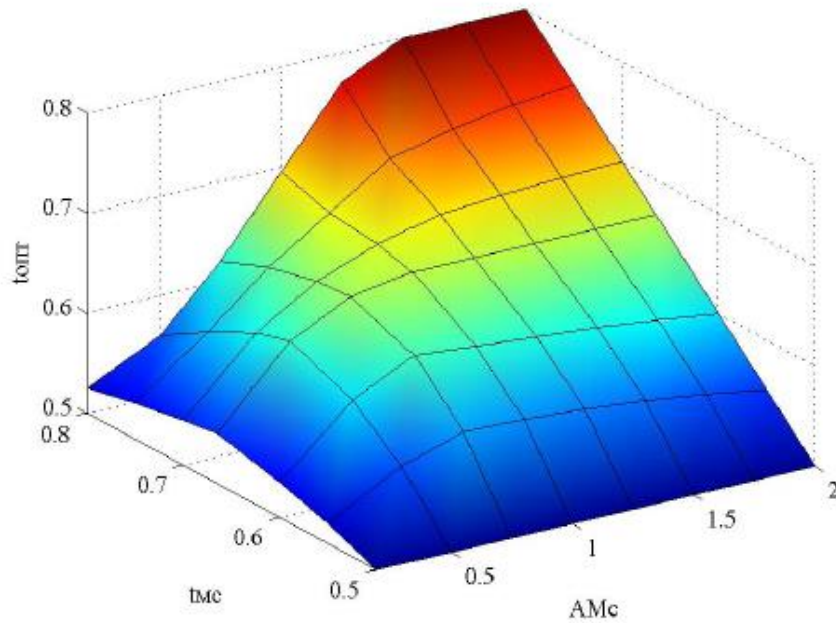


Рис. 2.23. Оптимальное соотношение $t_{п}/t_{ц}$ в зависимости от момента срыва трубы с оправки $t_{Мс}$ и амплитуды момента сопротивления $АМс$

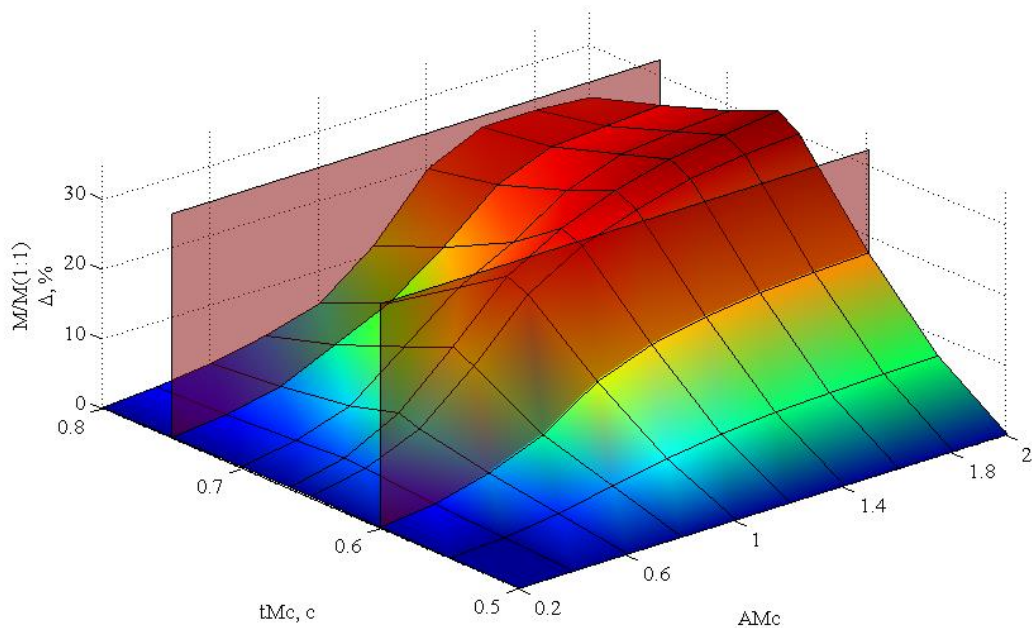


Рис. 2.24. «Выигрыш» в $M_{ср.кв.}$ при изменении доли времени разгона в зависимости от момента срыва трубы с оправки $t_{Мс}$ и амплитуды возросшего в связи с этим момента сопротивления $M_{с}$

Возвращаясь к цели, поставленной в начале параграфа, можно сделать вывод о том, что с учетом неравномерного характера нагрузки по критерию минимума $M_{ср.кв.}/s$ оптимальное соотношение времени пуска к времени разгона

электропривода может варьироваться. Рекомендуемым соотношением исходя из зависимости, представленной на рис. 2.21 является 2:1.

Таблица 2.1. Статистическая обработка времени срыва трубы с оправки

| Номер эксперимента | $t_{ц}$ | $t_{цср}$ | d | d^2 |
|--|-------------------|-----------|-------|--------|
| 1 | 0,6 | 0,67 | -0,07 | 0,0049 |
| 2 | 0,65 | 0,67 | -0,02 | 0,0004 |
| 3 | 0,68 | 0,67 | 0,01 | 0,0001 |
| 4 | 0,62 | 0,67 | -0,05 | 0,0025 |
| ... | | | | |
| 10 | 0,73 | 0,67 | 0,06 | 0,0036 |
| $s_d = \sqrt{\frac{\sum d^2 - \frac{(\sum d)^2}{n}}{n-1}}$ | 0,07 | | | |
| $t = \frac{\bar{d} - \mu_d}{\frac{s_d}{\sqrt{n}}}$ | 2,13 | | | |
| $t_{крит}$ | 2,26 | | | |
| $E = t * \frac{s_d}{\sqrt{n}}$ | 0,6 < 0,67 < 0,74 | | | |

2.3 Пути повышения точности и быстродействия

Как было отмечено в первой главе, основными требованиями, предъявляемыми к электроприводу подачи являются точность и быстродействие. Ранее для данного объекта эти задачи решались в работах Вейнгера А.М. [20], Боровика А.А. [9], Остроухова В.В [87] и частично вопросы увеличения быстродействия с целью показать возможности новых типов электромеханических преобразователей рассматривались в докторской диссертации Григорьева М.А.[28]. Изначально задача повышения точности позиционирования решалась с помощью модернизации механической части. Впервые Вейнгер А.М. показал условия и возможности применения регулируемого электропривода переменного тока. Электропривод был выполнен на базе аналоговой системы управления с совместным управлением вентильными группами. Такое решение позволило добиться точности позиционирования заготовки в пределах 10

мм. Боровик А.А. предложил бесступенчатое регулирование величины подачи. В работе был произведен синтез регуляторов координат, позволяющий обеспечить желаемые показатели качества подачи (статическая ошибка не превышала 5% при подаче до 10 мм.). Наконец, в работе Остроухова В.В. была предложена идея модернизации электропривода с использованием современной микропроцессорной системы управления. Такое решение в незначительной степени снизило быстродействие системы, однако, позволило увеличить надежность. В данной работе вопросы увеличения быстродействия и точности рассматриваются в комплексе.

Определив оптимальную кривую переходного процесса, можно сделать вывод о том, что увеличения быстродействия можно добиться только путем повышения максимальной скорости. При этом не должны ухудшиться точностные показатели. Для удовлетворения этим требованиям попытаемся определить оптимальное передаточное число редуктора. Как известно, для механизмов, работающих в повторно-кратковременном режиме, главным критерием при выборе редуктора является быстродействие при пуске и торможении. Время пуска определяется по формуле:

$$t_{\text{п}} = \frac{J_{\text{ро}} + J'_{\text{дв}} \cdot j^2}{M \cdot j \cdot \eta - M_{\text{с}}} \omega_{\text{max}},$$

где $J_{\text{ро}}$ – момент инерции рабочего органа, $J'_{\text{дв}}$ – приведенный момент инерции двигателя, j – передаточное число редуктора, η – КПД зубчатой передачи, $M_{\text{с}}$ – момент сопротивления, ω_{max} – скорость, до которой осуществляется разгон.

Очевидно, что при изменении передаточного числа редуктора для обеспечения требуемого момента на валу возможно потребуются замена двигателя. Таким образом величина $J_{\text{дв}}$ так же будет варьироваться. Для удобства анализа переходных процессов воспользуемся величиной, обратной времени пуска

$$q = \frac{1}{t_{\text{п}}} = \frac{M \cdot j - M_{\text{с}}}{J_{\text{дв}} \cdot j^2 + J_{\text{ро}}}$$

На рис. 2.25 приведена зависимость q от передаточного числа редуктора j и момента инерции двигателя $J_{дв}$. Оптимальным j для пуска на холостом ходу ($M_c=0$) является $j=0,08\dots 0,12$. Как было показано выше, электромагнитный момент привода подачи по большей части определяется динамическим моментом. Однако в случае «тяжелой» трубы, максимум q может смещаться в сторону увеличения $j=0,8\dots 1$ (рис. 2.26).

С другой стороны, обеспечив нужное ускорение при пуске, мы невольно, уменьшили время торможения

$$t_T = \frac{J_{po} + J'_{дв} \cdot j^2}{M \cdot j / \eta + M_c} \omega_{max}.$$

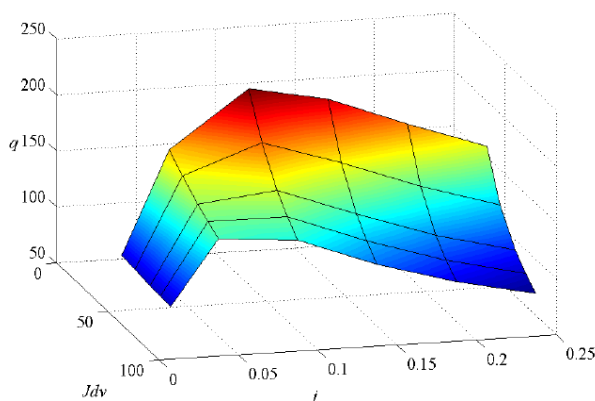


Рис. 2.25. Зависимость q от j и $J_{дв}$

Данное обстоятельство существенно повлияло на вопрос точности подачи, т.к. значительно уменьшилось время позиционирования. Вопросы точности в двух-массовой системе рассматривали подробно ученые Борцов Ю.А., Ключев В.И. Так, в [10] говорится о том, что при соотношении масс

$T_{M1}/T_{M2}=3\dots 10$ требуемой точности можно добиться правильной настройкой регулятора скорости, либо снижением быстродействия контура скорости и всей системы. В случае соотношения масс в пределах $1\dots 3$ наиболее эффективным автор указывает применение обратной связи по производной от скорости исполнительного вала. В нашем случае соотношение масс получается больше 10. Здесь автор советует применять обратную связь по производной от скорости двигателя, либо уменьшать быстродействие контура момента, что также приведет к уменьшению быстродействия всей системы.

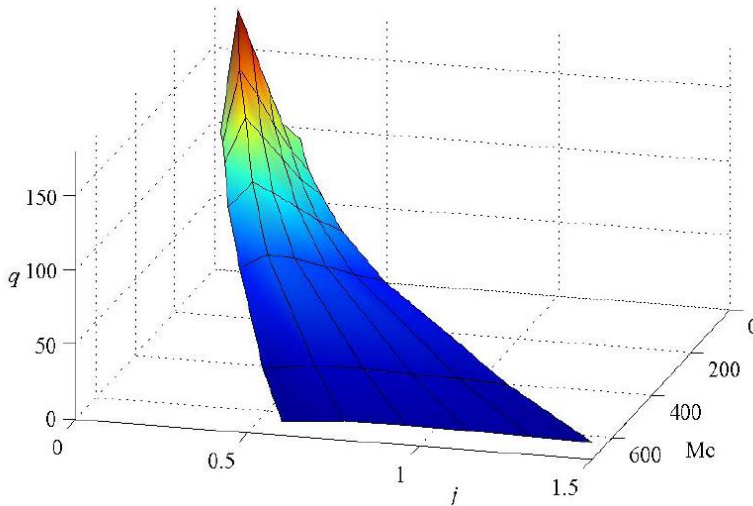


Рис. 2.26. Зависимость q от j и M_c

На наш взгляд, наиболее приемлемой в этом случае является методика, предложенная профессором Усыниным Ю.С. [145]. Существующее соотношение масс является по утверждению автора самым удобным для уменьшения ре-

зонансного максимума A_m частотной характеристики. Данные, полученные на двухмассовой модели, реализованной в *Simulink*, представлены на рис. 2.27. Как и предполагалось, увеличение $1/j$ в случае «тяжелого» двигателя ($J_{PO} \ll J_{ДВ}$) не дает эффекта снижения A_m до нуля. Для «легкого» двигателя данная методика работает практически идеально. Причем математическая модель не учитывает диссипативные силы вязкого трения за счет которых происходят самозатухающие колебания. Область оптимального передаточного числа редуктора с учетом быстродействия на участке разгона и точности при торможении может быть определена для привода подачи стана ХПТ в пределах $j=0,1 \dots 0,2$.

Анализ методик разных авторов позволяет сделать вывод о том, что в случае, когда $J_{PO} \ll J_{ДВ}$ добиться точного позиционирования либо невозможно, либо является чрезмерно трудной задачей. В этой связи наиболее рациональным решением данной проблемы в такой системе является улучшение добротности двигателя M/J . Реально, за счет ограничений по габаритам промышленных установок добиться этого можно за счет применения новых типов электрических машин с улучшенными массогабаритными показателями. Одним из примеров здесь является синхронная реактивная машина, для которой, тем не менее, вопрос улучшения массогабаритных показателей остается по сей день актуальным.

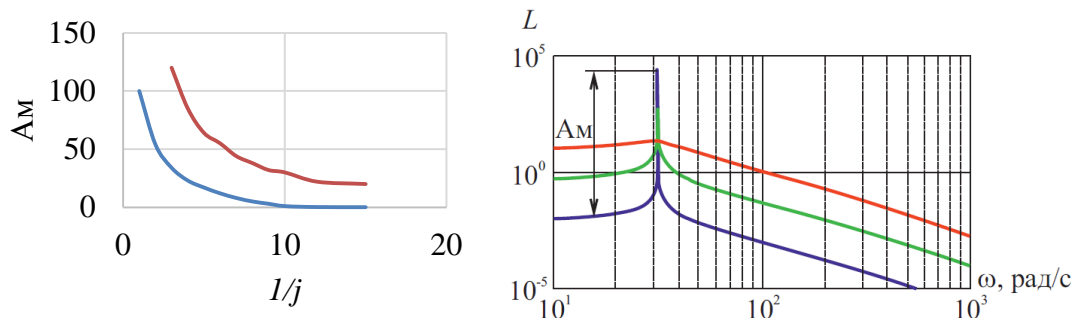


Рис. 2.27. Влияние передаточного числа редуктора на амплитуду резонансного максимума (а) и вид частотных характеристик (б)

2.4 Быстродействие контура регулирования момента

До сих пор вопросы увеличения быстродействия системы и точности позиционирования рассматривались с точки зрения оптимального передаточного числа редуктора. **При большом быстродействии контура регулирования момента КРМ и малой механической постоянной времени двигателя, воздействуя на передаточное число редуктора j , можно получить высокую точность позиционирования. Но все вышесказанное справедливо, если считать, что контур регулирования момента имеет бесконечную полосу пропускания частот. Поэтому в следующей главе будут рассмотрены пути увеличения быстродействия КРМ.**

Если теперь мы заменим регулятор момента на апериодическое звено первого порядка, тем самым ограничим бесконечную полосу равномерного пропускания частот конкретным значением, то получим несколько ухудшенный вид переходных процессов. Степень ухудшения будем оценивать величиной перерегулирования Δh . На рис. 2.28 обозначена граница влияния каждого из параметров. При $j < 0,13$ перерегулирование в большей степени зависит от T_m , в то время как при $j > 0,13$ точность позиционирования зависит как раз от j .

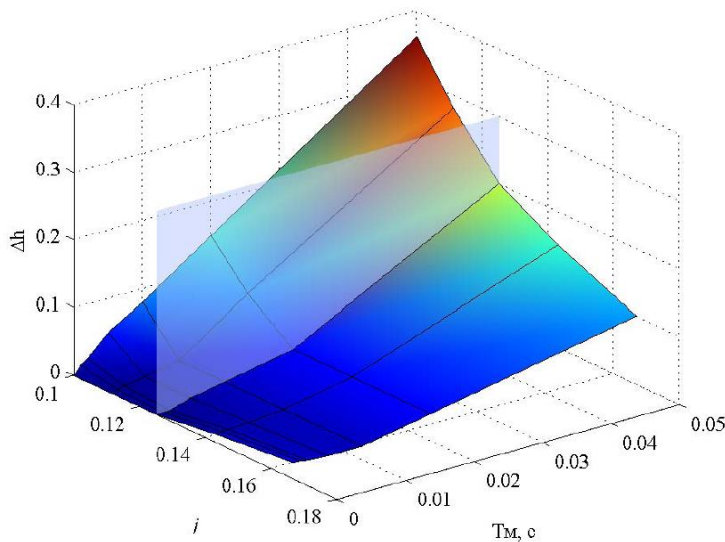


Рис. 2.28 Перерегулирование Δh в зависимости от постоянной времени контура регулирования момента T_m и передаточного числа редуктора j .

Для учета реальной инерционности контура момента была создана модель преобразователь-двигатель (пп.2.1.2).

С позиции точности позиционирования уточнения требует модель самого двигателя.

На упрощенной модели электромеханическая

часть двигателя заменялась звеном $\frac{1}{T_{дp}}$, в относительных единицах принималось, что $\bar{I} = \bar{M}$. Однако, как известно из теории электрических машин, наличие открытых пазов приводит к пространственной несинусоидальности индукции в воздушном зазоре. В рабочем режиме это приводит к наличию высших гармоник момента во временной области, их принято называть зубцовыми пульсациями.

На модели с распределенными параметрами, представленной в п.2.1 были проведены исследования амплитуды зубцовых пульсаций для нескольких машин серии 4А. Выборочно для нескольких машин был произведен натурный

эксперимент. Суть его заключалась в следующем. Статор и ротор асинхронных двигателей запитывались постоянным током, и при вращении вручную вала двигателя с помощью закрепленного на нем рычага измерялось усилие на расстоянии l от вала посредством динамометра. Аналогичный эксперимент проводился на двух синхронных реактивных машинах, выполненных на базе АД серии 4А. Сходимость экспериментальных данных с данными, полученными в результате моделирования составила 95%.

Для реактивных машин амплитуда зубцовых пульсаций получилась заметно больше, в среднем на 40% (рис 2.29). Обусловлено это явнополюсностью ротора.

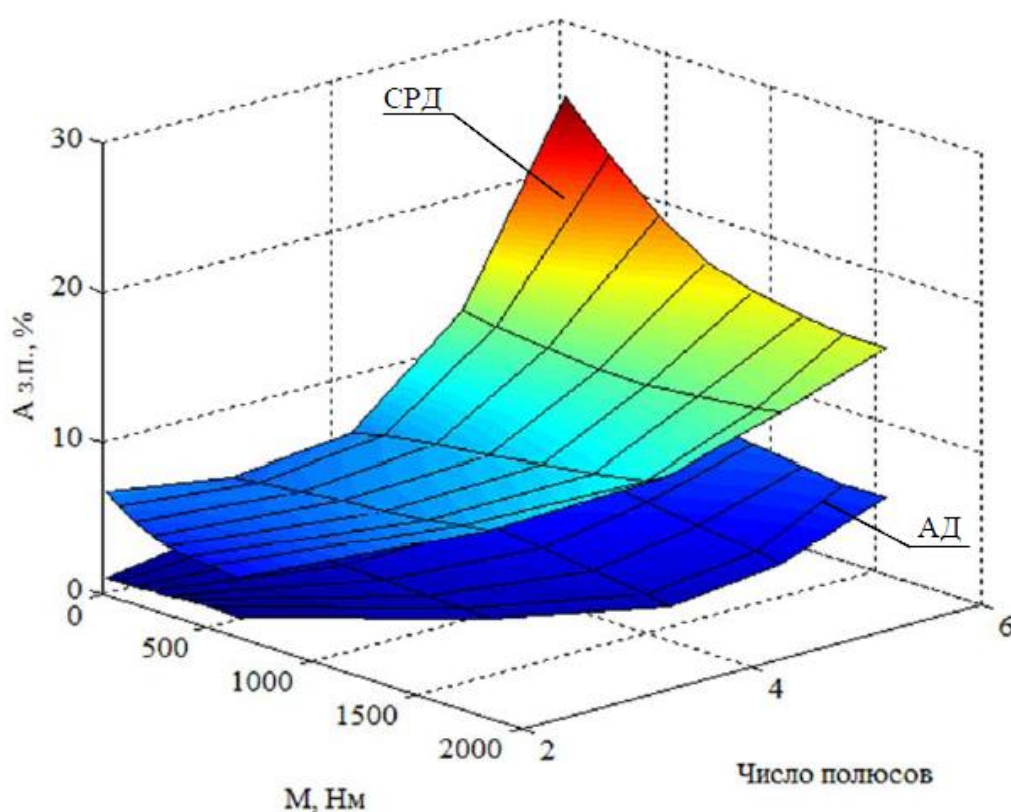


Рис. 2.29 Амплитуда зубцовых пульсаций в зависимости от числа пар полюсов и номинального момента для АД серии 4А и СРД, выполненных на их базе

Машины малой мощности выполняются обычно с небольшим числом пазов $Z_1=18...36$. При этом соответственно на полюс и фазу может приходиться от 3 до 18 пазов (рассматриваются машины с $pp=2...6$). Двигатели большой мощности обычно выполнены с $Z_1=72...80$. Чем меньше число пазов на полюс

и фазу, тем выше амплитуда зубцовых пульсацией по отношению к номинальному моменту и меньше их частота. Однако, увеличения момента можно добиться не только за счет большего диаметра, но и посредством увеличения длины магнитопровода. В этом случае номинальный момент будет увеличиваться и доля зубцовых пульсаций станет падать.

В позиционном электроприводе на пониженных скоростях данное явление может оказывать значительное влияние на точность позиционирования. Для оценки этого влияния полученные на модели с распределенными параметрами зубцовые пульсации подавались в виде синусоиды на вход регулятора момента двухмассовой модели Simulink. Амплитуда сигнала $A_{зп}$ варьировалась в диапазоне реальных значений, частота ω в диапазоне, соответствующем частоте зубцовых пульсаций машин разной полюсности, при скорости $\omega_1 = 1 \dots 5$ рад/с. Целью данного эксперимента было определить перерегулирование в системе, обусловленного исключительно зубцовыми пульсациями. На рис. 2.30 представлены результаты моделирования. Как видно из рисунка, на малых частотах перерегулирование может составлять до 2% от величины подачи. Причем при наличии податливости в системе этот эффект усугубляется.

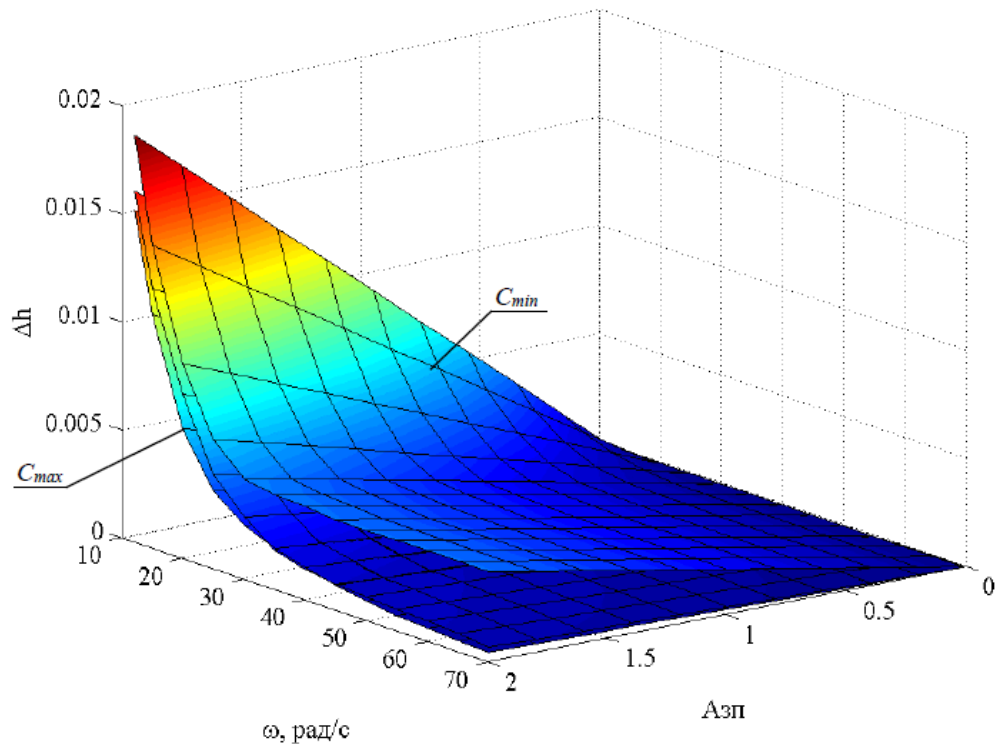


Рис. 2.30 Перерегулирование в системе позиционирования, вызванное зубцовыми пульсациями частотой ω и амплитудой $A_{зп}$

2.5 Особенности проектирования системы «преобразователь – двигатель»

Развитие силовой полупроводниковой, а также информационной техники позволяет контролировать в электроприводе переменного тока параметры, не доступные раньше даже для наблюдения. Например, в системах с векторным управлением АД благодаря использованию контроллеров во время работы привода обчисляется модель двигателя, что позволяет независимо регулировать активную и реактивную составляющую тока статора.

В СРМНВ этому вопросу уделяется особое внимание - величины токов возбуждения и якоря задаются независимо, что позволяет элементарно обеспечить режим ослабления поля, а также улучшить энергетические показатели привода в целом за счет оптимизации законов управления. Данное обстоятельство дает электроприводе с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения большие преимущества по сравнению, например, с синхронной

машиной, возбуждаемой постоянными магнитами. Энергетические показатели привода с СРМНВ мощностью более 100 кВт гораздо выше, чем у того же двигателя на постоянных магнитах. Технология сборки СРМНВ гораздо проще, что улучшает в разы ремонтпригодность машины. Бесконтактность и высокая механическая прочность ротора делают электропривод с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения одним из самых надежных.

При расчете работы двигателя от преобразователя частоты наименьшая скорость, которую электропривод стабильно поддерживает под действием номинального момента, 1 об/мин. Контур скорости при этом отрабатывает коммутационные пульсации момента. Стоит отметить, что максимальная скорость в данном приводе ограничена лишь возможностями коммутационной аппаратуры. Однако с точки зрения электромеханики важно обеспечить высокие энергетические показатели электропривода при удовлетворении требований технологии.

Здесь важную роль играет выбор числа полюсов машины. Для традиционных сетевых двигателей переменного тока число полюсов машины выбирается по номинальной скорости. Т.е. при питании от сети двигатель должен обеспечивать работу в номинальной точке.

Когда же проектирование электропривода производится комплексно, понятие номинальной скорости несколько изменяет свой смысл. Нет привязки к 50 Гц, а следовательно с учетом возможностей полупроводниковой техники ПЧ может выдать любую частоту коммутации.

Актуальным здесь становится выбор числа полюсов машины. МКЭ проводился анализ угловых характеристик (зависимости электромагнитного момента от угла поворота ротора при постоянстве тока статора). Варьировалось число пар полюсов $2p=2,4,6,8,12$. При этом наиболее существенное влияние на величину создаваемого машиной момента влияла высота спинки, или отношение D_p/D_c . Результат моделирования приведен на рис. 2.31.

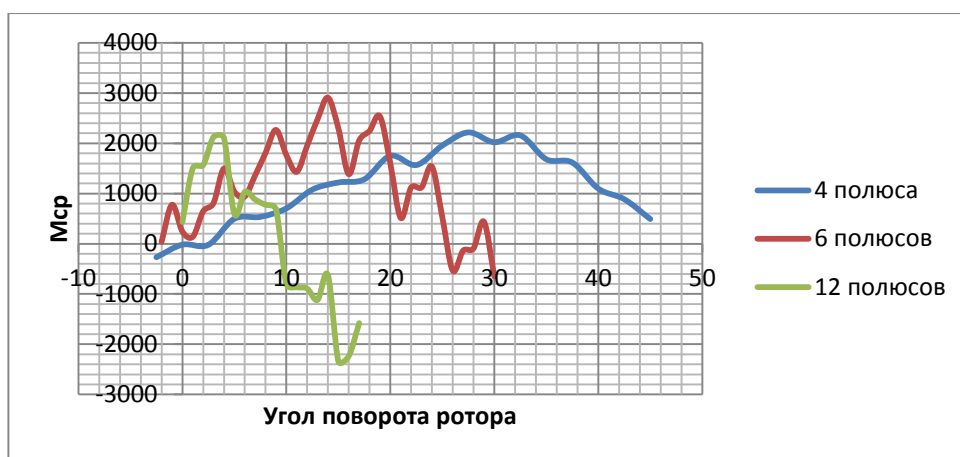


Рис. 2.31 – оптимизация числа пар полюсов

Сегодня увеличение числа пар полюсов считается необходимым для улучшения масса-габаритных показателей двигателя. Встречаются варианты с $2p=28; 36$. Однако при работе от преобразователя частоты обеспечить высокие скорости с таким числом пар полюсов невозможно.

2.6 Оценка перегрузочной способности СРМНВ

Исходя из требований к электроприводу подачи (п.1.1), следует обратить внимание не только на вопросы быстродействия и точности, но и на необходимость обеспечения перегрузочной способности порядка $(3-4) M_n$. Такие режимы являются наиболее характерными при срыве трубы с оправки. С точки зрения устойчивости системы, было принято решение о необходимости иметь «легкий» двигатель. Наиболее приемлемым в этом отношении с нашей точки зрения является СРМ. Аналитические расчеты [31] показали, что данный тип машины может иметь линейный участок моментной характеристики вплоть до $3M_n$. Однако важным является расчет перегрузочной способности с учетом принятых конструктивных изменений машины, принятых ранее. Переход к нетрадиционной форме фазного тока, возможность высокой перегрузочной способности машины, и её количественная оценка также делают актуальным тепловой расчет электродвигателя.

При проектировании электропривода важным этапом является выбор двигателя по мощности. Далее выбранный двигатель проверяется по перегрузке и зачастую, после того как он не проходит по этому критерию, проектант выбирает двигатель большей мощности. На деле в режиме перегрузки привод работает меньше 10 процентов от времени цикла. Большую же часть времени двигатель работает в режиме неполной загрузки, что приводит к ухудшению энергетических показателей всей системы, коэффициенту мощности ниже 0,6. Правильнее в этом случае выбрать двигатель с большой перегрузочной способностью. Однако для этого придётся заложить в машину больше меди, что, определено, скажется на стоимости двигателя.

Под перегрузочной способностью понимается возможность двигателя кратковременно обеспечить момент, равный 1,5...10 Мн без возникновения аварийного режима, вызванного перегревом машины, либо пробоем изоляции. Другими словами, во время перегрузки ток должен лежать в допустимых пределах.

В общем случае момент электрической машины определяется как $M=c\Phi I$. Моментную характеристику, или зависимость электромагнитного момента от тока в этом случае можно разделить на три участка: первый, параболический участок от 0 до Мн, когда увеличение момента происходит в основном за счет роста потока, далее идет линейный участок, и наконец, происходит насыщение машины и дальнейшее увеличение момента обусловлено исключительно ростом тока.

Проведя МКЭ эксперимент по перегрузке АД и СРДНВ одного габарита, было установлено (рис 2.32), что линейный участок СРДНВ находится в пределе 1...3,5 Мн, в то время как у АД верхний показатель ограничен 1,5 Мн.

Ротор синхронной реактивной машины независимого возбуждения выполняется без обмотки. Это обстоятельство позволяет, во-первых, за счет отсутствия противо-ЭДС не выполнять защиту преобразователя от перенапряжения, а во-вторых при тех же габаритных размерах, что и АД получить больший электромагнитный момент за счет увеличения линейной нагрузки. Актуальным становится вопрос количественной оценки такого увеличения.

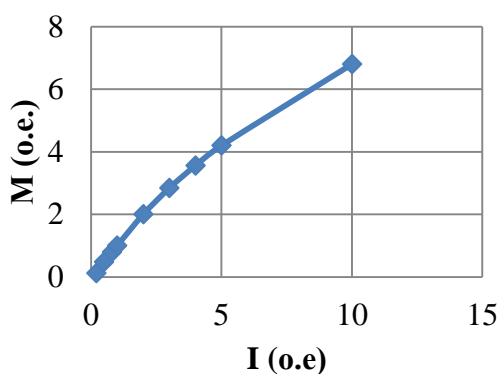


Рис. 2.32 Моментная характеристика СРДНВ

полняется без обмотки. Это обстоятельство позволяет, во-первых, за счет отсутствия противо-ЭДС не выполнять защиту преобразователя от перенапряжения, а во-вторых при тех же габаритных размерах, что и АД получить больший электромагнитный момент за счет увеличения линейной нагрузки. Актуальным становится вопрос количественной оценки такого увеличения.

кого увеличения.

Основным источником выделения тепла в СРМНВ являются обмотки с током, однако, следует также учитывать добавочные потери на гистерезис и вихревые токи, обусловленные высшими гармониками МДС статора и зубцовыми пульсациями. Дополнительно нагрев происходит из-за механических потерь, например, трения в подшипниках двигателя.

Если активные потери в обмотке определяются однозначно, как

$\Delta P_{эл} = mI_{\phi}^2 R_{\phi}$, где R_{ϕ} – сопротивление обмотки фазы, I_{ϕ} – действующее значение тока в фазе, то методика определения магнитных потерь существует множество. Так, в [75] потери на поверхности массивного полюса рассчитываются как

$$p_{\circ} = \frac{(B_{mr} k_{rv} \tau_v)^2 \cdot f_v^{1,5}}{\sqrt{\pi \mu \rho}}, \quad (2.1)$$

где B_{mr} – амплитуда нормальной составляющей индукции поля; k_{rv} – коэффициент, учитывающий размагничивающее действие вихревых токов; τ_v , f_v – полюсное деление и частота v гармоники; μ , ρ – магнитная проницаемость и удельное сопротивление материала.

Данный метод позволяет достаточно просто оценить долю потерь, обусловленных высшими гармониками МДС статора. Однако здесь делается одно серьезное допущение – применять (2.1) справедливо только в случае равномерного распределения индукции в зазоре над всей поверхностью полюса. В СРМНВ, картина магнитного поля имеет вид, показанный на рис. 2.33, что вызывает перераспределение добавочных потерь по ширине полюса и может привести к значительным нагревам той части ротора, где имеет место усиление магнитного потока.

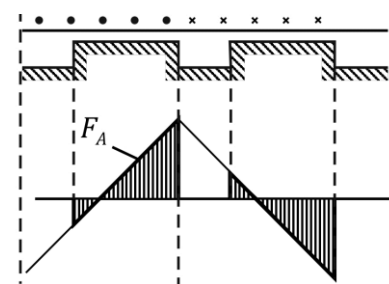


Рис. 2.33 Индукция в зазоре СРМНВ

Количественную оценку магнитных потерь с учетом вышеуказанной несимметрии индукции в зазоре можно получить в системе конечно-элементного анализа *ANSYS*. Преимуществом такого подхода является получение картины распределения тепла в машине, что позволяет выявить местный перегрев отдельных частей двигателя.

На первом этапе необходимо было верифицировать конечно-элементную модель. Для этого проводился следующий эксперимент. Ротор машины затормаживался, а по обмоткам пропускался гладкий постоянный ток, другими словами оценивались только активные потери. Проведя такой расчет в конечно-элементной системе *ANSYS Maxwell*, эти потери экспортировались в тепловую пространственную конечно-элементную модель *ANSYS Transient-thermal*. В принятой математической модели учитывался лучистый и конвективный теплообмен между обмоткой, магнитопроводом и внешней средой.

На рис. 2.34 приведена трехмерная тепловая модель СРМНВ, с учетом только активных потерь в меди. Как и ожидалось, наиболее горячей получается обмотка, которая выделяет тепло, по большей части в статор. Ротор же при этом нагревается гораздо меньше.

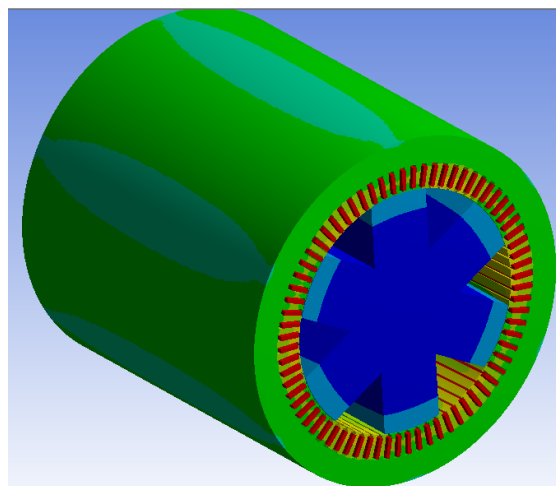


Рис. 2.34 Трехмерная тепловая модель магнитопровода СРМНВ

Для корректности расчета результаты моделирования проверялись на лабораторном образце СРДНВ, выполненном на базе асинхронного двигателя 4А100L4. Обмотки двигателя были соединены последовательно, по ним пропускался гладкий постоянный ток от системы Г-Д. Измерительным прибором служил контактный термометр. Измерялась температура корпуса двигателя, торцевой части ротора и лобовой части обмотки. На рис. 2.35 приведены результаты эксперимента.

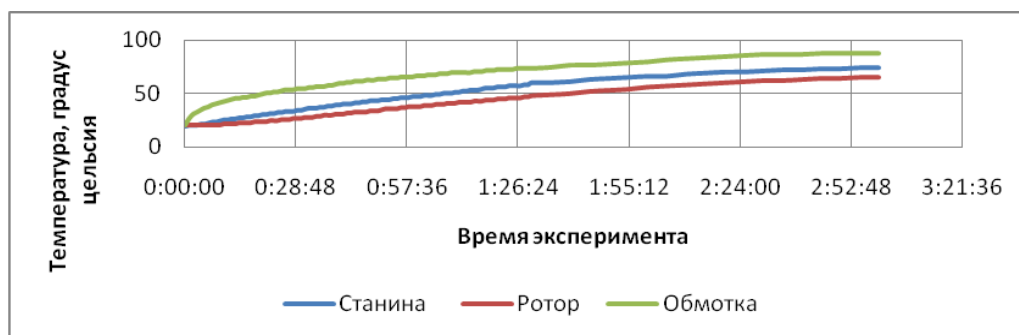


Рис. 2.35. Результаты натурального эксперимента

Качественно результаты эксперимента совпали с результатами моделирования: обмотка получилась самой горячей, тепло отводилось в основном в статор и в меньшей степени на ротор, постоянная времени нагрева оказалась такой же.

При работе СРМНВ от преобразователя, важно также учесть потери на перемагничивание, вихревые токи, и потери, вызванные коммутацией. Для этого было проведено моделирование работы машины в номинальном режиме. В модели магнитной системы двигателя, интегрированной в модель системы управления (рис. 2.15), производился расчет вышеуказанных потерь. Их гра-

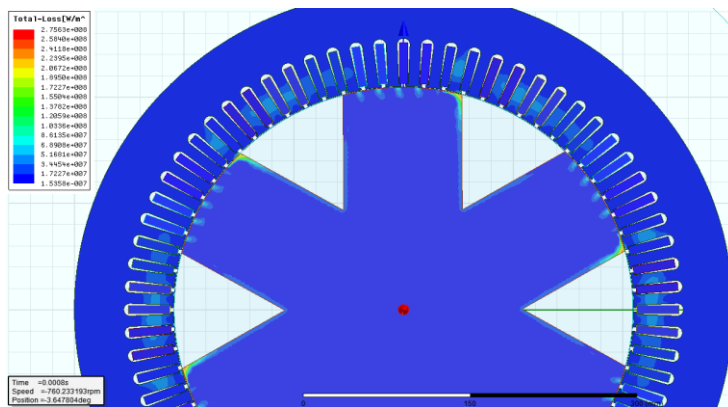


Рис. 2.36. Распределение магнитных потерь в разрезе машины

фическое распределение по поверхности машины приведено на рис. 2.36, где видно, что наибольшие потери выделяются в «набегающем» крае полюса за счет коммутации токов. Потери в

зубцовой зоне обусловлены «повышенным» значением магнитной индукции в этих участках.

В классической теории электрических машин данные потери рассчитываются следующим образом:

$$p = k_h B_{\max}^2 f + k_c (B_{\max} f)^2, \quad (2.2)$$

где k_h – коэффициент потерь на гистерезис; k_c – эмпирический коэффициент потерь на вихревые токи, B_{\max} – амплитуда индукции, f – частота первой гармоники. Однако, при переходе к прямоугольной форме фазного тока, и как следствие, увеличению доли высших гармоник, данный подход не является справедливым.

Вычисленные для каждой части машины в *ANSYS Maxwell* потери в ваттах, усреднялись за период коммутации и задавались в качестве «нагрузок» в тепловой пространственной модели *Transient-thermal*. Следует отметить, что в данной модели не рассчитываются процессы газодинамики и, следовательно,

не учитывается охлаждение двигателя за счет самовентиляции. Автору известны программные продукты, позволяющие вести электромагнитный и тепловой расчеты параллельно, причем с учетом самовентиляции (*ANSYS FLUENT*). Решение о выборе для моделирования данных программных продуктов было принято в силу следующих обстоятельств. Постоянная времени нагрева машины составляет чуть больше 2,5 часов. Для корректного электромагнитного расчета номинального режима работы машины при питании его от источников тока, работающих посредством ШИМ модуляции, необходимо сделать шаг по времени порядка 0,005 мс. Расчет пространственной тепловой модели с таким шагом длился бы недопустимо долго.

Анализ натурального эксперимента (рис. 2.37) показывает, что основная доля потерь имеет активный характер. Наличие высших гармоник за счет ШИМ источников тока, в качестве которых для проведения эксперимента использовались преобразователи *Maxi-maestro* увеличивают нагрев машины на 5%. На последнем этапе производился эксперимент, когда ротора затормаживался, пять из шести фаз запитывались последовательно от ШИМ источника постоянным током, а по обмотке, расположенной над краем полюса пропускался ток «прямоугольной» формы с частотой 30 Гц, что соответствовало номинальному режиму работы двигателя. Такой режим увеличивал нагрев ротора на 35%.

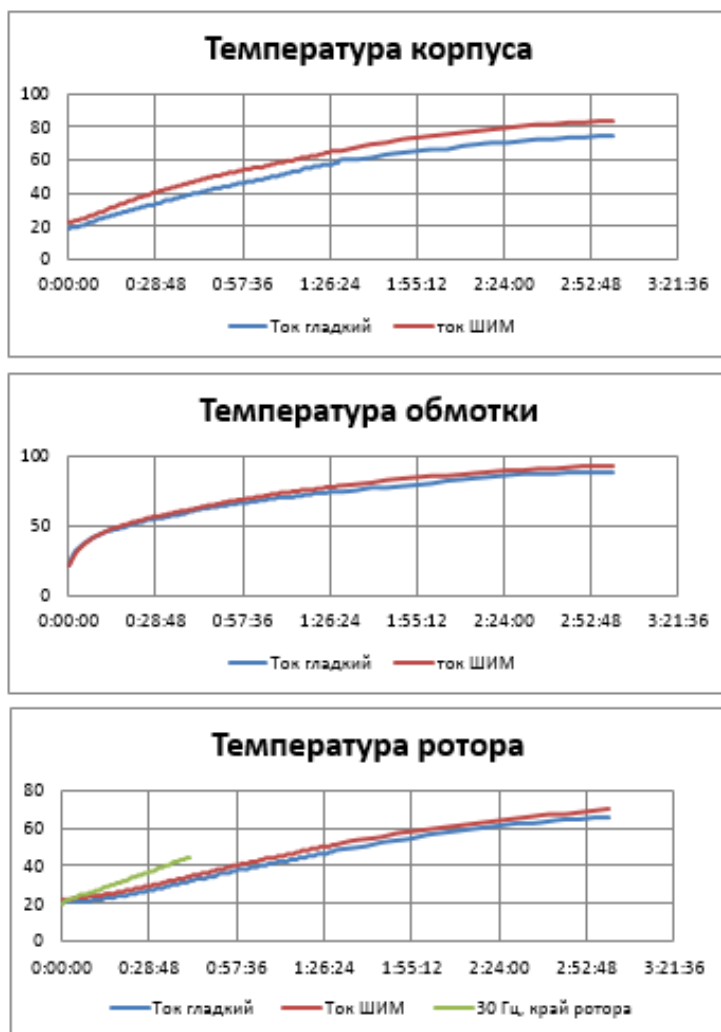


Рис. 2.37. Результаты эксперимента нагрева машины

На последнем этапе производилась оптимизация формы и габаритных размеров рифлений ротора в трехмерной модели [96], что позволило снизить нагрев машины на 5 %.

Таким образом, можно сделать вывод, что в СРДНВ за счет «холодного» шихтованного ротора и оптимизированной формы рифлений можно увеличивать линейную нагрузку в среднем на 15 % по сравнению с АД тех же габаритных размеров, что не приведет к перегреву машины.

Выводы по второй главе

1. Наиболее подходящим с точки зрения максимального быстродействия, высокой перегрузочной способности и широкого диапазона регулирования скорости является синхронная реактивная машина с независимым управлением по каналу возбуждения. Однако работы по усовершенствованию конструкции данного электромеханического преобразователя производились в основном в 80-х годах прошлого века. В то время машина рассматривалась как «классическая» реактивная, т.к. не было технической возможности реали-

зовать требуемую систему управления для независимого управления по каналу возбуждения. Современные математические методы позволяют более точно определять параметры машины со сложным ротором, такие, например, как Ld и Lq , что позволило максимально точно оптимизировать геометрию электрической машины для конкретного механизма по критерию максимума значения M/I . Кроме того, данная оптимизация производилась с учетом работы электрической машины от преобразователя частоты. Комплексный подход к проектированию системы электропривода позволил также произвести оптимизацию законов управления и синтез её системы

2. Поскольку в системе подачи важно не только быстродействие, но и точность позиционирования, синтез системы управления и силовой части электропривода производился в комплексе данных двух критериев. Так, одним из наиболее важных этапов был выбор оптимального передаточного числа редуктора. Исходя из требования минимального времени переходного процесса для всех возможных нагрузок был получен диапазон возможного передаточного числа редуктора. Далее, по методике Ю.С. Усынина был получен диапазон возможных значений передаточного числа редуктора, значительно повышающий устойчивость системы за счет снижения амплитудного максимума в упругом звене двухмассовой системы. Пересечение данных диапазонов дало результат в виде оптимального передаточного числа редуктора.

3. Было доказано, что высоких показателей быстродействия и устойчивости системы для полученной системы управления можно добиться лишь имея высокое быстродействие контура момента. Анализ существующих систем управления и выбору наиболее оптимальной по вышеуказанному критерию посвящена следующая глава.

ГЛАВА 3. СИНТЕЗ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ С МАКСИМАЛЬНЫМ БЫСТРОДЕЙСТВИЕМ КОНТУРА МОМЕНТА

Мы посмотрели требования и возможности обеспечения точностных показателей на последнем участке. Пришли к выводу, что Весьма успешно поднимать быстродействие контура регулирования момента позволяют схемы с DTC управлением. Поэтому полезно дать комплексную оценку этим схемам в сопоставлении с обычными векторными схемами для перспективных классов реактивных электроприводов.

3.1 Эволюция системы управления

В электроприводе переменного тока наиболее простым с точки зрения реализации является закон управления, когда $\frac{U}{f} = const$. Такое управление принято называть скалярным. Данные СУ получили широкое применение на объектах, к которым не предъявляется особых требований по быстродействию и точности (электроприводы насосов, вентиляторов и т.п.). Технологические установки, в частности прокатных станков, предъявляют более высокие требования к электроприводу: высокое быстродействие, большая перегрузочная способность, работа на пониженных скоростях.

Рассмотрим с точки зрения предельного быстродействия контура момента различные СУ, удовлетворяющие вышеуказанным требованиям. Прежде всего следует отметить, что такие системы выполняются по замкнутому принципу. Наиболее широкое распространение получили векторные СУ с косвенным вычислением потока. Такие системы могут выполняться как с произвольной ориентацией системы координат, так и с ориентацией системы координат по вектору потокосцепления ротора.

Не получил широкого применения, но заслуживает внимания принцип ориентирования по полю двигателя, так называемая система «Трансвектор», предложенная в 1972г. Ф. Блашке. Отличительной особенностью её является

прямое измерение мгновенного значения и пространственного положения вектора потокосцепления в воздушном зазоре. Такое измерение производится обычно с помощью датчиков Холла. Управление двигателем осуществляется в этом случае посредством переменных, преобразованных к координатным осям, ориентированным по полю. При этом появляется возможность разделить управление двигателем по каналу возбуждения и каналу момента. В системе измеряются мгновенные значения токов статора и поток в воздушном зазоре. Поскольку последний сигнал зачастую «зашумлен» за счет зубцовых пульсаций, его пропускают через фильтр. Далее производится трехфазно-двухфазное преобразование, в результате чего, определяются проекции тока статора на оси, ориентированные по полю машины. Эти сигналы сравниваются с уставкой, и затем в зависимости от величины ошибки формируются сигналы управления моментом и потоком, по-прежнему ориентированные по полю. Остается произвести их обратное преобразование и получить трехфазные составляющие.

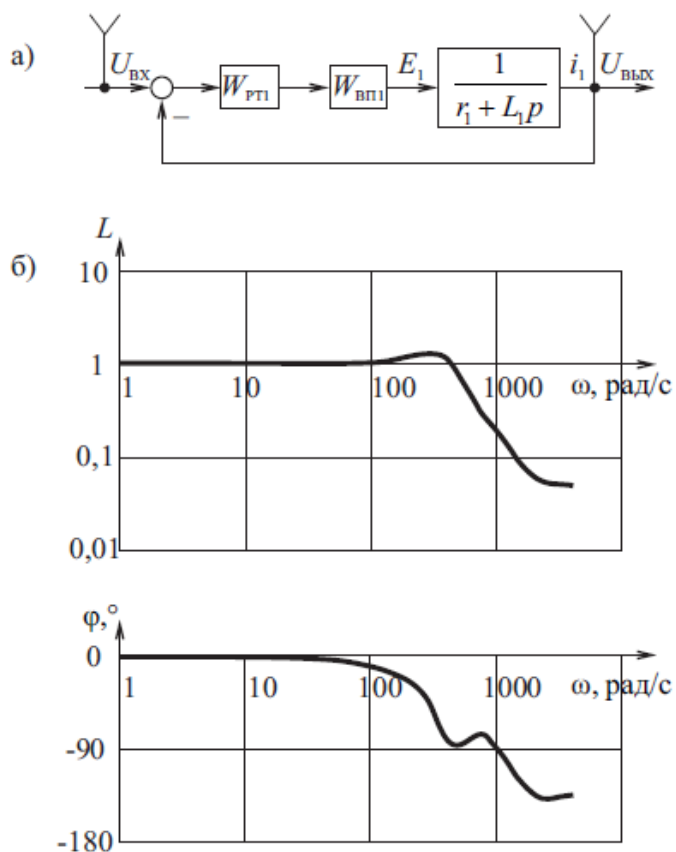


Рис. 3.1. Быстродействие контура тока:
а) структурная схема, б) ЛАЧХ и ФЧХ

Поскольку, в отличие от классического векторного управления здесь величины ψ_α и ψ_β определяются не косвенно, а посредством прямого измерения, это делает систему более устойчивой. Конечное быстродействие контура момента в этом случае будет ограничено лишь временем изменения амплитуды вектора потокосцепления статора или возможностью полупроводникового преобразователя. Оценка быстродействия контура тока производилась эксперимен-

тально (рис. 3.1). Как видно из рисунка, фаза-частотная характеристика не достигает -180 градусов.

Максимальное быстродействие контура момента на сегодняшний день достигается в системах прямого управления моментом Direct Torque Control (DTC). В данной системе каждый момент времени состояние инвертора напряжения выбирается таким, чтобы уменьшить (ограничить) ошибку регулируемых координат. В качестве таковых выступают потокосцепление статора ψ_c и электромагнитный момент M . В [102] говорится о том, что быстродействие данной системы будет определяться дискретностью T_c работы цифрового контроллера, посредством которого осуществляется работа системы. Это означает, что выбранный вектор напряжения удерживается в течение T_c , после чего или сохраняется, или заменяется другим, если хотя бы одна из ошибок изменила знак. Действительно, статорная цепь описывается уравнением

$$u_c = r_c i_c + \frac{d\psi_c}{dt},$$

где u_c и i_c – напряжение и ток статора, r_c – сопротивление обмотки статора.

Поскольку в электрических машинах промышленного исполнения индуктивное сопротивление статора многократно превышает активное, величиной r_c можно пренебречь, тогда приращение вектора ψ_c за время T_c :

$$\Delta\psi_{c\alpha} = u_{c\alpha} T_c, \Delta\psi_{c\beta} = u_{c\beta} T_c,$$

где $u_{c\alpha}, u_{c\beta}$ – составляющие вектора напряжения в неподвижной системе координат.

Повысить быстродействие системы, к тому же снизив пульсации момента, которые в случае позиционного электропривода являются актуальными можно уменьшив время T_c . Актуальным здесь становится вопрос устойчивости системы. При жесткой привязке к потокосцеплению ротора, например, при наличии датчика положения, имеется возможность точно определить все координаты моментного треугольника. Классическая система прямого управления моментом выполняется бездатчиковой.

3.2 Прямое управление моментом

3.2.1 Особенности математической модели

Наиболее подходящим электромеханическим преобразователем с точки зрения быстродействия и устойчивости системы позиционирования является синхронная реактивная машина (пп.2.1). Как было доказано в предыдущей главе, обеспечить требуемое быстродействие всей системы можно повысив быстродействие контура момента. Проще всего этого можно достичь, используя в качестве системы управления прямое управление моментом. В работах Рудакова В.В., Козярука А.Е., Перельмутера В.В., Соколовского Г.Г. достаточно подробно описана система *DTC* для асинхронного электропривода [102,133,61]. Однако, задача отладки данного управления для реактивной машины является достаточно актуальной.

Известно, что в системах *DTC* наблюдаются высокочастотные колебания момента. Поскольку в синхронной реактивной машине уровень зубцовых пульсаций выше, чем у АД (п.2.4) для корректной работы наблюдателя необходимо учитывать в модели двигателя текущее магнитное состояние машины.

Как упоминалось выше, быстродействие данной системы зависит от дискретности работы цифрового контроллера. Существующие сегодня микроконтроллеры могут обработать данный объем вычислений за $T_c = 1 \cdot 10^{-6}$ с. Расчет магнитной системы на модели с распределенными параметрами с таким маленьким шагом потребовал бы чрезвычайно больших вычислительных ресурсов даже с учетом современных возможностей суперкомпьютерных кластеров.

Одним из возможных путей решения этой проблемы является предварительный расчет набора кривых потока $\Psi = f(I, \theta)$ и момента $M = f(I, \theta)$, где I – действующее значение статорного тока, θ – угол поворота, и последующее его использование в табличном виде. На рис. 3.2 приведены вышеназванные зависимости для двигателя 4A280S6Y3 мощностью 75кВт. Как видно из рисунка, наличие пульсаций индукции в воздушном зазоре приводит к пульсациям потока и, как следствие, к пульсациям момента двигателя.

Далее совместный расчет по приведенным «таблицам» позволяет заменить ими электромеханическую часть электрической машины. На рис. 3.3 приведена обобщенная математическая модель, учитывающая табличным способом распределение магнитных полей. Блок «Таблица переключений» не отличается от предложенных ранее. Подробно структура переключений представлена, например, в [61], [133].

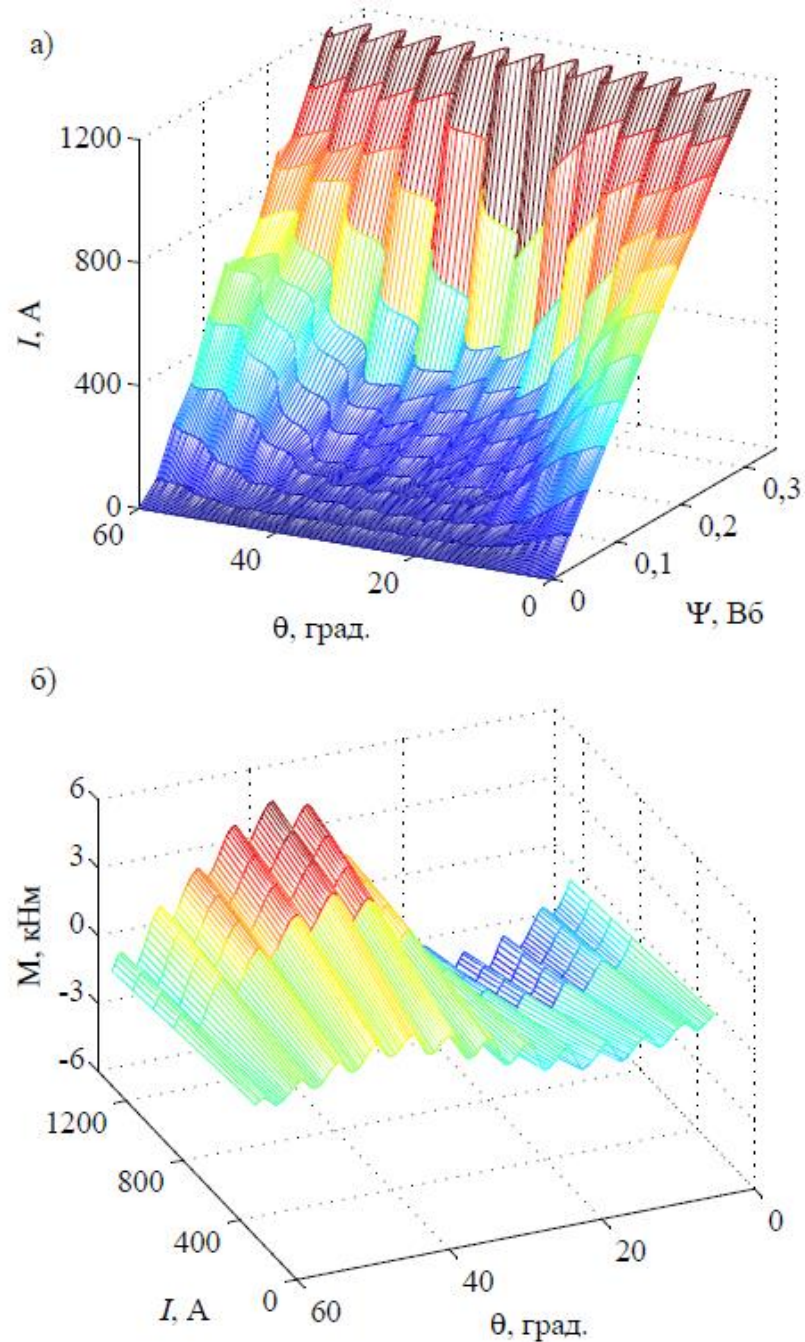


Рис. 3.2. Результаты расчета магнитной системы на модели с распределенными параметрами: а) тока I б) потока Ψ

Регулятор потока представлен двухуровневым релейным элементов. В качестве регулятора момента используется трехуровневый релейный элемент. Такое решение позволяет снизить высокочастотные коммутационные пульсации момента. Поскольку заданием на расчет магнитной системы является комбинация сигналов тока I и угла поворота θ , вектор напряжения, определяемый

«таблицей переключения» преобразуется в сигнал тока исходя из известного соотношения:

$$u = ir + L \frac{di}{dt}.$$

Следует отметить, что на каждом шаге расчета значение индуктивности L уточняется по формуле:

$$L = \frac{\Psi}{I}.$$

Задержка переключения состояний инвертора при изменении сигнала задания на напряжение учтена звеном чистого запаздывания $ke^{-p\tau}$.

Переход к такой структуре позволил значительно снизить объем вычислений на единицу времени. Однако для получения достаточно подробных таблиц магнитного состояния электрической машины необходимо предварительно произвести большое количество расчетов системы с распределенными параметрами. Таким образом данная система с точки зрения подхода к расчету вы рождается в изначально предложенную (рис. 2.15).

На этапе синтеза системы управления и наладки адаптивных регуляторов, например, позволяющих повысить робастность системы удобно перейти к упрощенной математической модели машины. Такая модель была реализована в программном продукте *MATLAB* (рис.3.4).

3.2.2. Синтез системы *DTC* управления электроприводом на базе СРМ

Поскольку в стандартной библиотеке *Simulink* отсутствует модель СРМ, вместо неё была взята наиболее близкая модель синхронного двигателя с возбуждением от постоянных магнитов, после чего потокосцепление, создаваемое магнитами было приравнено к нулю. Таким образом, электромеханические свойства

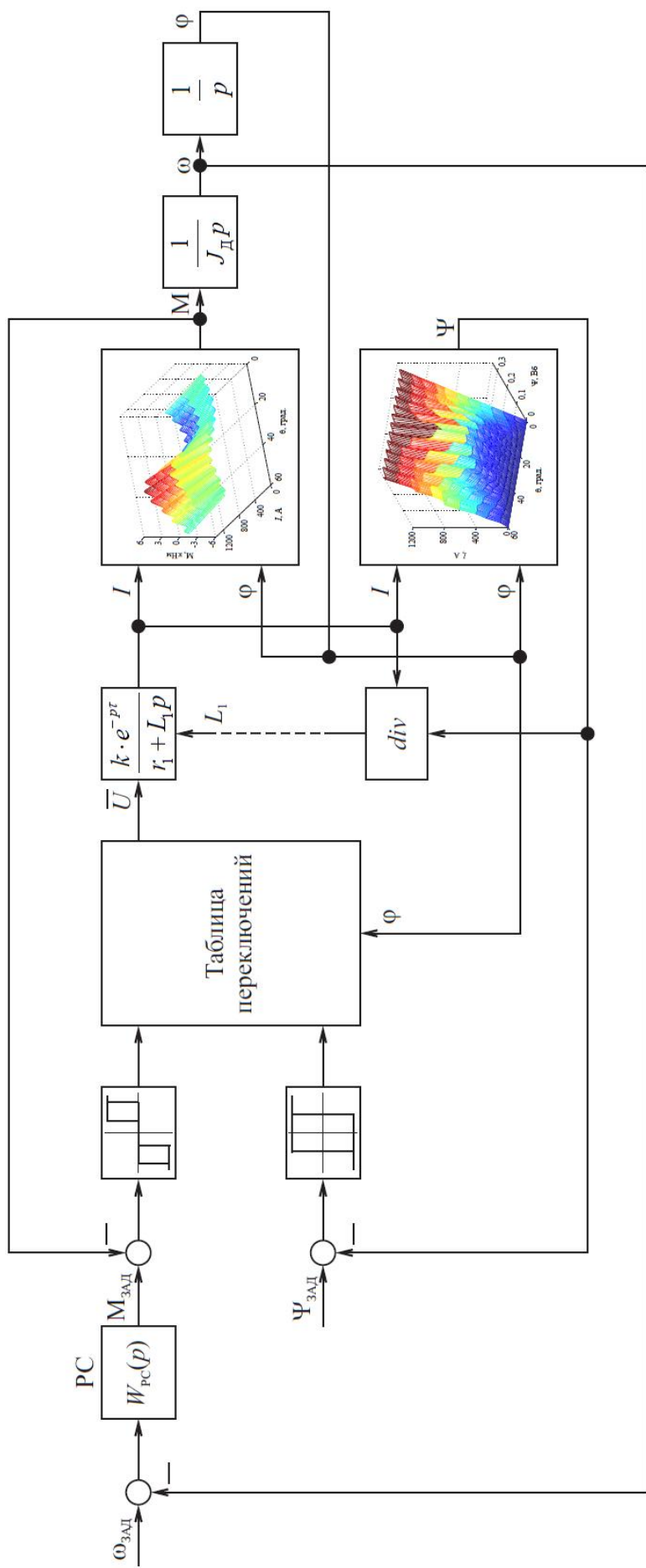


Рис. 3.3. Обобщенная математическая модель системы ДТС на базе СРМ, учитывающая табличным способом распределение магнитных полей

двигателя в системе d - q координат, жестко привязанной к ротору, описывались следующей системой уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d}{dt} i_d = \frac{1}{L_d} u_d - \frac{R}{L_d} i_d + \frac{L_q}{L_d} p \omega_r i_q \\ \frac{d}{dt} i_q = \frac{1}{L_q} u_q - \frac{R}{L_q} i_q + \frac{L_d}{L_q} p \omega_r i_d \\ M = 1,5 p p (L_d - L_q) i_d i_q \\ \frac{d}{dt} \omega_r = \frac{1}{J} (M - M_c) \\ \frac{d\varphi}{dt} = \omega_r \end{array} \right. ,$$

где R —сопротивление статорной обмотки, ω_r — угловая скорость ротора, pp —число пар полюсов, M —электромагнитный момент, создаваемый двигателем, M_c —момент сопротивления, φ —угол поворота вала. Поскольку текущие координаты электропривода, такие как момент и потокосцепление не доступны для прямого измерения, их вычисление производится посредством наблюдателя. В системе имеются датчики напряжения. Зная фазные напряжения, легко найти их проекции на оси неподвижной системы координат α - β :

$$\left\{ \begin{array}{l} U_\alpha = U_a - \frac{1}{2}(U_b + U_c) \\ U_\beta = \frac{\sqrt{3}}{2}(U_b - U_c) \end{array} \right. .$$

Зная текущий угол поворота ротора θ , вычисляемый также наблюдателем, находим проекции вектора напряжения в системе координат d - q , связанной с ротором:

$$\begin{cases} U_d = U_\alpha \cdot \sin \theta + U_\beta \cdot \cos \theta \\ U_q = U_\alpha \cdot \cos \theta + U_\beta \cdot \sin \theta \end{cases}$$

Далее, учитывая математическое описание двигателя

$$\left\{ \begin{array}{l} U_d = i_d R + L_d \frac{di_d}{dt} + \omega_r p L_q i_q \\ U_q = i_q R + L_q \frac{di_q}{dt} - \omega_r p (L_d i_d + \psi_r) \end{array} \right. ,$$

где U_d , U_q и i_d , i_q — напряжения и токи в координатах d и q ; R — активное сопротивление обмоток; L_d , L_q — индуктивности обмоток в координатах d и q ,

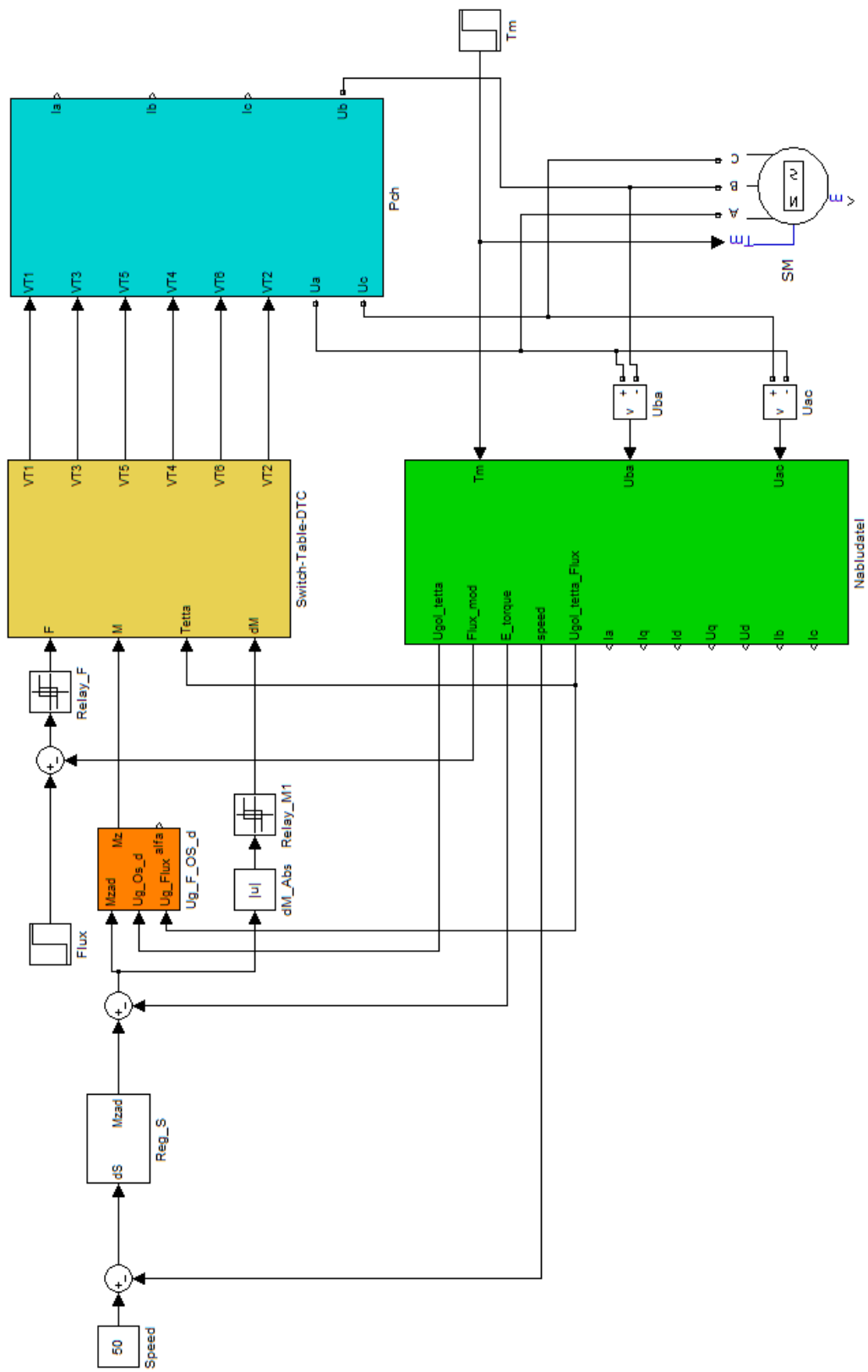


Рис. 3.4. Обобщенная математическая модель системы DTC на базе СРМ, реализованная в системе Matlab-Simulink

ω_r – угловая скорость ротора, p – число пар полюсов, ψ_r – потокосцепление ротора, находим составляющие статорного тока в осях d и q :

$$\begin{cases} i_d = \frac{U_d + i_q \cdot \omega_r \cdot pp \cdot L_q}{L_d \cdot p + R} \\ i_q = \frac{U_q - i_d \cdot \omega_r \cdot pp \cdot L_d}{L_q \cdot p + R} \end{cases}$$

На следующем этапе наблюдателем вычисляется модуль вектора потокосцепления статора

$$\Psi = \sqrt{\psi_d^2 + \psi_q^2},$$

где $\psi_d = i_d \cdot L_d, \psi_q = i_q \cdot L_q$.

Наконец, зная текущие значения проекций токов и потокосцеплений на оси d и q , находим электромагнитный момент:

$$M = \frac{3}{2} pp (\psi_d \cdot i_q - \psi_q \cdot i_d).$$

Особенностью рассматриваемого способа управления применительно к синхронному электроприводу является учёт знакопеременного характера электромагнитного момента при вращении вектора результирующего потокосцепления относительно ротора. Для реактивного ротора можно выделить два периода на один электрический оборот и по два участка уменьшения и увеличения момента. Данное обстоятельство требует усложнения структуры регулятора момента (рис 3.5, а). Допустим, в данный момент времени мы работаем в точке А угловой характеристики (рис. 3.5, б). Тогда, для увеличения момента необходимо «сместиться» по угловой характеристики вправо, что будет соответствовать положительному сигналу регулятора момента. Если же в текущий момент времени мы работаем в точке В, несмотря на то, что данная точка по-прежнему находится на положительной полувогне угловой характеристики, для увеличения момента мы должны двигаться влево, что будет соответствовать отрицательному сигналу регулятора момента. Таким образом, необходимо дополнительно определять положение ротора и рассчитывать угол поворота результирующего вектора

потокосцепления относительно магнитной оси ротора для определения направления вращения этого вектора, которое бы вызвало требуемое изменение электромагнитного момента.

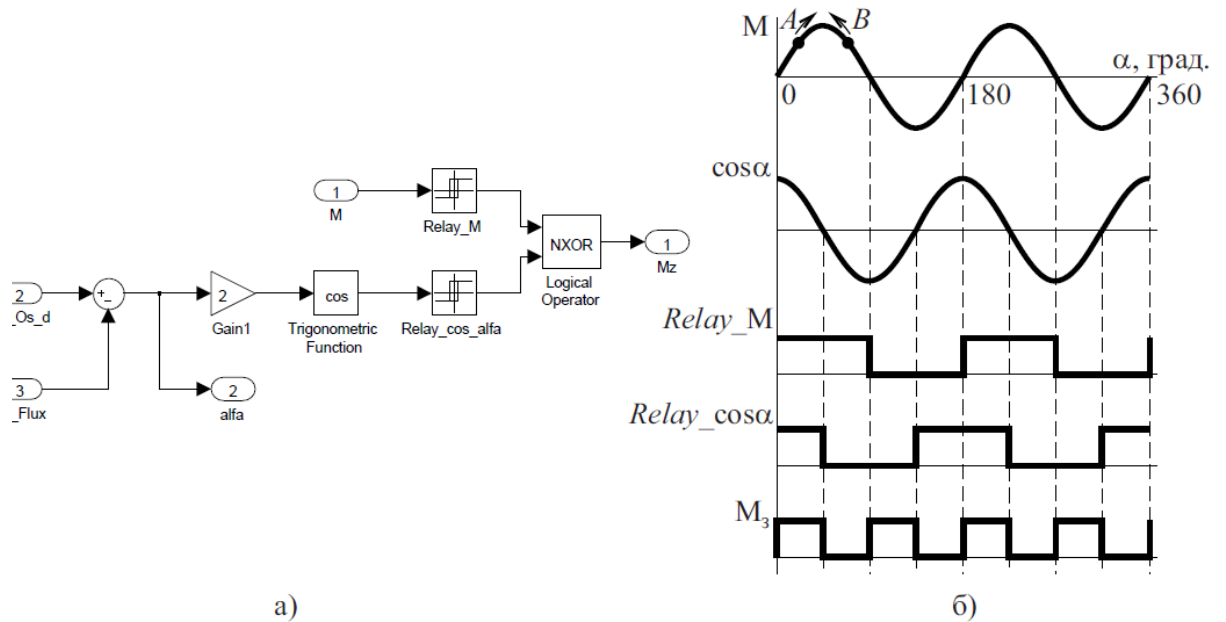


Рис. 3.5. Принцип работы регулятора момента

На рис.3.6 показаны результаты моделирования процесса пуска на холостом ходу. Особенностью синхронного электропривода с реактивным ротором является процесс нарастания потокосцепления статора в начальный момент времени. Скорость нарастания определяется величиной подаваемого напряжения на статор. Осциллограммы наглядно демонстрируют тот факт, что при такой системе управления составляющая тока по оси q пропорциональна величине момента, проекция на ось i_d пропорциональна потоку.

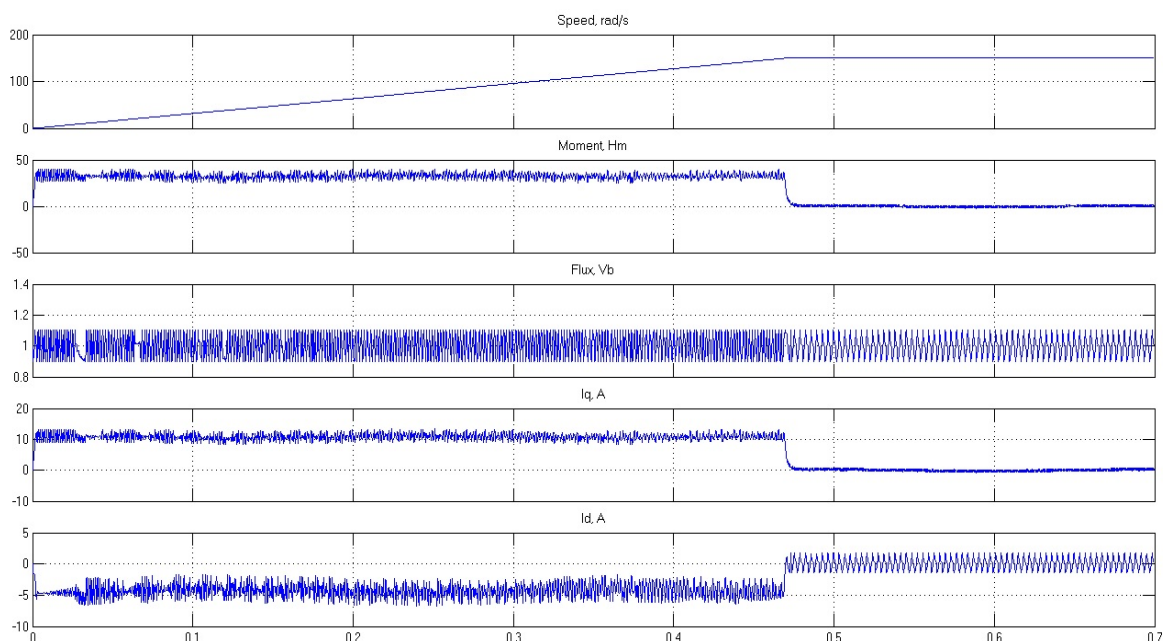


Рис. 3.6. Режим разгона на холостом ходу до номинальной скорости при $\psi = \text{const}$ для синхронного электропривода с реактивным ротором

Очевидным недостатком данной системы является высокочастотные пульсации электромагнитного момента, ухудшающие условия нагрева электрической машины. Однако задача энергосбережения для электропривода подачи является менее актуальной, т.к. данный электропривод является наиболее ответственным в технологическом процессе и повышение быстродействия его работы и точности позиционирования даст больший экономический эффект за счет снижения отбраковки продукции и повышения производительности работы всего стана, чем малоэффективная система подачи с высоким КПД.

3.2.3 Оценка робастности системы DTC-СРМ

Для электропривода переменного тока, работающего в повторно-кратковременном режиме с частыми перегрузками характерны режимы перегрева. При этом активное сопротивление статора r_1 может меняться в пределах вплоть до $\pm 50\%$. В системах с линейными регуляторами столь существенное изменение параметров электрической машины делает необходимым заново производить настройку системы управления, либо усложнять её структуру приме-

нением адаптивных регуляторов. Использование в системах прямого управления моментом релейных регуляторов делает систему более устойчивой к изменению параметров двигателя.

На модели, приведенной на рис. 3.4 исследовалась зависимость времени переходного процесса в контуре регулирования момента при варьировании активного сопротивления обмотки статора. Кроме того, производилась оценка устойчивости системы к изменению сопротивления r_1 , в качестве критерия здесь было перерегулирование в контуре момента.

На рис. 3.7 приведены результаты исследований. Время переходного процесса увеличивается не более, чем на 15% при увеличении сопротивления на 25% относительно номинального. Перерегулирование в контуре момента варьируется в пределах 6–10%. Таким образом можно сделать вывод о том, что система остается устойчивой без снижения динамических показателей в диапазоне $\pm 20\%$ от номинальных параметров.

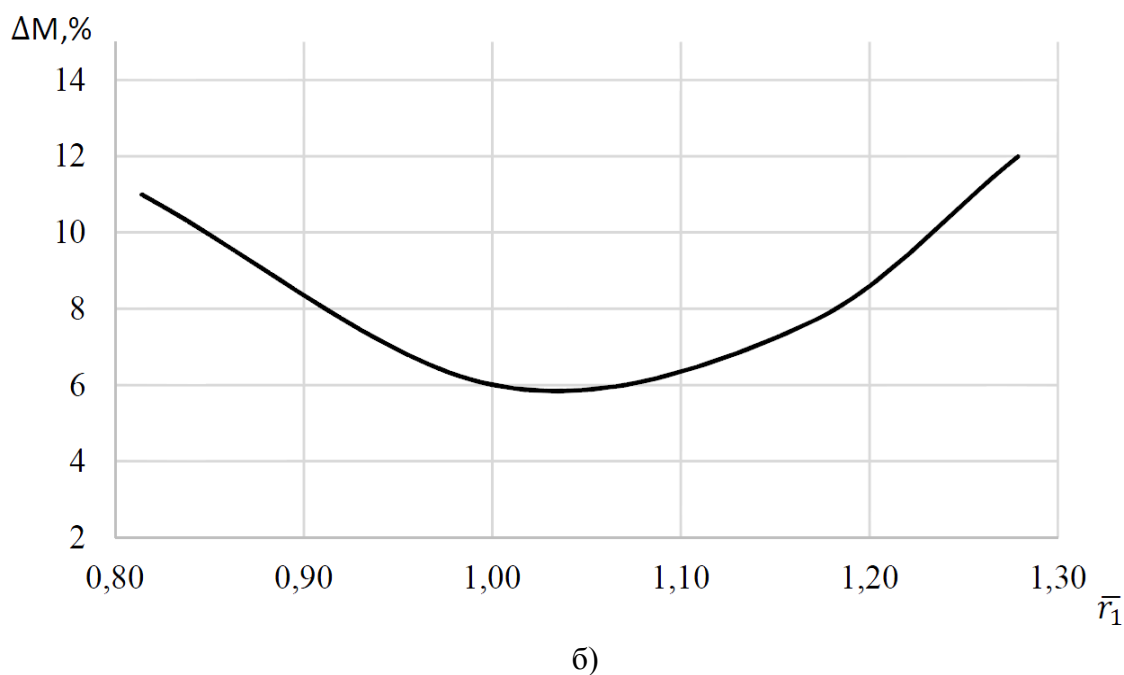
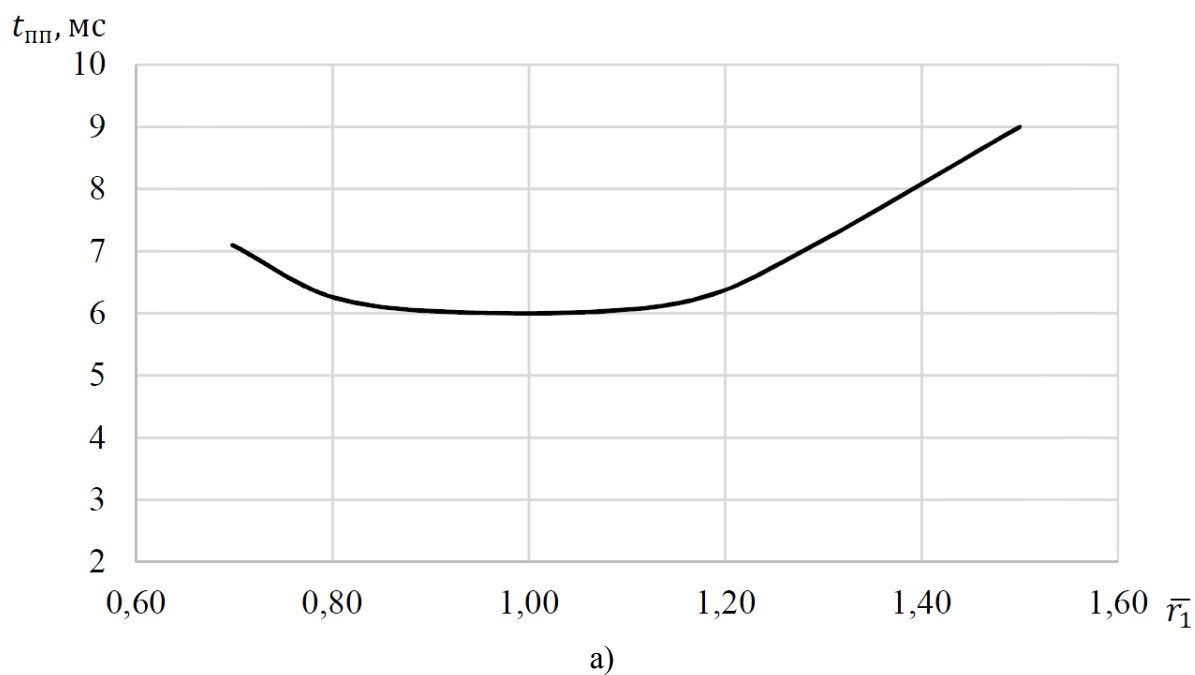


Рис. 3.7. Зависимость времени переходного процесса а) и перерегулирования б) в контуре регулирования момента от сопротивления статорной обмотки r_1

Другим аспектом работы электрической машины с точки зрения изменения её параметров является режим перегрузок, когда существенно может изменяться соотношение x_d/x_q . На модели *Matlab*, варьируя данное соотношение было доказано, что система без дополнительных настроек, остается устойчивой к изменению данных параметров, что говорит о её высокой робастности.

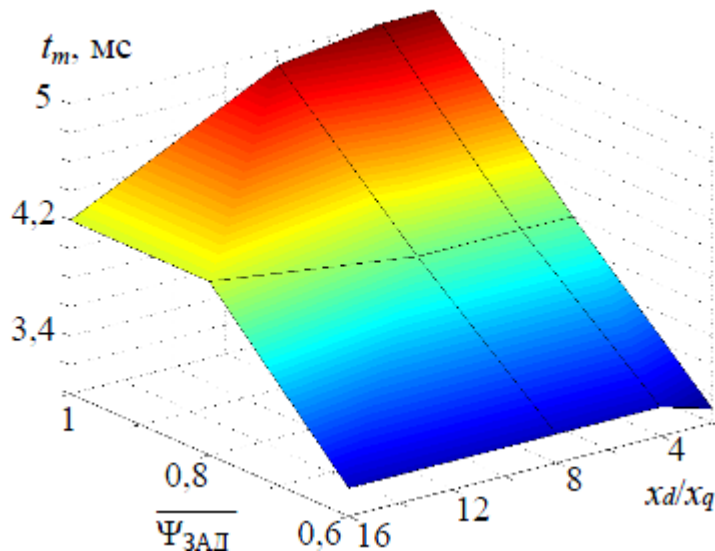
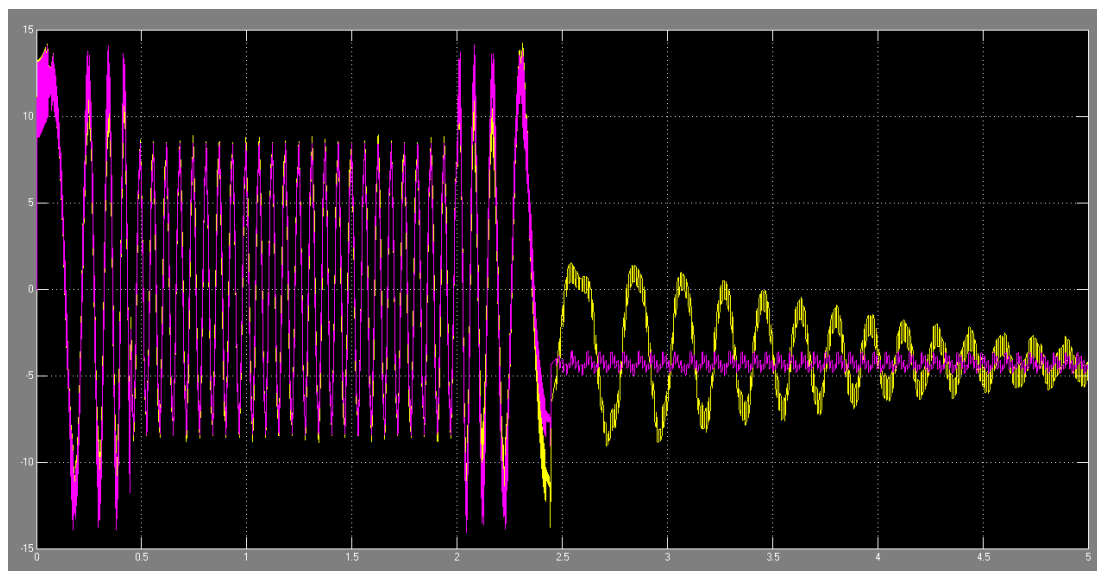


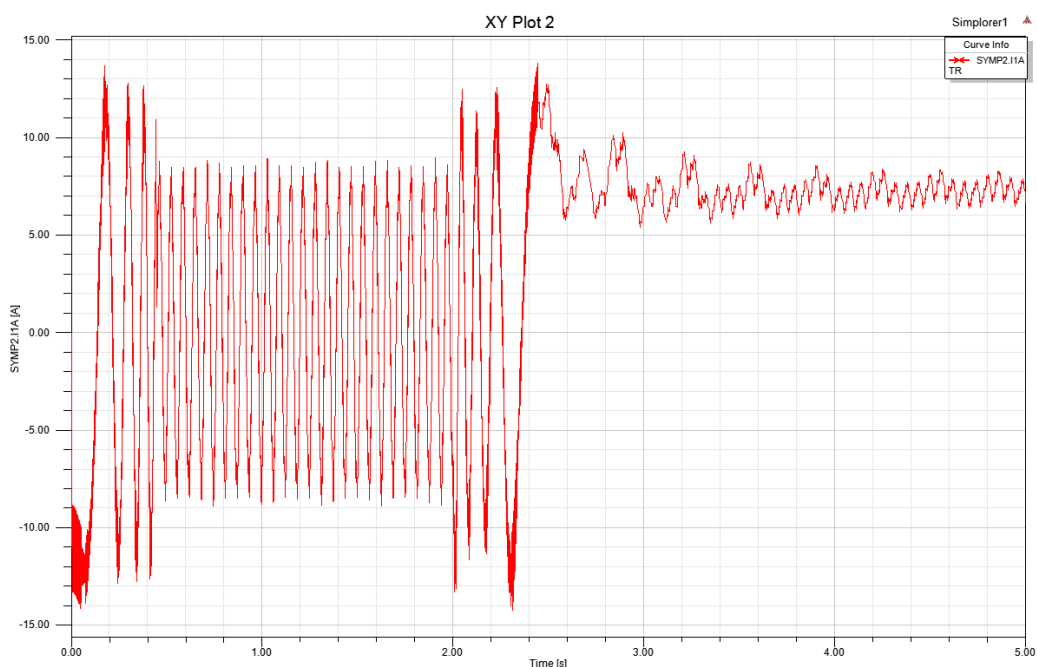
Рис. 3.8. Время переходного процесса в контуре момента при варьировании потока для разных соотношений x_d/x_q

3.2.4 Сравнительный анализ математических моделей

Наиболее полной моделью системы *DTC-CPM*, учитывающей распределение магнитного поля в электрической машине является модель, выполненная в программном комплексе *ANSYS Simplorer-Maxwell*. Цепи управления в ней реализованы аналогично тому, как это показано на рис. 3.4, однако двигатель в данном случае представлен конечно-элементной моделью, расчет которой ведется на каждом шаге. На 1с. расчетного времени требуется порядка 16 часов реального. Однако такое уточнение позволяет более подробно исследовать физику переходных процессов в системах со столь высоким быстродействием. Кроме того, определение параметров ротора, таких как L_d и L_q с магнитонепроводящими вставками приближенными методами является чрезмерно сложной задачей. Наиболее наглядным и доступным для наблюдения является сигнал тока статора. На рис. 3.9 приведены осциллограммы, полученные на моделях *Matlab* и *Simplorer*.



а)



б)

Рис. 3.9. Осциллограмма тока при разгоне на холостом ходу а) модели *Matlab* 1– сигнал с датчика тока, 2–сигнал, вычисленный наблюдателем б) модели *Simplorer*

Для оценки точности расчета всеми вышеназванными способами был произведен сравнительный анализ переходных процессов, полученных на каждой из моделей. В качестве эталонных п.п. использовались осциллограммы, полученные на экспериментальной установке синхронного реактивного электропривода с *DTC* управлением, выполненного фирмой *ABB* на базе преобразователя частоты *ACS-800* и синхронной реактивной машины, внешний вид конструкции которой представлен на рис. 3.10.

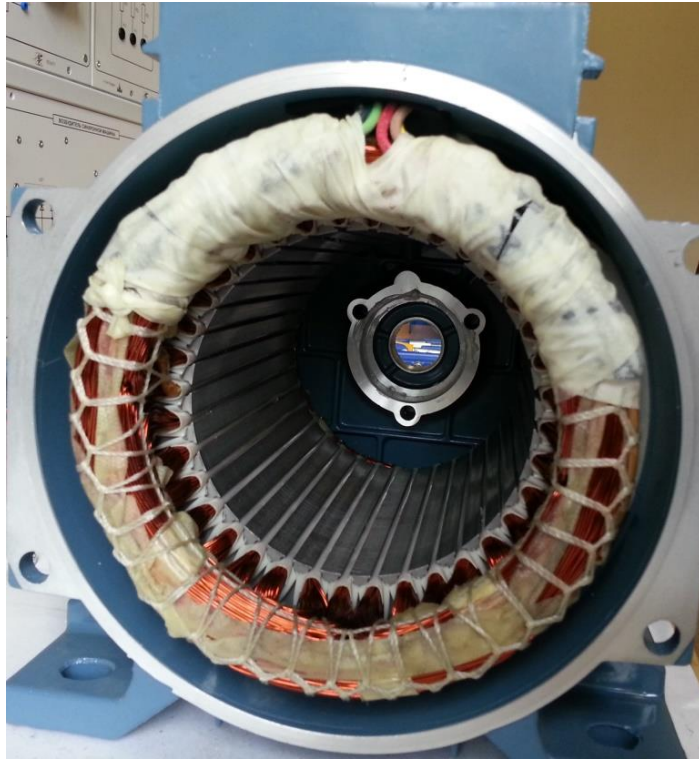
В качестве критерия сравнения принимались осциллограммы скорости и тока (момента). Был произведен статистический анализ адекватности трех предложенных выше моделей. В качестве эталонных кривых были приняты осциллограммы, полученные в ходе натурального эксперимента. Обработка проводилась для 31 выборки для случаев работы на пониженной и номинальной скорости. Статический момент нагрузки варьировался от 0 до 3 Мн. Данные статистической обработки приведены в табл. 3.1.

Табл. 3.1 – Статистический анализ адекватности математических моделей

| № | М | $\omega_{ЭКСП}$ | ω_{Matlab} | d_{Matlab} | $\omega_{MatlabT}$ | | $d_{MatlabT}$ | ω_S | d_S |
|------------|-----|-----------------|-------------------|--------------|--------------------|------------------|---------------|------------|-------|
| 1 | 0 | 1 | 1,01 | 0,01 | 1,02 | | 0,02 | 1,001 | 0,001 |
| 2 | 0,1 | 1 | 1,006 | 0,006 | 0,97 | | -0,03 | 1 | 0 |
| 3 | 0,2 | 1 | 0,99 | -0,01 | 0,98 | | -0,02 | 1,004 | 0,004 |
| | ... | | | | | | | | |
| 31 | 3 | 1 | 0,988 | -0,012 | 0,754 | | -0,246 | 0,99 | -0,01 |
| | | | | | М<М _Н | М>М _Н | | | |
| S_d | | | 0,0089 | 0,019 | | 0,23 | 0,004 | | |
| t | | | 0,47 | 0,75 | | 2,67 | 0,25 | | |
| $t_{КРИТ}$ | | | 1,696 | | | | | | |
| № | М | $\omega_{ЭКСП}$ | ω_{Matlab} | d_{Matlab} | $\omega_{MatlabT}$ | | $d_{MatlabT}$ | ω_S | d_S |
| 1 | 0 | 0,1 | 0,108 | 0,008 | 0,101 | | 0,001 | 1 | 0 |
| 2 | 0,1 | 0,1 | 0,089 | -0,011 | 0,103 | | 0,003 | 1,004 | 0,004 |
| 3 | 0,2 | 0,1 | 0,09 | -0,01 | 0,094 | | -0,006 | 1,002 | 0,002 |
| | ... | | | | | | | | |
| 31 | 3 | 0,1 | 0,106 | 0,006 | 0,0648 | | - 0,0352 | 0,099 | 0,001 |
| | | | | | М<М _Н | М>М _Н | | | |
| S_d | | | 0,18 | 0,021 | | 0,29 | 0,009 | | |
| t | | | 2,21 | 0,86 | | 2,89 | 0,36 | | |
| $t_{КРИТ}$ | | | 1,696 | | | | | | |

| | | | | |
|------------|--------|--|--|---------------------------|
| Вы- вод | Эталон | Высокая по- грешность на низких скоро- стях | Высокая погрешность в зоне перегрузок | Оптимальная сходимость |
|------------|--------|--|--|---------------------------|

Как видно из таблицы, полученные значения квантиля Стьюдента не превышают критического значения для моделей, учитывающих распределение магнитного поля в электрической машине. Математическая модель *Matlab*, также дает адекватный результат, но только при работе в номинальной точке, на пониженных скоростях из-за не учёта пульсаций момента наблюдается расхождение данных моделирования относительно эксперимента более, чем на 10%. Табличный расчет магнитного состояния машины дает более удовлетворительные результаты, однако в силу дискретности снятия данных характеристик в режимах перегрузки получается достаточно большая погрешность, не превышающая, однако, 5%. Оптимальную сходимость во всем диапазоне работы удалось получить на модели, выполненной в комплексе *ANSYS Simplorer Maxwell*.



а)



б)

Рис. 3.10. Внешний вид СРМ компании ABB а) статор б) ротор

Выводы по третьей главе

1. Анализ существующих систем управления показал, что наиболее высокого быстродействия контура момента можно добиться в системах с DTC управлением. Однако при моделировании работы электропривода с такой системой управления существует ряд проблем. С одной стороны, важно учитывать магнитное состояние электрической машины на каждом шаге расчета для учета влияния зубцовых пульсаций на работу контура момента. С другой стороны, столь высокое быстродействие системы для адекватного моделирования её работы требует производить расчет с шагом менее 0,005 мс. Такой подход является достаточно ресурсозатратным с точки зрения вычислительных мощностей даже для современных суперкомпьютерных кластеров. В этой связи была предложена модель, учитывающая магнитное состояние машины табличным способом, полученное при расчете электромеханического преобразователя методом конечных элементов заранее.
2. Поскольку в качестве наиболее подходящего для данного технологического объекта в предыдущей главе была выбрана синхронная реактивная машина, синтез системы прямого управления моментом производился с учетом данной особенности. Так, была предложена структура регулятора момента, учитывающая переменный характер его изменения.
3. Было доказано, что данная система по умолчанию является робастной. Изменение сопротивления статорной обмотки r_1 при нагреве машины и изменение соотношения x_d/x_q в зоне перегрузок в диапазоне $\pm 20\%$ не влияет на время переходного процесса и перерегулирование в контуре момента.

ГЛАВА 4. АДАПТАЦИЯ СИСТЕМЫ К РАБОТЕ НА ПОВЫШЕННЫХ СКОРОСТЯХ И В ЗОНЕ ПЕРЕГРУЗОК

Одним из путей повышения производительности стана является увеличение максимальной скорости подачи (пп.1.4). При работе электропривода с СРМ на повышенных скоростях инерционность обмоток статора может существенно влиять на процесс коммутации токов. При значительном запаздывании переключения тока относительно сигнала задания часть статорной обмотки, выполняющая функцию якоря находится не строго над полюсом, а на некотором отклонении от оптимального положения. Вследствие этого усиливается размагничивающая составляющая поля, и при $I=const$ электромагнитный момент падает. В данной главе дается количественная оценка данных потерь и производится синтез адаптивной системы управления, позволяющей работать с максимально возможным соотношением M/I в широком диапазоне регулирования скорости.

4.1 Оценка потерь при работе на повышенных скоростях, обусловленных инерционностью обмотки статора

На модели, приведенной на рис. 2.15, выполненной в программном комплексе *ANSYS Simplorer–Maxwell* производились исследования влияния инерционности контура тока на регулировочные показатели электропривода на базе СРМ с независимым управлением по каналу возбуждения. Постоянной была задана статическая нагрузка. Поскольку представленная система является замкнутой, момент, создаваемый электроприводом в установившемся режиме был для всех случаев постоянным. При увеличении скорости, увеличивалась и частота коммутации тока статора, имеющего прямоугольную форму. Так как в обмотке с индуктивностью L , ток не может мгновенно изменить направление, данное переключение происходит с определенной задержкой. На малых скоростях величина этой задержки занимает незначительную долю в периоде коммутации и не оказывает большого воздействия. В случае работы

на скорости порядка 2–3 тыс. об/мин (в случае представленной шестиполусной машины) данная задержка играет существенную роль в переходном процессе в контуре тока. За время данной коммутации ток имеет условно «неправильный» знак, и соответственно оказывает размагничивающее влияние на полюс ротора. При этом для создания того же момента требуется потреблять больший ток. Осциллограммы описанных процессов приведены на рис 4.1.

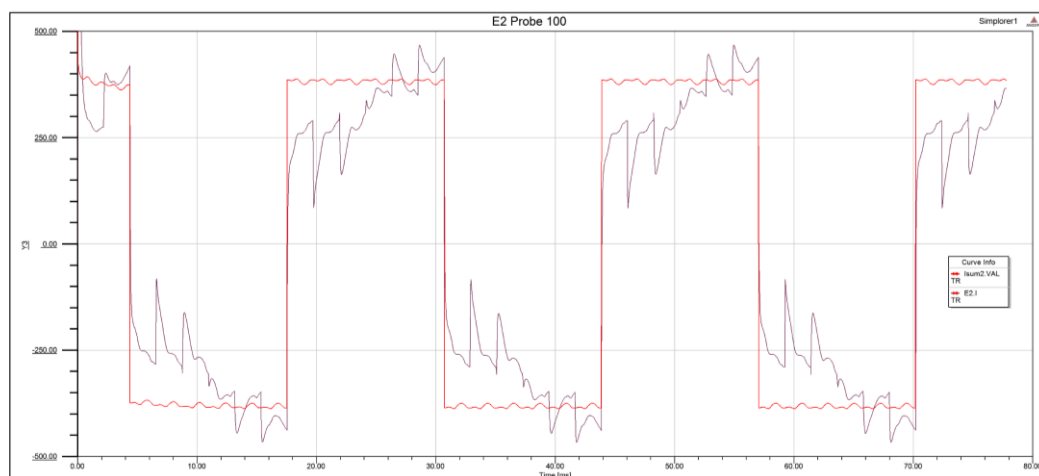
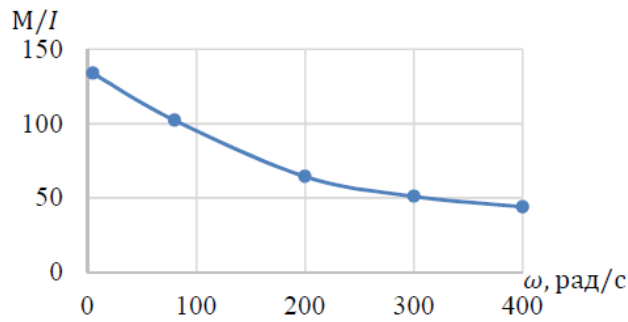


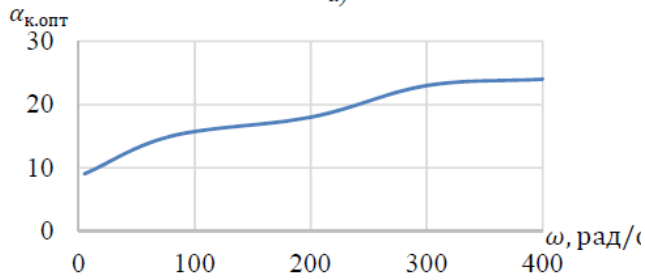
Рис. 4.1. Осциллограммы мгновенного значения фазного тока 1 и сигнала на его задание 2

Как видно из рисунка, мгновенное значение тока в фазе отличается от сигнала задания: имеется как небольшой сдвиг по фазе, так и колебательный характер, обусловленный зубцовыми пульсациями момента. Для оценки величины потерь, обусловленных вышеописанными процессами, производилось вычисления среднеквадратичного тока за несколько периодов $I_{\text{ср.кв}}$. При увеличении скорости для минимизации времени нахождения полюса в «неправильном» положении производился сдвиг момента коммутации, другими словами ток в обмотке переключался заранее. Технически это возможно сделать введя угол коррекции КУ (см. рис. 2.14).

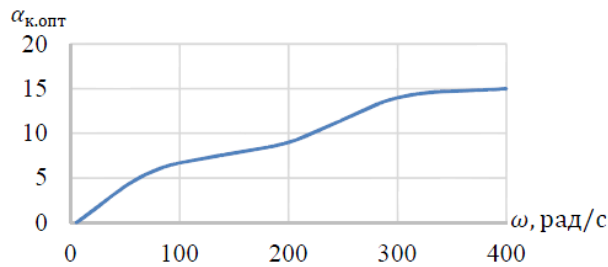
На рис. 4.2 приведена зависимость соотношения M/I для оптимального угла коррекции, т.е. когда при $M=\text{const}$, $I_{\text{ср.кв.}} = \text{min}$ при варьировании скорости вала двигателя $\omega = 1 \dots 400$ рад/с. Очевидным здесь является то, что при увеличении скорости двигателя сигнал задания на ток необходимо сдвигать на больший угол. Однако возникает вопрос, почему при $\omega = 1$ оптимальный угол



а)



б)



в)

Рис. 4.2. Зависимость соотношения M/I от скорости ω а) при оптимальном угле коррекции $\alpha_{к.опт}$ б) и зависимость оптимального угла коррекции $\alpha_{к.опт}$ при идеальных источниках тока в)

отличается от 0. Обусловлено данное явление инерционностью источника тока. В данном случае источник тока представлен идеальным источником

напряжения охваченным обратной связью по току. Несмотря на большой диапазон полосы равномерного пропускания частот ЛАЧХ контура тока (см., например, рис. 3.1), данная инерционность вносит значительную коррекцию в процесс коммутации. Если теперь, используя возможности программного продукта *ANSYS Simplorer* мы заменим источники тока, реализованные вышеописанным

способом на идеальные, то при минимальной скорости оптимальным углом коррекции будет нулевой угол $\alpha_{к.опт} = 0$. Для аналогичного диапазона скоростей зависимость оптимального угла коррекции при использовании идеальных источников тока приведена на рис. 4.2, в.

4.2 Модальное управление в двухмассовой системе

Зачастую в сложных системах, описываемых дифференциальными уравнениями третьего порядка и выше обеспечить требуемую точность простыми

методами становится практически невозможно. В этом случае выбирают другой путь, позволяющий уменьшить статическую ошибку по положению – применение структур с модальным управлением. Суть его сводится к следующему.

В системе, приведенной на рис. 1.5 введем обратную связь по каждой из координат прямого канала (рис 4.3). Таким образом у нас получится 4 контура регулирования: момента M , скорости вала двигателя n_1 , момента упругости M_y и скорости перемещения каретки n_2 . Настройку начнем с контура момента, выполним его максимально быстродействующим, выбрав соответствующую ве-

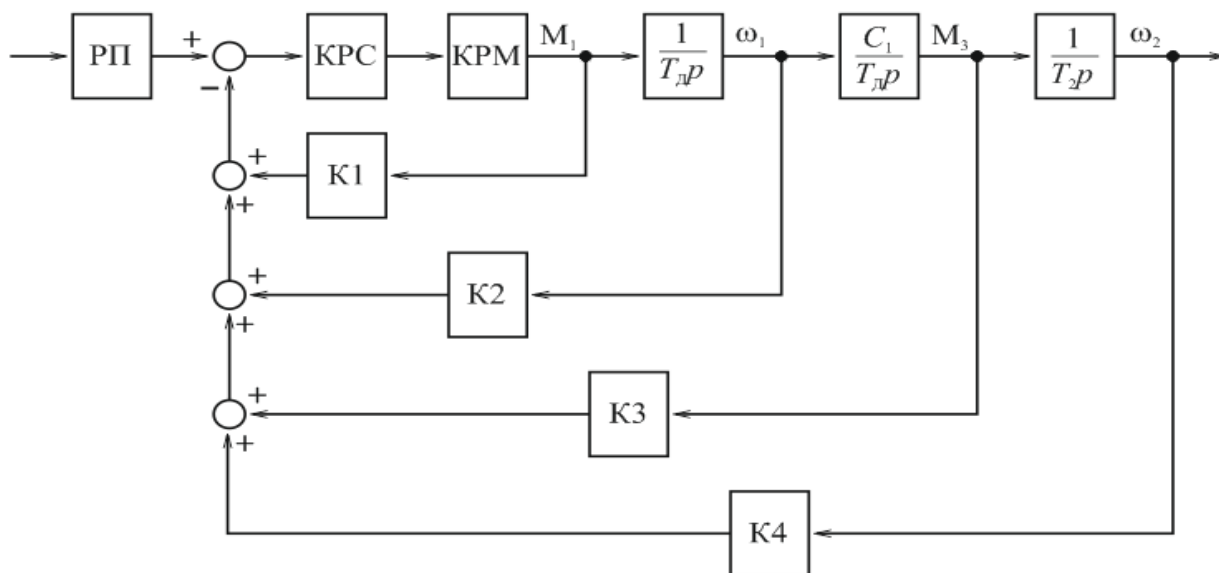


Рис. 4.3. Структура модального управления

личину коэффициента k_1 . Далее, варьируя величину коэффициента обратной связи контура скорости вала двигателя k_2 , добьемся постоянной времени данного контура $T_2=(2...4)T_1$. Настройку всех последующих контуров произведем аналогичным образом. В конечном итоге получим систему, в которой постоянная времени каждого последующего внешнего контура будет в 2...4 раза больше. Перекрестные связи можно учесть двумя способами: либо привести к сумматору, расположенному на выходе регулятора положения по правилам переноса, либо отбросить [148].

Получившаяся система регулирования позволяет достичь высоких динамических показателей. Однако, за счет большого числа обратных связей требует большого количества датчиков, что ведет к существенному её удорожанию. Для решения этой проблемы принято использовать «наблюдатели» – устройства, вычисляющие в режиме реального времени координаты привода по одному или нескольким, доступным для измерения сигналам. С учетом развития современной микропроцессорной техники реализация данных устройств не представляет особой сложности. Однако, следует отметить, что полноценно просчитать все координаты реального объекта с учетом возмущающих воздействий и внешних факторов практически невозможно. Для увеличения точности расчета наблюдатель обычно охватывают обратной связью по положению (рис 4.4).

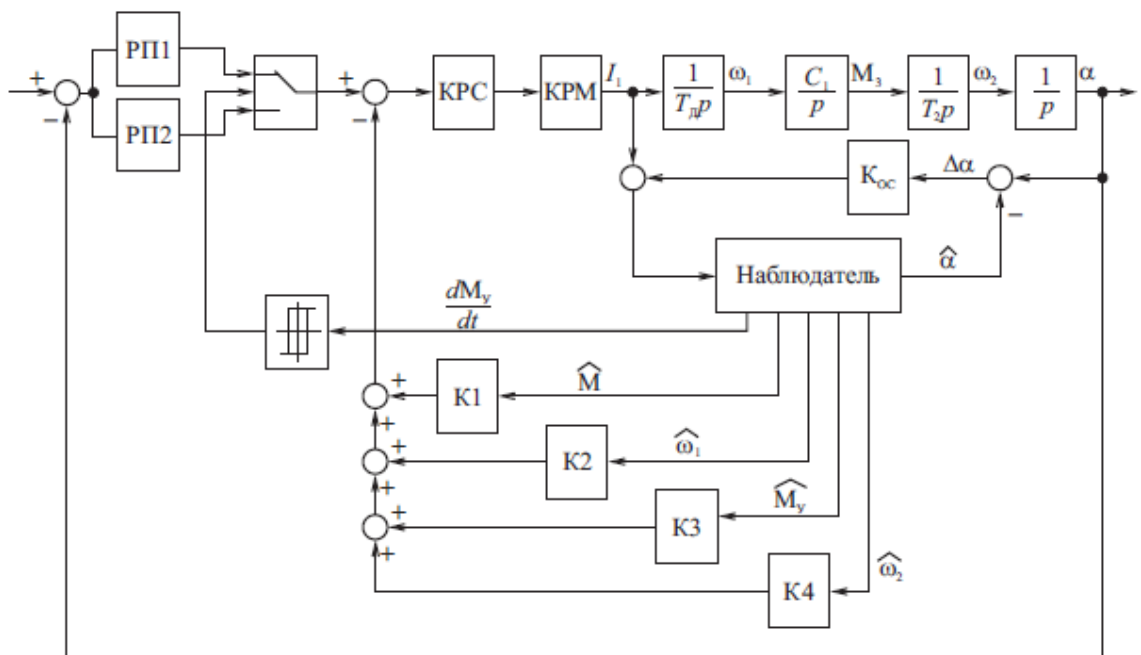


Рис. 4.4. Структурная схема модального управления привода подачи

Отличительной особенностью приведенной схемы является выбор структуры регулятора положения в функции производной момента упругости по времени. Такое решение позволяет упростить передаточную функцию самого регулятора.

В гл.1 был описан принцип модального управления для существующей системы. Данный подход является эффективным способом достижения высоких динамических показателей в сложных системах регулирования [149]. Настройка данной системы начинается с самого внутреннего контура регулирования момента и выполняется с помощью выбора коэффициента усиления k_1 таким образом, чтобы получить максимально возможное быстродействие при минимальной колебательности процессов. В нашем случае, как было показано в предыдущей главе получить данные показатели не является сложной задачей, так как системы с прямым управлением моментом имеют максимально высокие динамические показатели.

Затем производится настройка контура скорости двигателя ω_1 посредством изменения коэффициента усиления k_2 канала обратной связи. Частоту среза данного контура уменьшают в 2...4 раза, так как в контуре добавляется интегрирующее звено с постоянной времени T_m .

При настройке контура 2 возникает вопрос учета местных обратных связей, обусловленных естественными свойствами неизменяемой части системы, например, перекрестной связи по моменту упругости. Её мы учтем при настройке следующего контура перенеся воздействие M_1 на вход регулятора РС. Аналогично выполняется настройка последующих контуров регулирования с обратными связями по переменным состояния M_2 и n_2 , которая осуществляется выбором величин коэффициентов усиления k_3 и k_4 .

Выполним настройку модальных регуляторов по алгоритму, предложенному и подробно описанному профессором Ю.С. Усыниным в [149].

В реальных системах можно добиться того, что постоянна времени контура регулирования момента в системах ДТС на базе синхронной реактивной машины будет составлять $T_p=0,001$ с, $T_m=0,04$ – электромеханическая постоянная времени двигателя, $T_{мп}=0,01$ постоянная времени звена, учитывающего упругость винтовой передачи, $T_{рм}=0,1$ – электромеханическая постоянная времени рабочего механизма, $k_p=1$ – коэффициент усиления преобразователя, $k_r=10$ – коэффициент усиления регулятора РС.

Так как постоянная времени T_p мала, то необходимость вводить обратную связь при настройке данного контура не имеет смысла. Другими словами, $k_1=0$. Передаточную функцию контура регулирования момента аппроксимируем апериодическим звеном первого порядка

$$W_1 = k_{PC}k_{II}W_{PM} = \frac{10}{1 + 0,001p}$$

Далее произведем настройку контура 2 скорости ω_1 , так чтобы частота среза данного контура была порядка $\omega_2 \approx 250$ рад/с. Тогда

$$W_1W_d = \frac{10}{0,04p(1 + 0,001p)}$$

После охвата звеньев прямого канала обратной связью с коэффициентом усиления k_2 передаточную функцию замкнутого контура 2 можно аппроксимировать выражением:

$$W_2 = \frac{1}{k_2(1 + T_2p)(1 + T_p p)} = \frac{1}{(1 + 0,004p)(1 + 0,001p)}$$

При настройке следующего контура регулирования 3 с обратной связью по моменту упругости в его прямой канал последовательно с замкнутым по ω_1 контуром 2 включается интегральное звено МП. Следовательно частоту среза ω_3 этого контура по сравнению с предыдущим необходимо уменьшить в 2...4 раза. Выберем

$$\omega_3 = \frac{\omega_2}{2 \dots 4} = \frac{250}{2 \dots 4} = 100 \text{ рад/с}$$

Тогда, аналогичным образом

$$W_3 = \frac{1}{k_3(1 + T_3p)(1 + T_2p)} = \frac{1}{(1 + 0,01p)(1 + 0,004p)}$$

Настройка четвертого контура. Здесь в прямой канал последовательно с контуром 3 включается интегрирующее звено рабочего органа РО. Частоту среза данного контура выберем

$$\omega_4 = \frac{\omega_3}{2 \dots 4} = \frac{100}{2 \dots 4} = 30 \text{ рад/с.}$$

Аппроксимированная передаточная функция будет выглядеть следующим образом:

$$W_4 = \frac{1}{k_4(1 + T_4p)(1 + T_3p)} = \frac{1}{3(1 + 0,03p)(1 + 0,01p)}$$

Таким образом мы получили систему с настроенными предварительно параметрами регуляторов.

4.3 Адаптивная система с самонастройкой параметров

Настройка регуляторов системы управления является важным этапом при пуско-наладочных работах. Однако, настроив систему для работы с определенным объектом, нет уверенности в том, что система будет работать корректно при изменении его параметров. Более того, на некоторых технологических объектах добиться робастности системы, или, другими словами, устойчивости её работы при изменении параметров объекта регулирования без применения самонастройки вовсе невозможно. Одним из наиболее ярких примеров здесь является механизм моталка–разматывателя. В начале его работы масса рулона велика, момент инерции большой, и система, настроенная исключительно для начальных параметров, не будет работоспособной, когда большая часть рулона будет размотана и момент инерции объекта уменьшится в несколько раз.

Технологический объект стана холодной прокатки труб является много-связанным объектом. Труба является связующим звеном, т.е. оказывает статическую нагрузку на электроприводы проката, подачи, поворота. В ходе прокатки, если рассматривать такую систему с позиции исключительно электропривода подачи, параметры объекта управления могут существенно меняться. Кроме того, при срыве трубы с оправки электропривод работает в зоне перегрузки, что ведет к насыщению магнитной системы электрической машины и существенному изменению соотношения L_d/L_q . Работа в зоне перегрузок

приводит к нагреву машины и увеличению активного сопротивления статорной обмотки r_1 . Задачей современной системы электропривода является обеспечить требуемые показатели качества регулирования, в конечном итоге движения трубы. Одним из путей достижения этой цели является применение адаптивных систем с самонастройкой.

Изначально корректно настроенный ПИ-регулятор тока при изменении параметров системы будет выдавать статическую ошибку, либо сделает систему неустойчивой вследствие изменения постоянной времени контура тока.

Системы *DTC* в этом смысле являются более надежными, так как регуляторы тока (момента) в них выполнены не линейными, а релейными. Однако и в этих системах при изменении параметров сверх допустимых пределов настройка релейного коридора, выполненная изначально впоследствии будет работать не корректно, что также приведет к неустойчивости системы.

Рассмотрим возможность настройки контура тока, устойчивого к изменению параметров на примере регулятора тока, одной фазы синхронной реактивной машины с независимым управлением по каналу возбуждения (рис. 4.5). В данном случае, обмотка запитана от источника напряжения, охваченного обратной связью по току. Структурная схема регулятора также содержит блок эталонной модели ЭМ и корректирующее звено W_k .

В случае, когда работает связь 1, такая адаптация называется сигнальной. Заданное значение тока подается на вход эталонной модели, где по расчетным параметрам объекта определяется желаемый сигнал. В случае, если желаемый и выходной сигналы совпадают, их разность будет равна нулю и никакой дополнительной коррекции производиться не будет. При изменении параметров объекта, фактический сигнал будет значительно отличаться от желаемого, что приведет к увеличению их разности и работе корректирующего звена. Такая система является достаточно робастной, однако требует грамотной настройки. В случае, если значение коэффициента усиления корректирующего звена бу-

дет слишком мало, система не будет успевать адаптироваться к изменению параметров. В случае слишком большого коэффициента мы можем получить колебательность в этом звене исключительно за счет дополнительного контура.

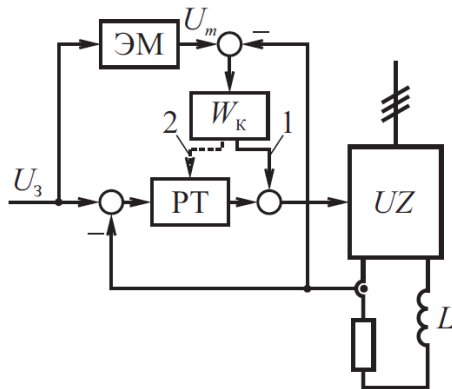


Рис. 4.5. Сигнальная 1 и параметрическая 2 адаптация

В случае, если активным является сигнал 2, данных недостатков можно избежать. При такой структуре не происходит дополнительного суммирования с сигналом задания на напряжение, что, кстати, ведет к снижению вероятности аварийных режимов. Вместо этого в ходе работы происходит коррекция параметров ПИ – регулятора тока. Такая адаптация

называется параметрической. Как известно, ПИ – регулятор обладает совокупностью свойств П и И – регуляторов. П канал определяет быстродействие системы, а И-канал её точность. Параметрическая адаптация делает возможным воздействие на оба этих регулятора, что позволяет значительно улучшить показатели регулирования.

Большую работу в разработке и настройке систем с сигнальной и параметрической адаптацией проводил В. В. Путов [110]. В частности, в [110] подробно описана методика настройки системы с двухмассовым упругим электромеханическим объектом и подчиненным управлением. В данном случае отсутствие адаптивной самонастройки системы может привести к тому, что настроенный на максимальное быстродействие контур скорости будет способствовать усилению колебаний в упругом контуре.

Настройка системы производится автором по модальному принципу. Очевидно в этом случае, что для реализации обратных связей в контуре упругости необходимо иметь координаты объекта, такие как ω_2 и M_y . Как упоминалось в первой главе, данные величины вычисляются наблюдателем:

$$\begin{aligned}\widehat{\omega}_2 &= a_1 M_y + k_1 C (\widehat{\omega}_1 - \omega_1); \\ \widehat{M}_y &= a_2 (\widehat{\omega}_1 - \widehat{\omega}_2) + k_2 (\widehat{\omega}_1 - \omega_1).\end{aligned}$$

Наиболее наглядно данная система уравнений представлена на структурной схеме (рис 4.6). Эталонная модель, представленная на рис. 4.5 звеном ЭМ представляет собой систему дифференциальных уравнений:

$$\dot{X}_M = A_M X_M + b_M u^0;$$

$$A_M = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -\bar{a}_0 & -\bar{a}_1 & -\bar{a}_2 \end{pmatrix}; b_M = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ k_M \end{pmatrix},$$

где $x_M = (\omega_{2M}, M_y, \omega_{1M})^T$; неединичные коэффициенты матрицы A_M являются коэффициентами её характеристического многочлена

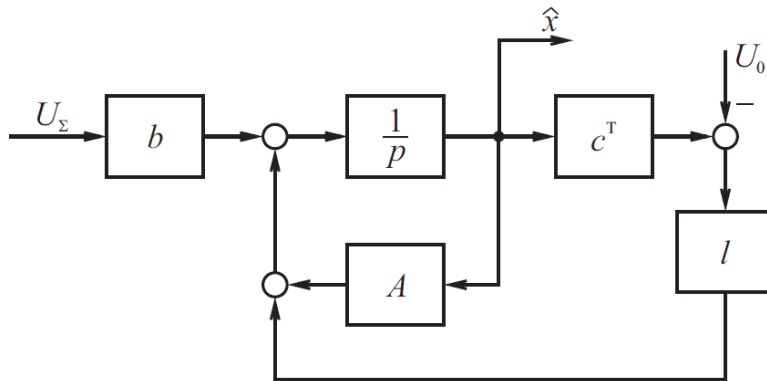


Рис. 4.6. Наблюдатель упругого объекта по измерению скорости ω_1

$$\varphi_M(\lambda) = \lambda^3 + \bar{a}_2 \lambda^2 + \bar{a}_1 \lambda + \bar{a}_0.$$

В виде структурной схемы данная модель приведена на рис. 4.7.

Передаточная функция корректирующего звена строится в виде релейного адаптивного закона (рис. 4.8):

$$\begin{cases} u_a(t) = (h_0 + h_1 f(\widehat{M}_y)) \text{sign } \delta(\hat{e}); \\ \delta(\hat{e}) = k_M p^T e; \hat{e} = x_M - \hat{x}; p^T = (p_1, p_2, p_3); \\ \hat{e} = (\hat{e}_1, \hat{e}_2, \hat{e}_3)^T; \delta(\hat{e}) = k_M \sum_{i=1}^3 p_i \hat{e}_i; \hat{e}_1 = x_{1M} - \widehat{\omega}_2; \\ \hat{e}_2 = x_{2M} - \widehat{M}_y; \hat{e}_3 = x_{3M} - \widehat{\omega}_1; p_i > 0; i = 1.2.3 \end{cases}$$

где h_0, h_1 – постоянные коэффициенты усиления алгоритма, удовлетворяющие оценкам, получаемым в процессе проектирования, которые, в свою очередь, определяются ограничениями, накладываемыми на адаптивное управление, p_i – положительные весовые коэффициенты

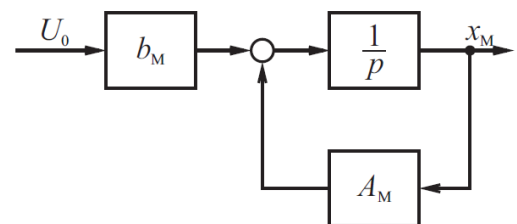


Рис. 4.7. Эталонная модель

линейной комбинации ошибок \hat{e}_i , $f(\widehat{M}_y)$ – произвольно возрастающая функция, удовлетворяющая условиям роста

$$\lim_{|\widehat{M}_y| \rightarrow \infty} f(\widehat{M}_y) = +\infty.$$

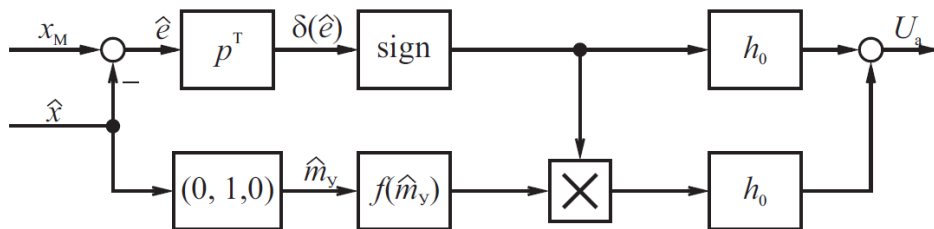


Рис. 4.8. Сигнальный (релейный) закон адаптации

Структурная схема адаптивного регулятора приведена на рис. 4.7.

4.3.1 Адаптация к работе на повышенных скоростях

Особенностью системы адаптации для работы на повышенных скоростях, проблематика которой описана в пп.4.1. является наличие корректирующего воздействия не только на сигнал задания тока, но и на угол коррекции КУ (рис. 2.14).

В представленной на рисунке системе корректирующий сигнал задается константой. Величина угла коррекции, полученная заранее, представлена на рис. 4.2. Возможен вариант табличного задания угла коррекции по полученным данным. Однако, в ходе работы в силу изменения параметров L_d/L_q возможно изменения постоянной времени контура тока. Тогда, вычисленные заранее значения не будут являться оптимальными. Наличие сигнального адаптивного регулятора позволяет регулировать мгновенное значение тока не только по амплитуде, но и по фазе, что позволит снизить среднеквадратичное значение тока за период, тем самым повысить соотношение M/I .

Поскольку каждая фаза запитана от индивидуального источника тока, модуляция амплитуды сигнала будет производиться посредством сигнала выхода регулятора скорости (рис. 4.9). Дополнительно данная модуляция будет корректироваться посредством адаптивного регулятора по алгоритму, описанному выше.

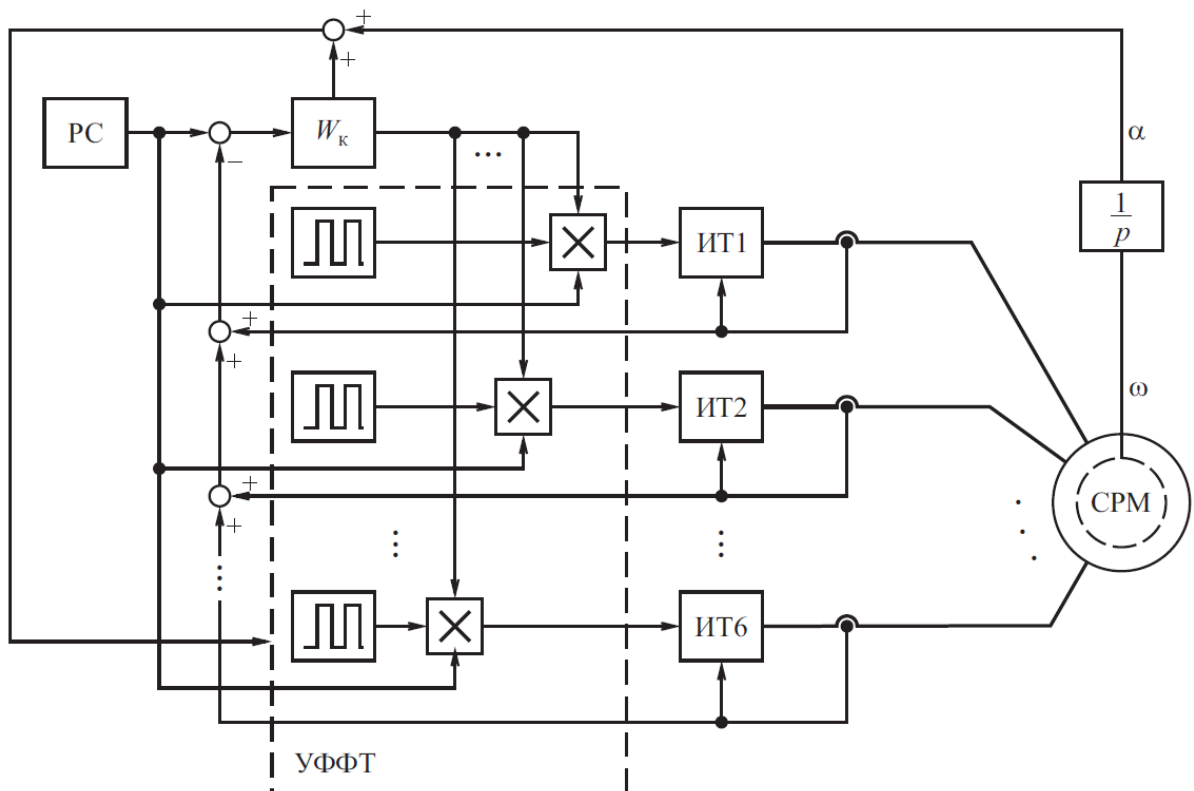


Рис. 4.9. Структурная схема сигнальной адаптации к работе на повышенных скоростях

Поскольку узел формирования фазных токов УФФТ имеет строгую релейную структуру, коррекция его работы будет производиться за счет воздействия на сигнал текущего угла поворота ротора также за счет адаптивного регулятора. На малых скоростях значение данного сигнала будет близко к 0, при повышении скорости сигнал рассогласования между желаемым значением и реально измеренным будет увеличиваться, что приведет к увеличению угла коррекции.

Осциллограммы переходных процессов сигнала скорости представлены на рис.4.10. На модели искусственно менялись значения сопротивления $r1$ (рис. 4.10,а), соотношение x_d/x_q (рис 4.10, б) и пуск до повышенной скорости 3000 об/мин (рис 4.10, в). Как видно из рисунка, отработка резкого изменения параметров двигателя происходит за время порядка 0,15 мс. Разгон до повышенной скорости происходит без особенностей.

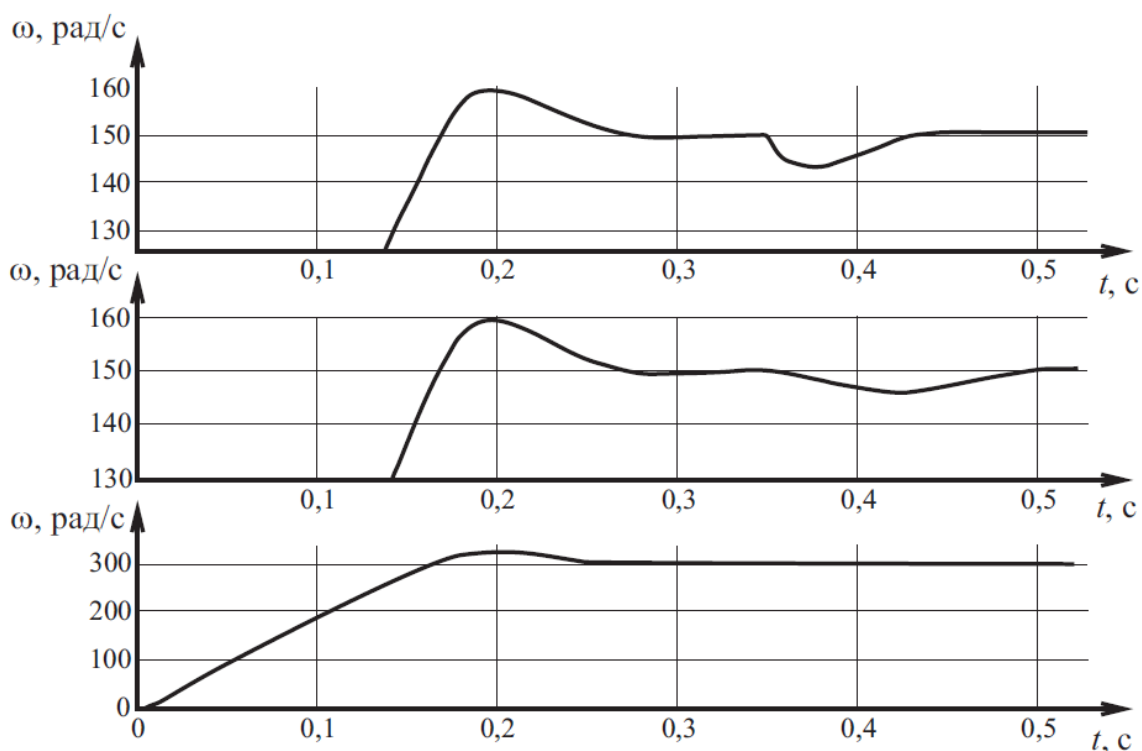


Рис. 4.10. Осциллограммы скорости при отработке скачкообразного изменения сопротивления r_1 а), соотношения x_d/x_q б) и пуск до повышенной скорости 3000 об/мин в)

Выводы по четвертой главе

1. Анализ работы электропривода с СРМ на повышенных скоростях показал, что наличие задержки в процессе коммутации тока за счет собственной индуктивности обмотки влияет на добротность регулирования M/I . Для повышения этого показателя был произведен расчет угла коррекции, позволяющего сдвигать по фазе ток в каждой обмотке за счет чего процесс коммутации приближается к оптимальному, что ведет к увеличению электромагнитного момента, создаваемого машиной при том же токе, потребляемом из сети.
2. На основе алгоритмов модальной адаптации, предложенных проф. Усыниным Ю.С. и Путовым В.В. была реализована структурная схема повышающая устойчивость работы электропривода на базе СРМ при изменении параметров электрической машины, таких как r_1 и x_d/x_q .

3. На основе разработанной структуры была предложена методика адаптации к работе синхронной реактивной машины с независимым управлением по каналу возбуждения на повышенных скоростях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Модернизация электропривода подачи позволит снизить процент брака выпускаемой продукции, что даст значительный экономический эффект. Главным недостатком существующего технического решения является низкое быстродействие контура момента, которое обусловлено низкой коммутационной возможностью тиристорного преобразователя, наличием задержки канала АЦП-ЦАП. Кроме того, из-за необходимости бестоковой паузы в работе тиристорного преобразователя увеличивается коэффициент несинусоидальности тока, что приводит к уменьшению действующего электромагнитного момента двигателя. Одним из возможных решений вышеуказанной проблемы в существующей системе электропривода является применение модального управления в системе управления. Такое решение позволит повысить быстродействие системы на 5–7% без снижения точности позиционирования. Однако для достижения наибольшего эффекта есть смысл произвести модернизацию силовой части оборудования. Тогда придется вновь пересмотреть в комплексе систему преобразователь–двигатель с позиции быстродействия и точности.

Наиболее подходящим с точки зрения максимального быстродействия, высокой перегрузочной способности и широкого диапазона регулирования скорости является синхронная реактивная машина с независимым управлением по каналу возбуждения. Однако работы по усовершенствованию конструкции данного электромеханического преобразователя производились в основном в 80-х годах прошлого века. В то время машина рассматривалась как «классическая» реактивная, т.к. не было технической возможности реализовать требуемую систему управления для независимого управления по каналу возбуждения. Современные математические методы позволяют более точно определять параметры машины со сложным ротором, такие, например, как Ld и Lq , что позволило максимально точно оптимизировать геометрию электрической машины для конкретного механизма по критерию максимума значения

М/І. Кроме того, данная оптимизация производилась с учетом работы электрической машины от преобразователя частоты. Комплексный подход к проектированию системы электропривода позволил также произвести оптимизацию законов управления и синтез её системы

Поскольку в системе подачи важно не только быстродействие, но и точность позиционирования, синтез системы управления и силовой части электропривода производился в комплексе данных двух критериев. Так, одним из наиболее важных этапов был выбор оптимального передаточного числа редуктора. Исходя из требования минимального времени переходного процесса для всех возможных нагрузок был получен диапазон возможного передаточного числа редуктора. Далее, по методике Ю.С. Усынина был получен диапазон возможных значений передаточного числа редуктора, значительно повышающий устойчивость системы за счет снижения амплитудного максимума в упругом звене двухмассовой системы. Пересечение данных диапазонов дало результат в виде оптимального передаточного числа редуктора.

Было доказано, что высоких показателей быстродействия и устойчивости системы для полученной системы управления можно добиться лишь имея высокое быстродействие контура момента. Анализ существующих систем управления и выбору наиболее оптимальной по вышеуказанному критерию посвящена следующая глава.

Анализ существующих систем управления показал, что наиболее высокого быстродействия контура момента можно добиться в системах с DTC управлением. Однако при моделировании работы электропривода с такой системой управления существует ряд проблем. С одной стороны, важно учитывать магнитное состояние электрической машины на каждом шаге расчета для учета влияния зубцовых пульсаций на работу контура момента. С другой стороны, столь высокое быстродействие системы для адекватного моделирования её работы требует производить расчет с шагом менее 0,005 мс. Такой подход

является достаточно ресурсозатратным с точки зрения вычислительных мощностей даже для современных суперкомпьютерных кластеров. В этой связи была предложена модель, учитывающая магнитное состояние машины табличным способом, полученное при расчете электромеханического преобразователя методом конечных элементов заранее.

Поскольку в качестве наиболее подходящего для данного технологического объекта в предыдущей главе была выбрана синхронная реактивная машина, синтез системы прямого управления моментом производился с учетом данной особенности. Так, была предложена структура регулятора момента, учитывающая переменный характер его изменения.

Было доказано, что данная система по умолчанию является робастной. Изменение сопротивления статорной обмотки r_1 при нагреве машины и изменение соотношения x_d/x_q в зоне перегрузок в диапазоне $\pm 20\%$ не влияет на время переходного процесса и перерегулирование в контуре момента.

Анализ работы электропривода с СРМ на повышенных скоростях показал, что наличие задержки в процессе коммутации тока за счет собственной индуктивности обмотки влияет на добротность регулирования M/I . Для повышения этого показателя был произведен расчет угла коррекции, позволяющего сдвигать по фазе ток в каждой обмотке за счет чего процесс коммутации приближается к оптимальному, что ведет к увеличению электромагнитного момента, создаваемого машиной при том же токе, потребляемом из сети.

На основе алгоритмов модальной адаптации, предложенных проф. Усыниным Ю.С. и Путовым В.В. была реализована структурная схема повышающая устойчивость работы электропривода на базе СРМ при изменении параметров электрической машины, таких как r_1 и x_d/x_q .

На основе разработанной структуры была предложена методика адаптации к работе синхронной реактивной машины с независимым управлением по каналу возбуждения на повышенных скоростях.

Результаты, полученные в ходе работы были приняты администрацией пятого цеха ОАО «ЧТПЗ» к внедрению, о сем есть соответствующий акт.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алексеев, В.В. Выбор системы координат при реализации алгоритма векторного управления асинхронным электроприводом / Алексеев В.В., Козярук А.Е., Рудаков В.В., Язев В.И. // Электротехника. – 2010 – № 12. – С. 2 – 10.
2. Анучин, А.С. Система управления с прогнозированием для реализации контура тока предельного быстродействия / А.С. Анучин // Труды МЭИ. Электропривод и системы управления. Вып. 686. – М.: Издательский дом МЭИ, 2010. – С. 69 – 76.
3. Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник / А.Э. Кравчик, М.М. Шлаф, В.И. Афонин, Е.А. Соболенский. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 504 с.
4. Бермант, А.Ф. Курс математического анализа. – Изд. девятое. – М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1959. – 358 с.
5. Беспалов, В.Я. Основные направления совершенствования конструкций и технологии производства асинхронных двигателей / В.Я. Беспалов, Л.Н. Макаров // Сборник материалов V Международной (16 Всесоюзной) конференции по автоматизированному электроприводу: 18–21 сентября 2007 г. Санкт-Петербург. – 2007. – С. 32–36.
6. Беспалов, В.Я. Перспективы создания отечественных электродвигателей нового поколения для частотно-регулируемого электропривода / В.Я. Беспалов // Автоматизированный электропривод в XXI веке: пути развития: тр. IV Международной (XV Всероссийской) конф. по автоматизированному электроприводу (АЭП–2004, Магнитогорск, 14–17 сент. 2004 г.). – Магнитогорск, 2004. – Ч. 1. – С. 24–31.
7. Беспалов, В.Я. Электрические двигатели в XXI веке / В.Я. Беспалов // Тр. III Международной (XIV Всероссийской) науч.-техн. конф. по автоматизированному электроприводу “ЭАП–2001” / под. ред. С.В. Хватова. – Н. Новгород: Вектор–ТиС, 2001. – С. 17 – 19.

8. Беспалов, В.Я. Электрические машины. Учебное пособие для студентов высших учебных заведений / В.Я. Беспалов, Н.Ф. Котеленец. – М.: Издательский центр “Академия”, 2006. – 320 с.

9. Боровик А.А. Многодвигательный электропривод для стана холодной прокатки труб: Дис. - канд. техн. наук : Специальность 05.09.03 - Электротехнические комплексы и системы. – Москва , 2011. – 94 с.

10. Борцов Ю.А. Тиристорные системы электропривода с упругими связями// Борцов Ю.А., Соколовский Г.Г., Ленинград, "Энергия", 1979, 156с.

11. Борцов, Ю.А. Электромеханические системы с адаптивным и модальным управлением / Ю.А. Борцов, Н.Д. Поляхов, В.В. Путов. – Л.: Энергоатомиздат, 1984. – 216 с.

12. Брахман Т. Р. Многокритериальность и выбор альтернативы в технике. — М.: Радио и связь, 1984. – 287 с.

13. Бродовский, В.Н. Приводы с частотно-токовым управлением / В.Н. Бродовский, Е.С. Иванов. – М.: Энергия, 1974. – 168 с.

14. Булгаков, А.А. Частное управление асинхронными электродвигателями / А.А. Булгаков. – 2-е изд., доп. – М.: Наука, 1966. – 297 с.

15. Буровые комплексы/ под общ. редакцией К.П. Порожского. — Екатеринбург: Издательство УГГУ, 2013.—768с.

16. Бычков А.Е. Система управления электропривода с синхронным реактивным двигателем независимого возбуждения: дис. - канд. техн. наук / А.Е. Бычков. – Челябинск, 2013. – 125 с.

17. Бычков, М.Г. Анализ вентильно-индукторного электропривода с учётом локального насыщения магнитной системы // Электричество. – 1998. – №6. – С. 50 – 53.

18. Бычков, М.Г. Основы теории, управление и проектирование вентильно-индукторного электропривода: дис. - докт. техн. наук / М.Г. Бычков. – М., 1999. – 372 с.

19. Валов, А.В. Импульсно-векторное управление асинхронным электроприводом с фазовым ротором: дис. - канд. техн. наук: спец. 05.09.03 – "Электрические комплексы и системы" / А. В. Валов; ЮУрГУ. – Челябинск, 2009. – 166 с.
20. Вейнгер, А.М. Регулируемый синхронный электропривод / А.М. Вейнгер. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 224 с.
21. Вентильный электропривод с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, А.Н. Шишков// Электротехника. – № 3. – С. 37 – 43.
22. Виноградов, А.Б. Цифровая релейно-векторная система управления асинхронным электроприводом с улучшенными динамическими характеристиками / А.Б. Виноградов // Электричество. – №2003. – №6. – С. 43 – 52.
23. Воеводин, В.В. Параллельные вычисления/ В.В. Воеводин, Вл. В. Воеводин. — СПб: БХВ-Петербург, 2002. — 608 с.
24. Вольдек, А.И. Электрические машины/ А.И. Вольдек. Учебник для студентов высш. техн. учебн. заведений. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – Л.: Энергия, 1974. – 840 с.
25. Высоконадёжные энергосберегающие комплексы на основе новых типов вентильных электроприводов и обеспечение их безопасности: гк № П 1135 от 02.06.2010/ рук. А.Б. Тряпицын; исполн. М.А. Григорьев. – Челябинск, ЮУрГУ, 2012. Т1, Т2, Т3, Т4
26. Гаврилов, П.Д. Оптимальный выбор частоты, полюсности и электромагнитных нагрузок взрывозащищенных асинхронных двигателей при частотном управлении / П. Д. Гаврилов // Сборник материалов V Международной (16 Всесоюзной) конференции по автоматизированному электроприводу: 18–21 сентября 2007 г. – Спб., 2007. – С. 151–153.
27. Горожанкин, А.Н. Вентильный электропривод с синхронным реактивным двигателем независимого возбуждения: Дис. - канд. техн. наук : Специальность 05.09.03 - Электротехнические комплексы и системы. – Челябинск , 2010. – 138 с.

28. Григорьев М.А. Синхронный реактивный электропривод с независимым управлением по каналу возбуждения с предельными характеристиками по быстродействию и перегрузочным способностям: дис.-докт.техн.наук: Специальность 05.09.03 - Электротехнические комплексы и системы. – Челябинск, 2014. – 315 с.

29. Григорьев, М.А. Вентильный электропривод с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения: монография / М.А. Григорьев; под ред. Ю.С. Усынина. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2010. – 159 с.

30. Григорьев, М.А. Линейная плотность поверхностного тока в энергосберегающих электроприводах с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения / М.А. Григорьев, А.Е. Бычков // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия “Энергетика”. – 2010. – Вып. 14. – №32(208). – С. 46 – 51.

31. Григорьев, М.А. Предельные возможности электроприводов с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения / М.А. Григорьев // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия “Энергетика”. – 2009. – Вып. 12. – № 34(167). – С. 51 – 55.

32. Григорьев, М.А. Система управления электроприводом с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения / М.А. Григорьев // Электротехника. – 2013 – № 10. – С. 29 – 35.

33. Григорьев, М.А. Системы с переменной структурой для синхронных реактивных электроприводов с независимым управлением по каналу возбуждения / М.А. Григорьев // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия “Энергетика”. – 2013. – Том 13. – №2. – С. 91 – 96.

34. Григорьев, М.А. Удельные массогабаритные показатели электроприводов / М.А. Григорьев // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия “Энергетика”. – 2013. – Том 13. – №1. – С. 111 – 117.

35. Григорьев, М.А. Физические основы теории электропривода с синхронным реактивным двигателем независимого возбуждения / М.А. Григорьев

// Электротехнические системы и комплексы: Межвуз. сб. науч. тр. – Магнитогорск: Изд-во МГТУ, 2002. – вып. 7. – С. 52 – 60.

36. Григорьев, М.А. Электропривод с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения / М.А. Григорьев // Изв. вузов. Электромеханика. – 2013. – № 4. – С. 32 – 36.

37. Григорьев, М.А. Электропривод с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения: дис. - канд. техн. наук / М.А. Григорьев. – Челябинск, 2004. – 138 с.

38. Дискретный электропривод с шаговыми двигателями / Б.А. Ивоботенко, В.П. Рубцов, Л.А. Садовский и др. – М.: Энергия, 1972.– 624 с.

39. Дмитриевский, В.А. Конечноеэлементная модель электрической машины с переключением потока для исследования динамических режимов работы/ В.А. Дмитриевский, В.А. Прахт, Ф.Н. Сарапулов, В.А. Климарев // Электротехника. – 2012 – №3. – С. 7 – 13.

40. Дралюк, Б.Н. Двухдиапазонное управление электродвигателем моталки стана рулонной прокатки листа / Б.Н. Дралюк, А.Е. Тикоцкий // Электричество. 1969. – №5. – С. 41 – 45.

41. Дрейпер Н. Прикладной регрессионный анализ. Множественная регрессия /Н. Дрейпер, Г.Смит // Applied Regression Analysis. — 3-е изд. — М.: «Диалектика», 2007.

42. Дудкин, М.М. Динамические спектральные характеристики развертывающих преобразователей с широтно-импульсной модуляцией / М.М. Дудкин, Л.И. Цытович, О.Г. Брылина // Практическая силовая электроника. – 2012. – № 4 (48). – С. 49 – 55.

43. Дудкин, М.М. Однофазные обратимые преобразователи напряжения для улучшения качества электрической энергии в сетях ограниченной мощности / М.М. Дудкин // Практическая силовая электроника. – 2012. – № 2 (46). – С. 19 – 27.

44. Евдокимцев О.В., Расчет и проектирование стальных балочных клеток. Учебное пособие/ О.В. Евдокимцев, О.В. Умнова - Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2004. - 104 с.
45. Емельянов, С.В. Системы с переменной структурой / С.В. Емельянов. – М.: Изд. Наука, 1967. – 336 с.
46. Ефимов, А.А. Активные преобразователи в регулируемых электроприводах переменного тока / А.А. Ефимов, Р.Т. Шрейнер; под общ. ред. Р.Т. Шрейнера. – Новоуральск: НГТИ, 2001. – 250 с.
47. Жемеров Г.Г. Тиристорные преобразователи частоты с непосредственной связью. М., "Энергия", 1977.
48. Зиновьев, Г.С. Основы силовой электроники: учебное пособие / Г.С. Зиновьев. – 3-е изд., перераб. и доп. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. – 672 с.
49. Иванов, О.В. Статистика: Учебный курс для социологов и менеджеров. Ч. 1. Описательная статистика. Теоретико-вероятностные основания статистического вывода/ О.В. Иванов. - М. 2005. - 187 с.
50. Иванов, О.В. Статистика: Учебный курс для социологов и менеджеров. Ч. 2. Доверительные интервалы/ О.В. Иванов. – М. 2005. – 220 с.
51. Иванов-Смоленский, А.В. Электромагнитные силы и преобразование энергии в электромеханических машинах. В двух томах / А.В. Иванов-Смоленский. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МЭИ, 2006. – 652 с.
52. Изосимов, Д.Б. Алгоритмы векторно-импульсной модуляции трехфазного автономного инвертора напряжения / Д.Б. Изосимов, С.В. Байда // Электротехника. – 2004. – №5. – С. 21–31.
53. Изосимов, Д.Б. Алгоритмы и системы цифрового управления электроприводами переменного тока / Д.Б. Изосимов, В.Ф. Козаченко // Электротехника. – 1999. – №4. – С. 41 – 51.
54. Каган, В.Г. Электроприводы с предельным быстродействием для систем воспроизведения движений / В.Г. Каган. - М. : Энергия, 1975. – 241 с.

55. Ключев, В.И. Теория электропривода: учеб. для вузов / В.И. Ключев. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 2001. – 704 с.
56. Ключев, В.И. Электропривод и автоматизация общепромышленных механизмов: учебник для вузов / В.И. Ключев, В.М. Терехов. – М.: Энергия, 1980. – 360 с.
57. Козаченко, В.Ф. Перспективная микропроцессорная элементная база и опыт разработки современных систем управления электроприводами и силовыми преобразователями энергии / В.Ф. Козаченко // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2010. – Вып. 3. – Ч.2. – С. 14 – 28.
58. Козаченко, В.Ф. Перспективные типы тяговых электроприводов/ В.Ф. Козаченко, В.Н. Остриров, А.М. Русаков // Труды VII Международной (XVIII Всероссийской) научно-технической конференции по автоматизированному электроприводу: ФГБОУ ВПО ИГЭУ. – Иваново, 2012. – С. 16 – 21.
59. Козаченко, В.Ф. Создание высокопроизводительных встраиваемых микроконтроллерных систем управления для современного комплектного электропривода: дис. - докт. техн. наук / В.Ф. Козаченко. – М, 2007. – 326 с.
60. Козина, Т.А. Система импульсно-векторного управления асинхронным электродвигателем с фазным ротором и косвенным определением углового положения ротора: дис. - канд. техн. наук : специальность 05.09.03 - Электротехнические комплексы и системы / Т. А. Козина. – Челябинск, 2012. – 192 с.
61. Козярук А.Е. Системы управления электроприводов. Прямое управление моментом в электроприводе переменного тока: учебное пособие/В.В. Рудаков, А.Е. Козярук. Санкт-петербургский государственный горный институт (технический университет). Санкт Петербург, 2007г. 75с.
62. Козярук, А.Е. Математическая модель системы прямого управления моментом асинхронного электропривода / А.Е. Козярук, В.В. Рудаков // Электротехника. – 2005 – № 9. – С. 8 – 14.

63. Козярук, А.Е. Структура, состав и алгоритмы управления высокоэффективными электроприводами газоперекачивающих агрегатов/ А.Е. Козярук, Б.Ю. Васильев // Электротехника. – 2013 – № 2. С. 43 – 51.
64. Кононенко, Е. В. Синхронные реактивные машины / Е. В. Кононенко. – М. : Энергия , 1970. – 208 с.
65. Кофф З.А. Холодная прокатка труб/Кофф З.А, Соловейчик П.М, Алешин В.А., Гриншпун М.И. - Свердловск, 1962. - 431с.
66. Крановое электрооборудование: Справочник / Под ред. А.А. Рабиновича. – М.: Энергия, 1979. – 238с.
67. Красовский, А.Б. Имитационные модели в теории и практике вентильно-индукторного электропривода: дис.- д-ра техн. наук / А.Б. Красовский. – М, 2003. – 317 с.
68. Лемешко, Б.Ю. Методы оптимизации: Конспект лекций / Б.Ю. Лемешко. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2009. - 126 с.
69. Макаров, Л.Н. Особенности работы асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором в системе частотного регулирования / Л.Н. Макаров, С.В. Ястреба // Электроприводы переменного тока: труды международной 14 научно-технической конференции. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2007, – С. 227 – 230.
70. Математическая модель электропривода с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения / Журавлев А.М., Белоусов Е.В., Бычков А.Е., Кодкин В.Л., Гладышев С.П. //Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2012. – № 37 (296). – С. 34 – 37.
71. Маурер, В.Г. Средства частотного анализа элементов, устройств и систем управления вентильных электроприводов: Учебное пособие/ В.Г. Маурер. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 1998. – 120 с.
72. Метод расчета электромагнитного момента для задач конечно-элементного моделирования асинхронного двигателя/ В.В. Купцов, М.Ю. Петушков, А.С. Сарваров// Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. Выпуск №14 (190),2010, с.57-60

73. Методика расчета электродвигателей и генераторов на базе синхронной реактивной машины независимого возбуждения / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, К.М. Виноградов и др. // Электротехнические системы и комплексы: Межвуз. сб. науч. тр. – Магнитогорск: МГТУ, 2009. Сборник №17. – С.43 – 47.

74. Моделирование электропривода активного прицепа / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, А.Н. Шишков и др. // Вестник Южно-Уральского государственного уни-верситета. Серия “Энергетика”. – 2013. – Том 13. – №2. – С. 106 – 114.

75. Монюшко, Н. Д. Добавочные потери на поверхности массивных полюсных наконечников явнополюсных синхронных машин / Автореф. дис. канд. техн. наук // Ленинград.политех. ин-т им. М. И. Калинина: – 1967. – 17 с.

76. Монюшко, Н.Д. К определению размеров рифления массивных полюсных наконечников / Н. Д. Монюшко // Электротехника. – 1969. – N 4. – С. 21 – 23.

77. Морозов, Д.П. К теории электромеханических процессов станов холодной прокатки. Вестник электропромышленности. 1944. - №3. – С. 16 – 19.

78. Нейман, Л.Р. Теоретические основы электротехники/ Л.Р. Нейман, К.С. Демерчян. – Изд. 2-е, стереотип. – Л.: Энергия, 1975. – Т1. – 522 с.

79. Новые высокомоментные энергосберегающие электроприводы с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, А.Н. Шишков и др. // Известия ТулГУ. Технические науки – 2010. – Вып. 3. – Ч.4. – С.71 – 76.

80. Новые направления развития регулируемых электроприводов / М.Г. Бычков, В.Ф. Козаченко, Л.М. Миронов и др. // Приводная техника. – 1997. – №5. – С. 23 – 25.

81. Онищенко, Г.Б. Асинхронные вентильные каскады и двигатели двойного питания / Г.Б. Онищенко, И.Л. Локтева. – М.: Энергия, 1979. – 133 с.

82. Оптимальная форма линейной нагрузки в синхронном реактивном двигателе независимого возбуждения / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, К.М.

Виноградов, А.С. Герасимов // Вестник ЮУрГУ. Серия “Энергетика”. – 2003. – Вып. 3. – № 11(27) – С. 80 – 83.

83. Оптимизация параметров электромеханической системы в следящем электроприводе с упругими связями / Ю.С. Усынин, Ю.С. Шестаков, В.И. Смирнов и др. // Исследование автоматизированных электроприводов, электрических машин и вентильных преобразователей: Сб. научн. тр. – Челябинск: ЧПИ, 1987. – С. 54 – 58.

84. Опыт разработки тяговых электрических машин для перспективных транспортных силовых установок / М.С. Драгомиров, С.А. Журавлев, А.М. Зайцев, А.С. Кобелев, О.В. Кругликов // Тр. VII Международной (XVIII Всероссийской) науч.-техн. конф. по автоматизированному электроприводе “АЭП–2012”. – Иваново, 2012. – С. 431 – 436

85. Основы теории электропривода с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения / Ю.С. Усынин, С.А. Чупин, М.А. Григорьев и др. // Тр. VII Международной (XVIII Всероссийской) науч.-техн. конф. по автоматизированному электроприводе “АЭП–2012”. – Иваново, 2012. – С. 31 – 34.

86. Особенности расчета электромагнитного момента синхронных реактивных двигателей независимого возбуждения // Ю.С. Усынин, Н.Д. Монишко, Г.В. Караваев, М.А. Григорьев // Электротехнические системы и комплексы: Межвузовский сб. научн. тр. Вып. 6 / под ред. А.С. Сарварова, К.Э. Одинцова. – Магнитогорск: МГТУ, 2001. – С. 16 – 24.

87. Остроухов В.В. Электропривод стана холодной прокатки труб: дис. - канд. техн. наук / В.В. Остроухов. – Челябинск, 2012. – 153 с.

88. Панкратов, В.В. Алгоритмы энергосберегающего управления асинхронными электроприводами / В.В. Панкратов, Е.А. Зима // Электротехника, электромеханика и электротехнологии: материалы третьей науч.-техн. конф. с международным участием. – Новосибирск: НГТУ, 2003. – С. 61 – 65.

89. Панкратов, В.В. Бездатчиковый асинхронизированный синхронный электропривод с векторным управлением / В.В. Панкратов В.В., Д.А. Котин // Электротехника. – 2009. – №12. – С. 13 – 19.

90. Панкратов, В.В. Метод многокритериальной оптимизации алгоритмов векторного управления асинхронными электроприводами / В.В. Панкратов, Е.А. Зима // Изв. вузов. Электромеханика. – 2002. – № 2. – С. 44 – 49.

91. Панкратов, В.В. Многокритериальная оптимизация систем векторного управления асинхронными электроприводами / В.В. Панкратов, Е.А. Зима // Электричество. – 2002. – № 4. – С. 40 – 46.

92. Панкратов, В.В. Новый подход к решению задач экстремального управления в асинхронном электроприводе / В.В. Панкратов, Е.А. Зима // Труды IV Международной (XV Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводе “Автоматизированный электропривод в 21 веке: пути развития” (АЭП 2004, Магнитогорск, 14–17 сентября 2004 г.). Магнитогорск. – 2004. – Ч. 1. – С. 129 – 131.

93. Панкратов, В.В. Оптимальное управление моментом асинхронного двигателя на основе метода непрерывной иерархии каналов регулирования / В.В. Панкратов // Электротехника, электромеханика и электротехнологии ЭЭЭ-2007: материалы третьей науч. -техн. конф. с международным участием. – Новосибирск: НГТУ, 2007. – С. 44 – 50.

94. Параметрическая оптимизация частотнорегулируемых электроприводов/ Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, А.Н. Шишков, А.М. Журавлев, С.П. Лохов // Вестник ЮУрГУ. Серия “Энергетика”. – 2012. – Вып. 18. – №37(296). – С. 30 – 33.

95. Пат. 2240640 Российская Федерация, МПК Н 02 G 1/02. Синхронный реактивный генератор автономной энергетической установки и способ управления им / Ю.С. Усынин, С.М. Бутаков, М.А. Григорьев, К.М. Виноградов. – № 2003118611/09; заявл. 20.06.03; опубл. 20.11.04, Бюл. №32.

96. Пат. 2346376 Российская Федерация, МПК Н 02 К 19/24. Синхронная реактивная машина / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, К.М. Виноградов, А.Н. Горожанкин, С.А. Чупин – № 2007126685 заявл. 12.07.2007; опубл. 10.02.2009, Бюл. №4.

97. Пат. 2408967 Российская Федерация, МПК Н 02 К 19/10, Н 02 К 19/24, Н 02 К 29/03. Синхронная реактивная машина/ Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, К.М. Виноградов, А.Н. Горожанкин, Шишков А.Н., Бычков А.Е., Валов А.В. – №2009146993/07(066964) заявл. 17.12.2009.; опубл. 10.01.2011, Бюл. № 1.

98. Пат. 2408972 Российская Федерация, МПК Н 02 Р 27/04, Н 02 Р 25/08, Н 02 Р 19/10. Электропривод с синхронной реактивной машиной и способ управления им / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, К.М. Виноградов, А.Н. Горожанкин, Шишков А.Н., Бычков А.Е., Валов А.В. – №2009148381/07(071468) заявл. 24.12.2009.; опубл. 10.01.2011, Бюл. №1.

99. Пат. 2408973 Российская Федерация, МПК Н 02Р 27/05. Асинхронный электропривод с фазным ротором/ Ю.С. Усынин, А.В. Валов, Т.А. Козина, М.А. Григорьев, К.М. Виноградов, А.Н. Горожанкин, Шишков А.Н., Бычков А.Е. – №2009148035/07(070970) заявл. 23.12.2009.; опубл. 10.01.2011, Бюл. № 1.

100. Пат. 2422972 Российская Федерация, МПК Н 02 К 19/10, Н 02 К 19/24, Н 02 К 29/03. Синхронная реактивная машина/ Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, К.М. Виноградов, А.Н. Горожанкин, Шишков А.Н., Бычков А.Е., Валов А.В. – №2009146987/07(066958) заявл. 17.12.2009.; опубл. 27.06.2011, Бюл. №18.

101. Пат. 2510877 Российская федерация. МПК Н 02Р 27/04 Электропривод с синхронной реактивной машиной/ Ю.С. Усынин, А.Н. Горожанкин, А.Е. Бычков, Е.В. Белоусов, А.М. Журавлев – 2510877 заявл. 11.10.2012.; опубл.

102. Перельмутер В.М. Прямое управление моментом и током двигателей переменного тока/ Перельмутер В.М.– Х.: Основа, 2004-210с.

103. Петров Ю.П. Оптимальное управление электрическим приводом с учетом ограничений по нагреву/ Ю.П. Петров-"Энергия", 1971г.

104. Петров, Ю.П. Оптимальное управление электроприводом. – М.: Госэнергоиздат, 1961. – 187 с.

105. Поляк, Б.Т. Введение в оптимизацию. – М.: Наука, 1983. – 384 с.

106. Попов, В.И. Современные асинхронные электрические машины: Новая Российская серия РА / В.И. Попов, Т.А. Ахунов, Л.Н. Макаров. – М.: Изд-во «Знак», 1999. – 256 с.

107. Потери в регулируемых электроприводах при разных законах управления / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, А.Н. Шишков и др. // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия “Энергетика”. – 2010. – Вып. 13. – № 14(190). – С. 47 – 51.

108. Проект создания на базе ФГУП УКВЗ (г. Усть-Катав) Инновационного центра развития инфраструктуры городского транспорта и пригородного общественного транспорта // Презентация. – Усть-Катав, 2010. – 232 с.

109. Проектирование электрических машин: учебн. для вузов. / И.П. Копылов, Б.К. Клоков, В.П. Морозкин, Б.Ф. Токарев. Под ред. И.П. Копылова. – 4-е изд., перераб. и доп. – Изд. Юрайт, 2011. – 767 с.

110. Путов В.В. Адаптивное и модальное управление механическими объектами с упругими деформациями/ В.В. Путов. – Издательство СПбГЭТУ “ЛЭТИ”, Санкт-Петербург, 2002. – 120с.

111. Развитие частотных методов синтеза электроприводов с синхронными электрическими машинами / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, А.Н. Шишков, А.Е. Бычков, Е.В. Белоусов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия “Энергетика”. – 2011. – Вып. 16. – №34(251). – С. 21 – 27.

112. Разработка и освоение асинхронных электродвигателей энергоэффективной серии 7AVE: некоторые итоги и дальнейшие задачи / В.Я. Беспалов, А.С. Кобелев, О.В. Кругликов, Л.Н. Макаров // тр. VIII Международной (XVIII Всероссийской) конф. по автоматизированному электроприводу (АЭП–2012). – Иваново, 2012. – С. 13 – 16.

113. Разработка основ теории энергосберегающего вентильного электропривода на базе синхронного реактивного двигателя независимого возбуждения: отчет о НИР: гк № 02.442.11.7281 от 28.02.2006 / рук. М.А. Григорьев; исполн. М.А. Григорьев. – Челябинск, ЮУрГУ, 2006. Т1, Т2.

114. Розанов, Ю.К. Силовая электроника: учебник для вузов / Ю.К. Розанов, М.В. Рябчицкий, А.А. Кваснюк. – М.: Издательский дом МЭИ, 2007. – 632 с.
115. Розанов, Ю.К., Флоренцев С.Н. Силовая электроника в электроприводе // Приводная техника. – 1997. – №5. – С. 9 – 13.
116. Рудаков, В.В. Системы управления электроприводов (Прямое управление моментом): Учебное пособие / В.В. Рудаков, А.Е. Казярук. – СПб, 2007. – 75 с.
117. Рымша, В.В. Технология расчета трехмерного стационарного магнитного поля в вентильно-реактивных электродвигателях на платформе ANSYS Workbench [Текст] / Рымша В.В., Радимов И.Н., Баранцев М.В. // Научные журналы НТУ "ХПИ" : Электротехника и электромеханика №6 - НТУ "ХПИ", 2006.
118. Садовский, Л.А. Электродвигатели с переменным магнитным сопротивлением для современного регулируемого электропривода / Л.А. Садовский, В.Л. Виноградов // Электротехника. – 2000. – № 2. – С. 54 – 59.
119. Самосейко, В.Ф. Оптимальное управление асинхронным двигателем с фазным ротором / В.Ф. Самосейко, Ф.А. Гельвер // Сборник материалов V Международной (16 Всесоюзной) конференции по автоматизированному электроприводу: 18-21 сентября 2007 г. – Спб., 2007. – С. 119 – 122.
120. Сарапулов, Ф.Н. Развитие математических моделей тепловых процессов в линейных асинхронных двигателях / Ф.Н. Сарапулов, В.В. Гоман // Электротехника. – 2009. – № 8. – С. 11 – 17.
121. Сарапулов, Ф.Н. Особенности моделирования линейных асинхронных двигателей с различными обмотками индуктора на основе детализированных схем замещения / Ф.Н. Сарапулов, С.В. Иваницкий, В.В. Гоман // Изв. вузов “Электромеханика”. – 2009. – № 5. – С. 18 – 24.
122. Сарваров, А.С. Асинхронный электропривод на базе НПЧ с программным формированием напряжения / А.С. Сарваров. – Магнитогорск: МГТУ, 2002. – 236 с.

123. Свид. № 2011612473 о государственной регистрации программы для ЭВМ. Расчет частотных характеристик звеньев и систем с амплитудной модуляцией/ Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, А.Н. Шишков, А.Е. Бычков, Т.Т. Москов – №2011610566 заявл. 01.02.2011.; зарегистр 24.03.2011.

124. Свид. № 2011617186 о государственной регистрации программы для ЭВМ. Программа расчета переходных процессов быстродействующих систем электроприводов/ Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, А.Н. Шишков, А.Е. Бычков, А.Н. Горожанкин, Е.В. Белоусов – №2011615635 заявл. 26.07.2011.; зарегистр 15.09.2011.

125. Свид. № 2011617294 о государственной регистрации программы для ЭВМ. Программа расчета параметров новых типов электрических машин/ Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, А.Н. Шишков, А.Е. Бычков, Е.В. Белоусов – №2011615448 заявл. 21.07.2011.; зарегистр 19 сентября 2011.

126. Свид. № 2012611914 о государственной регистрации программы для ЭВМ. Программа расчета электрических потерь в вентильном преобразователе/ Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, А.Н. Шишков, А.Е. Бычков, А.Н. Горожанкин Е.В. Белоусов – №2011619898 заявл. 21.12.2012.; зарегистр 20.02.2012.

127. Свид. № 2013619009 о государственной регистрации программы для ЭВМ. Программа расчета угловых характеристик синхронных электроприводов с распараллеливанием на 12 каналов/ М.А. Григорьев, А.Н. Шишков, А.М. Журавлев, и др. - № 20133616616; заявл.26.07.2013; зарегист. 25.09.2013.

128. Свид. № 2013619011 о государственной регистрации программы для ЭВМ. Программа расчета частотных характеристик синхронных электроприводов с распараллеливанием на 12 каналов/ М.А. Григорьев, А.Н. Шишков, А.М. Журавлев, и др. - № 2013616617; заявл.26.07.2013; зарегист. 24.09.2013.

129. Свид. №2013619100 о государственной регистрации программы для ЭВМ. Программа расчета среднего значения индукции в электрических машинах переменного тока/ М.А. Григорьев, А.Н. Шишков, А.М. Журавлев, и др. – № 2013616608; заявл.26.07.2013; зарегист. 25.09.2013

130. Сидоров, О.Ю. Методы конечных элементов и конечных разностей в электромеханике и электротехнологии / О.Ю. Сидоров, Ф.Н. Сарапулов, С.Ф. Сарапулов. - М.: Энергоатомиздат, 2010 – 331 с.

131. Синтез системы управления электроприводом с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, А.Н. Шишков, С.П. Гладышев, А.Н. Горожанкин // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия “Энергетика”. – 2012. – Вып. 18. – №37(296). – С. 38-41.

132. Соколинский, Л.Б. Параллельные вычислительные системы / Л.Б. Соколинский, М.Л. Цымблер, Т.Ю. Лымарь // Презентация. - Челябинск, 2009.

133. Соколовский, Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием: учебник для студ. высш. учеб. заведений / Г.Г. Соколовский. – М.: Издательский центр “Академия”, 2006. – 272 с.

134. Справочник по электрическим машинам: в 2 т. / под ред. И.П. Копылова, Б.К. Клокова. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 492 с.

135. Терехов, В.М. Исследование и разработка высокоточных многодвигательных следящих электроприводов для широкого класса наземных антенных установок: Дисс. - докт. техн. наук: 05.09.03. – М., 1981. – 292 с.

136. Терехов, В.М. Системы управления электроприводов: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / В.М. Терехов, О.И. Осипов; под ред. В.М. Терехов. – М.: Издательский центр “Академия”, 2005. – 305 с.

137. Терзян, А.А. Об углах треугольной сетки для расчета магнитных полей методом конечных элементов / А.А. Терзян, Г.С. Сукиасян, А.Е. Пароникян // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. 2007. - Т. LX. - № 3. - С.523-532.

138. Тиммер, Р. Эффективность электрического двигателя / Р. Тиммер, М. Хелинко, Р. Эскола // Энергоэффективность. – АББ Ревю, 2/2007. – С. 81 – 84.

139. Тищенко, Н.А. Об оптимальном передаточном числе редуктора в электроприводе летучих ножниц / “Вестник электропромышленности”. – №8. – 1934.

140. Тяговый электропривод активного прицепа трубовоза / Ю.С. Усынин, А.Н. Шишков, А.Н. Горожанкин, А.Е. Бычков, Е.В. Белоусов и др. // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия “Энергетика”. – 2013. – Т.13. – № 1. – С. 137 – 144.

141. Тяговый электропривод КТ-1 трамвайного вагона с двигателем независимого возбуждения и электронным контроллером / А.В. Горбатов, Н.Л. Дружкова, А.Н. Крайзман, А.М. Рафиков // Вестник ГЭТ России – 2001. – №1(40) – С. 13 – 18.

142. Уайт, Д. Электромеханическое преобразование энергии / Д. Уайт, Г. Вудсон. – М.–Л.: Энергия, 1964. – 528 с.

143. Удельные показатели электропривода с синхронным реактивным двигателем независимого возбуждения / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, К.М. Виноградов, А.Н. Горожанкин // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия “Энергетика”. – 2008. – Вып. 9. – № 11(111). – С. 52 – 53.

144. Усовершенствованный энергосберегающий способ управления насосом в системе водоснабжения зданий / Е.В. Бычков, Н.Ф. Ильинский, А.В. Сорокин, Ю.А. Крылов // Сборник материалов V Международной (16 Всесоюзной) конференции по автоматизированному электроприводу: 18–21 сентября 2007 г. – Спб, 2007. – С. 511–513.

145. Усынин Ю.С. Следящие дифференциальные электроприводы автономных объектов: дисс. - д-ра техн. наук / Ю.С. Усынин. – Челябинск, 1994. – 241с.

146. Усынин, Ю.С. Расчет экономии электроэнергии на насосной станции городского водозабора / Ю.С. Усынин, С.М. Бутаков, М.А. Дзюба // Электрические системы и комплексы: межвуз. сб. науч. тр. Вып. 6 / под ред. А.С. Сарварова, К.Э. Одинцова. – Магнитогорск: МГТУ, 2001. – С. 137 – 140.

147. Усынин, Ю.С. Силовые цепи вентильных электроприводов с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения / Ю.С. Усынин,

М.А. Григорьев, К.М. Виноградов. Электротехнические системы и комплексы: Межвуз. сб. науч. тр. – Магнитогорск: МГТУ, 2004. – вып. 8. С. 13 – 17.

148. Усынин, Ю.С. Системы управления электроприводов: учеб. пособие для вузов / Ю.С. Усынин. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2004. – 328 с.

149. Усынин, Ю.С. Теория автоматического управления: учебн. пособие / Ю.С. Усынин. - Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2010. – 174 с.

150. Усынин, Ю.С. Частотные характеристики канала регулирования момента в синхронных электроприводах / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, А.Н. Шишков // Электричество. – 2012. – № 4. – С. 54 – 59.

151. Усынин, Ю.С. Электроприводы и генераторы с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, К.М. Виноградов // Электричество. – 2007. – №3. – С.21 – 26.

152. Флоренцев, С.Н. Результаты и планы создания комплектного тягового электрооборудования электромеханических трансмиссий транспортных средств / С.Н. Флоренцев, Д.Б. Изосимов // Тр. VII Международной (XVIII Всероссийской) науч.-техн. конф. по автоматизированному электроприводу “АЭП–2012”. – Иваново, 2012. – С. 438 – 445.

153. Хватов, О.С. Электромеханические процессы в судовой валогенераторной установке на основе машины двойного питания: Учеб. пособие для студентов оч. и заоч. обучения специальностей 18.04 и 18.09 / О.С. Хватов. – Н. Новгород: Волж. гос. акад. вод. трансп., каф. электротехники и электрооборудования, 2000. – 60 с.

154. Холодная прокатка труб / З.А. Кофф, П.М. Соловейчик, В.А. Алешин, М.А. Гриншпун. – Свердловск, 1962. – 432 с.

155. Цытович, Л.И. Адаптивная интервало-кодовая двоично-десятичная интегрирующая синхронизация систем управления силовыми вентильными преобразователями / Л.И. Цытович, О.Г. Брылина, М.М. Дудкин, Р.М. Рахматулин // Электротехника. – 2013. – № 3. – С. 8 – 15.

156. Цытович, Л.И. Развертывающие преобразователи для систем управления вентиляционными электроприводами и технологической автоматикой: дисс.- докт. техн. наук. / Л.И. Цытович. - Челябинск: ЧГТУ, 1996. – 464 с.

157. Цытович, Л.И. Реверсивный тиристорный преобразователь для систем управления с питанием от сети с нестационарными параметрами / Л.И. Цытович, Р.М. Рахматулин, М.М. Дудкин, А.В. Качалов // Практическая силовая электроника. – 2009. – № 2 (34). – С. 35 – 41.

158. Цытович, Л.И. Элементы и устройства систем управления тиристорными преобразователями: Учебник для ВУЗов // Л.И. Цытович, В.Г. Маурер – Челябинск: ЮУрГУ, 1998. – 274 с.

159. Черных, И.В. Моделирование многодвигательного линейного асинхронного электропривода конвейерного поезда / И.В. Черных, Ф.Н. Сарapultов, С.В. Карась, П.И. Захарченко // Электротехника. – 2000. – №8. – С. 40 – 42.

160. Чернышев, А.Ю. Электропривод переменного тока: учебн. пособие / А.Ю. Чернышев, Ю.Н. Дементьев, И.А. Чернышев. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 213 с.

161. Шапиро, Л.Я. Машины двойного питания: учеб. пособие / Л.Я. Шапиро. – М.: МЭИ, 1983. – 60 с.

162. Шевченко, С.Б. Способы снижения потерь в асинхронном двигателе при векторном управлении / С.Б. Шевченко // Электроприводы переменного тока: тр. Международной четырнадцатой науч.-техн. конф. – Екатеринбург: ГОУ ВТО УГТУ-УПИ, 2007. – С. 153 – 156.

163. Шенфельд, Р. Автоматизированные электроприводы: пер. с нем. / Р. Шенфельд, Э. Хабигер; под ред. Ю.А. Борцова. – Л.: Энергоатомиздат, 1985. – 464 с.

164. Шмитц, Н. Введение в электромеханику / Н. Шмитц, Д. Новотный/ Пер. с англ. – М.: Энергия, 1969. – 366 с.

165. Шпаковский, Г.И. Алгоритм параллельного решения СЛАУ методом Гаусса – Зейделя / Г.И. Шпаковский, А.Е. Верхотуров // Вестник БГУ. Сер. 1. – 2007. – №1. – С. 44 – 48.

166. Шрейнер, Р.Т. Адаптивная система векторного управления асинхронным электроприводом с ориентацией поля ротора / Р.Т. Шрейнер, В.Н. Поляков // Электротехника. – 1998. – № 2. – С. 23 – 29.

167. Экланд, И. Выпуклый анализ и вариационные проблемы/ И. Экланд, Р. Темам / Пер. с англ. В.М. Тихомирова. – М.: Мир, 1979. – 400 с.

168. Экспериментальные частотные характеристики электроприводов переменного тока с вентильными преобразователями частоты / Ю.С. Усынин, С.М. Бутаков, М.А. Григорьев, и др. // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия “Энергетика”. – 2002. – Вып. 2. – № 7(16) – С. 67 – 69.

169. Электропривод с синхронным реактивным двигателем независимого возбуждения / Ю.С. Усынин, Н.Д. Монюшко, Г.В. Караваев, М.А. Григорьев // Труды III Международной (XIV Всероссийской) научно-технической конференции по автоматизированному электроприводу “АЭП–2001” (Н. Новгород 12–14 сентября 2001 г.) / под ред. С.В. Хватова. – Н. Новгород. “Вектор–ТиС”, 2001. – С. 106 – 107.

170. Электропривод с синхронным реактивным двигателем независимого возбуждения / Ю.С. Усынин, Н.Д. Монюшко, М.А. Григорьев, Г.В. Караваев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2001. – Вып. 1. – № 4(04). – С. 70 – 76.

171. Электроприводы с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения для станков холодной прокатки труб / Ю.С. Усынин, С.П. Лохов, М.А. Григорьев, А.Н. Шишков, Е.В. Белоусов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия “Энергетика”. – 2012. – Вып. 17. – №16(275). – С. 107 – 110.

172. Энергосберегающая модификация векторного управления асинхронного двигателя / А.Г. Гарганеев, А.Т. Яровой, Л.Ю. Бабушкина и др. // Известия Томского политехнического университета. – 2005. №7. – С. 130 – 134.

173. Энергосберегающие электроприводы на основе новых типов электрических машин и вентильных преобразователей: отчет о НИР: гк № П1442 от 03.09.2009/ рук. М.А. Григорьев; исполн. М.А. Григорьев. – Челябинск, ЮУрГУ, 2009. Т1, Т2, Т3.

174. Энергосбережение в электроприводах тягодутьевых механизмов многосвязных объектов / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, А.Н. Шишков, А.Е. Бычков, Д.И. Кашаев, Т.Т. Москов // Вестник ЮУрГУ. Серия “Энергетика”. – 2011. – Вып. 15. – №15(232). – С. 40 – 45.

175. Энергосбережение в электроприводе: монография / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, А.Н. Шишков, С.М. Бутаков. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2011. – 104 с.

176. Энергоэффективные электроприводы нового поколения для объектов с тяжелыми условиями эксплуатации: гк № 14.740.11.1100 от 24.05.2011/ рук. М.М. Дудкин; исполн. М.А. Григорьев. – Челябинск, ЮУрГУ, 2012. Т1, Т2, Т3, Т4, Т5, Т6.

177. ABB Review. – 2011. № 1 – 8 p.

178. ACS880-01 hardware manual. 3AUA0000078093. – 2013. – 223 p.

179. Bin Wu. High-Power Converters and AC Drives/ Bin Wu// IEEE Press – 2006. – 317 p.

180. Electric Drive of an Industrial Tractor / U.S. Usinin, M.A. Grigoryev, A. Shishkov, A. Bychkov, E.Belousov // SAE Commercial vehicle engineering congress 2013 13CV-0101/2013-01-2469.

181. Generator for Vehicle Applications, Based on the Field Regulated Reluctance Machine / Yu. S. Usinin, M.A. Grigorjev, K.M. Vinogradov, S.P. Gladyshev// World Congress Exhibition, Detroit, MI, USA, 2008 World Congress; Detroit, MI; United States; 14 April 2008 through 17 April 2008; Code 85694.

182. Grigorev, M. System of the Electric Drive with Field Regulated Reluctance Machine/ M. Grigorev // Russian Electrical Engineering. – 2013. – Volume 84. Issue 10. P. 560 – 565.
183. Grigorev, M.A. The electric Drive with Field Regulated Reluctance Machine / M. Grigorev // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия “Энергетика”. – 2013. – Том 13. – №1. – С. 118 – 123.
184. High output synchronous reluctance motor and drive package. / ABB // REV. – 2012 – 8 p.
185. <http://epa.susu.ac.ru/726.html>
186. http://supercomputer.susu.ac.ru/computers/skif_avrora/
187. <http://www.teslamotors.com/models/features#/performance>
188. <http://www.top500.org/>
189. Law, D. Design and Performance of Field Regulated Reluctance Machine /D Law, A. Chertok, T. Lipo // IEEE Transactions on Industry Applications.– 1998. – Vol. 30. – № 5.– P. 1185 – 1192.
190. Law, J. Magnetic Circuit Modeling of the Field Regulated Reluctance Machine, Part I: Model Development / J. Law, T. Busch, T. Lipo // IEEE Transaction on Energy Conversion.– 2000. – №1. – Vol. 11. – P. 49 – 56.
191. Law, J. Magnetic Circuit Modeling of the Field Regulated Reluctance Machine, Part II: Saturation Modeling and Results / J. Law, T. Busch, T. Lipo // IEEE Transaction on Energy Conversion.– 2000. – №1. – Vol. 11. – P. 56 – 62.
192. Lipo, T. Advanced Motor Technologies: Converter Fed Machines / T. Lipo // Transactions on energy conversion – 1998. – P. 204 – 222.
193. Moghaddam, R.R. Synchronous Reluctance Machine Design / R.R. Moghaddam – Stockholm, 2007. – 90 p.
194. New Brushless Synchronous Machine For Vehicle Application / Yu. S. Usinin, M.A. Grigorjev, K.M. Vinogradov, S.P. Gladyshev // World Congress Exhibition, Detroit, MI, USA, 2007 World Congress; Detroit, MI; United States 16 April 2007 through 19 April 2007; Code 90239.

195. Pulse Vector Control of Wound Rotor Induction Motor / Yu.S. Usinin, M.A. Grigorjev, K.M. Vinogradov and // SAE Paper 2010-01-0703, SAE 2010 World Congress and Exhibition; Detroit, MI; United States; 13 April 2010 through 13 April 2010; Code 87929.

196. Ruppert J. A Delaunay Refinement Algorithm for Quality 2-Dimensional Mesh Generation, NASA Ames Research Center, Submission to Journal of Algorithms, 1994.

197. Sinamics S120 6SL3 097-2AP00-0BP6 – Siemens – 1816 p.

198. Switching Losses in the Rotor of the Field Regulated Reluctance Machine / Yu.S. Usinin, M.A. Grigorjev, K.M. Vinogradov// SAE Paper 2010-01-0485, SAE 2010 World Congress and Exhibition; Detroit, MI; United States; 13 April 2010 through 13 April 2010; Code 87929.

199. Synchronous motor AMZ0900LT06 LSB - Mechel HSM. ABB, 2011 – 499 p.

200. The Electric Drive of a Tram with a Average Floor / Yu. S. Usinin, M.A. Grigorjev, K.M. Vinogradov// SAE International 2008, Powertrains, Fuels and Lubricants Congress, Shanghai, CHINA, 2008-01-1828, 2008 SAE International Powertrains, Fuels and Lubricants Congress; Shanghai; China; 23 June 2008 through 25 June 2008; Code 90787.

201. The Losses in Control Electric Drives of Transport Mechanisms at Different Controlled Laws / Yu. S. Usinin, M.A. Grigorjev, A.N. Shishkov, A. Bychkov, S.P. Gladyshev // SAE Paper 2011-01-0039, SAE 2011 World Congress and Exhibition; Detroit, MI; United States; 12 April 2011 through 14 April 2011; Code 91197.

202. Toliat H. Sensorless Operation of Permanent Magnet AC (PMAC) motors with Modified Stator Windings/ Toliat H., Rahman K., Shet D. // IEEE Transaction on Energy Conversion.– Dec. 1999. – Vol. 14. – P.1004 – 1010.

203. Toliat, H. Sensorless Operation of Permanent Magnet AC (PMAC) motors with Modified Stator Windings / H. Toliat, K. Rahman, D. Shet // IEEE Transaction on Energy Conversion.– Dec. 1999. – Vol. 14. – P. 1004 – 1010.

204. Toliyat H. A Five-Phase Reluctance Motor with High Specific Torque / Toliyat H., Xu L., Lipo T.A. // IEEE Transactions on Industry Applications. – 1992. – Vol. 28. – №3. – P. 559 – 667.
205. Toliyat H. Analysis and Simulation of Five-Phase Variable-Speed Induction Motor Drives Under Asymmetrical Connections // IEEE Transactions on Power Electronics. – 1998. – Vol. 13. – №4. – P. 748 – 756.
206. Toliyat, H. A DSP-Based Vector Control of Five-Phase Synchronous Reluctance Motor/ H.Toliyat, R. Shi, H. Xu // 0-7803-6404-X/00/\$10.00 (C) 2000. P. 1- 7.
207. Toliyat, H. Analysis and Simulation of Five-Phase Synchronous Reluctance Machines Including Third Harmonic of Airgap MMF / H. Toliyat // IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, VOL. 34, NO. 2, MARCH/APRIL 1998. P. 332-339.
208. Toliyat, H. Simulation and Detection of Dynamic Air-Gap Eccentricity in Salient-Pole Synchronous Machines / H. Toliyat, N. Al-Nuaim // IEEE Transactions on Industry Applications. – 1999. – Vol. 35. – №1. – P. 86 – 93.
209. Unidrive SP User Guide. Issue Number: 12. Part Number: 0471-0000-12 – Emerson – 304 p.
210. Usinin, Yu.S. Electric drive with a field-regulated reluctance machine / Yu. S. Usinin, M. Grigorev, A. Shishkov // Russian Electrical Engineering. – 2013. – Volume 84. Issue 3. P. 149 – 154.
211. Vagati A., Franceschini G., Marongiu I., Troglia G.P. Design Criteria of Performance Synchronous Reluctance Motors.// IEEE-IAS Annual Meeting Houston (USA), October 1992.
212. Vagati, A. Advanced Motor Technologies: Synchronous Motors and Drives / A. Vagati // IEEE Transactions on Energy Conversion – 1998. – P. 223 – 227.
213. Weh, H. On the Development of Inverter Fed Reluctance Machines for High Power Densities and High Output / H. Weh // ETZ Archiv, Bd. 6, 1984. – P. 135 – 144.

214. Weight and Dimensional Parameters of a Power Drive for Electrical Vehicle / U.S. Usinin, M.A. Grigoriev, K.M. Vinogradov// Powertrains, Fuels and Lubricants Meeting, Florence, ITALY. 09SFL-0251, Powertrains, Fuels and Lubricants Meeting, SFL 2009; Florence; Italy; 15 June 2009 through 15 June 2009; Code 90682.