

На правах рукописи



ФИЛЮШОВ ЮРИЙ ПЕТРОВИЧ

**ВОПРОСЫ ТЕОРИИ И ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ
ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИМ
ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА**

Специальность 05.09.03 - Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Кемерово – 2018

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном
учреждении высшего образования
"Сибирский государственный университет водного транспорта"

Научный консультант: доктор технических наук, профессор
Симаков Геннадий Михайлович

Официальные оппоненты:

Сарваров Анвар Сабулханович доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», кафедра автоматизированного электропривода и мехатроники, профессор

Григорьев Максим Анатольевич доктор технических наук, доцент, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», кафедра автоматизированный электропривод, профессор

Глазырин Александр Савельевич доктор технических наук, доцент, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», отделение электроэнергетики и электротехники, доцент

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Нижегородский государственный технический университет имени Р.Е. Алексеева», г. Нижний Новгород

Защита состоится 06 декабря 2018 г. в 12:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.102.01 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева» по адресу: 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28, факс: (384-2) 68-23-23, e-mail: sjyu.eav@kuzstu.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева» и на сайте: <http://science.kuzstu.ru/wp-content/docs/OAD/Soresearchers/2018/fil/Dissertation.pdf>

Автореферат разослан «___» сентября 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 212.102.01



Семькина Ирина Юрьевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Современная промышленность основывается на широком применении электрического привода (ЭП) в технологических процессах. Электропривод является не только средством управления технологическими процессами, но и энергосиловой установкой, позволяющей обеспечить производственные механизмы необходимой энергией. Потребляя более 60% всей вырабатываемой в мире электроэнергии, электропривод активно используется при автоматизации производства. Электрическая машина электропривода конструктивно выполняется таким образом, чтобы в номинальных режимах работы потери в двигателе были минимальны, а оценка эффективности использования мощности $\cos(\varphi)$, подводимой к обмоткам двигателя, имела наилучшее значение. При среднем коэффициенте полезного действия (КПД) 87% асинхронной машины мощностью до 10 кВт общепромышленного применения и номинальной нагрузке, стоимость потерь энергии за год составляет 80% стоимости самого двигателя. Снижение нагрузки на 50 % от номинальной величины вызывает снижение КПД до 40 – 60%. Общепромышленные и уникальные промышленные установки оборудуются регулируемыми приводами переменного тока, мощность которых составляет от единиц до сотен и тысяч киловатт. Массовое внедрение регулируемого электропривода в технологических процессах связано, прежде всего, с развитием силовой элементной базы и микропроцессорной техники. В создание и развитие теории электропривода внесли значительный вклад выдающиеся российские и зарубежные ученые – А. А. Булгаков, А. Б. Башарин, И. Я. Браславский, В. Я. Беспалов, В. Н. Бродовский, А. Б. Виноградов, В. И. Ключев, Г. Б. Онищенко, О. И. Осипов, А. Д. Поздеев, В. В. Рудаков, А. С. Сандлер, Р. С. Сарбатов, О. В. Слежановский, Г. Г. Соколовский, Ю. С. Усынин, М. Г. Чиликин, В. А. Шубенко, Р. Т. Шрейнер, И. И. Эпштейн, G. M. Asher, F. Blaschke, M. Depenbrock, W. Floter, S. Fukuda, J. Holtz, W. Leonard, D.W. Novotny и многие другие. Их работы содержат фундаментальные основы теории управления машинами переменного тока. В процессе исторического развития быстродействующий электропривод достиг высокого уровня совершенства, обеспечивая высокие динамические свойства, удовлетворяющие самым разнообразным технологическим задачам. Вместе с тем, являясь энергосиловой установкой, электропривод должен наилучшим образом отвечать не только динамическим, но и энергетическим требованиям, учитывая существующие ограничения.

Предъявляемые к электроприводу требования обусловлены желанием повысить производительность технологических процессов и максимально снизить потери энергии. В связи с возрастающими ценами на энергоносители и ограничением возможности увеличения мощности генерирующих электроэнергию установок, снижение энергопотребления технологических процессов приобретает особую актуальность. Для решения задачи эффективного управления необходимо сопоставить основные свойства электропривода, учитывая величину реактивной мощности, потери в стали, потери в меди, насыщение магнитной системы, мощность мгновенного изменения энергии магнитного поля при формировании электромаг-

нитного момента, эффективность использования напряжения и мощности, подводимой к обмоткам двигателя. Эти свойства имеют противоречивый характер, что усложняет организацию структуры регуляторов эффективного управления, обеспечивающего наиболее полное использование электрической машины и источника питания для достижения поставленной цели. Такое управление зависит от нескольких показателей качества, что обуславливает многокритериальный подход к синтезу управления электроприводом. Эффективное управление должно обеспечить наилучшее сочетание динамических и энергетических свойств электропривода. Выбор тех или иных свойств определен технологическими требованиями. Сложность заключается в том, что не разработано правило (принцип оптимальности), которое позволило бы ответить на вопрос, какое решение лучше для реализации предъявляемых требований. Необходимо выделить аргументы, определяющие закон управления, и установить перечень показателей качества, характеризующих динамические и энергетические свойства электропривода в зависимости от принятых аргументов. Задавая один критерий качества, ограничивая область допустимых управлений, следует определить другие локальные критерии, показатели которых в этих условиях имеют наилучшие значения. Поэтому решение задачи комплексного (многокритериального) подхода к синтезу управления электроприводом, обеспечивающему наилучшее сочетание динамических и энергетических свойств электропривода, в рамках установленных ограничений, требует своего решения.

Степень разработанности.

Начиная с основополагающей работы М. П. Костенко, вопросам эффективно-го управления электроприводом переменного тока посвящены многочисленные исследования (А. М. Вейнгер, Л. Х. Дацковский, Г. С. Зиновьев, Н. Ф. Ильинский, Д. Б. Изосимов, В. А. Мищенко, А. С. Сарваров, И. М. Столяров, Д. С. Уйт, Г. Х. Вудсон, Т. А. Lipo, Н. Frank, J. Moreno), результаты которых являются основой для дальнейшего обобщения и выбора методов исследований электромеханических систем, как объектов управления.

Требования к динамическим и энергетическим свойствам электропривода определяют два различных направления развития электропривода переменного тока. Одно определяет энергоэффективное управление, обеспечивающее формирование электромагнитного момента при минимуме тока статора или минимуме суммарных потерь. Несмотря на несомненное достоинство, такие электроприводы не отличаются высоким быстродействием. Рост реактивной мощности снижает эффективность управления, не позволяя быстро парировать возмущение в условиях ограничения напряжения источника питания, снижая качество и производительность технологических процессов. Использование скалярных методов вносит погрешность регулирования, не позволяя контролировать динамику процессов формирования электромагнитного момента, требуя индивидуального подхода к каждой электрической машине. Нелинейность характеристики намагничивания в совокупности с нелинейной связью регулируемых переменных и электромагнитного момента, значительно усложняют задачу экстремального управления электроприводом. Решения задач оптимизации электропривода переменного тока по

энергетическим критериям качества рассматривали многие исследователи: В. А. Даргау, Ю. Г. Шакарян, Ghozzi S., Frank H. и др. Следует отметить работы В. Г. Макарова, В. Н. Полякова, Р. Т. Шрейнера, где, учитывая насыщение магнитной системы двигателя, анализируются связи энергетических характеристик для реализации экстремального управления электроприводом. Формирование экстремального управления по одному критерию качества не дает возможность оценить другие локальные критерии, показатели которых могут быть такими, что сформированное управление не может быть целесообразным.

Для высокодинамичных систем воспроизведения движения, по аналогии с машинами постоянного тока, управление формируют при стабилизации энергии магнитного поля, частным случаем которого является формирование электромагнитного момента при стабилизации потокосцепления статора, ротора или потокосцепления в воздушном зазоре. Обладая некоторой избыточностью, часть ресурсов управления направляются на стабилизацию потокосцепления, обеспечивая линеаризацию системы, приведя структуру управления к одноканальному виду. Изменение электромагнитного момента в этих условиях не отличается экономичностью, поскольку поддерживать потокосцепление на уровне номинальной величины при различной нагрузке двигателя энергетически неэкономично.

Быстродействие одноканальной системы связано с возможностью источника питания и ограничено полосой пропускания контуров регулируемых переменных. Используя все ресурсы управления, здесь нет возможности увеличивать энергию или мощность, затрачиваемую на регулирование.

Решения для систем векторного управления рассмотрены в работах А. М. Вейнгера, В. М. Завьялова, Д. П. Ким, И. Ю. Семькиной, В. В. Панкратова, М. Rahman, Smith Otto. Известны системы прямого управления электромагнитным моментом (direct torque control). Такие системы, ограниченные по быстродействию напряжением источника питания, характеризуются существенными пульсациями электромагнитного момента, снижающими точность регулирования на малой скорости. Метод градиентного управления позволяет отыскивать аналитическое выражение регулятора, обеспечивающего движение к цели управления с максимальной интенсивностью, исходя из текущего состояния объекта управления. Сложность формализации, выбор целевой функции и весовых коэффициентов значительно усложняют решение задачи эффективного управления. Высокие требования к вычислительным ресурсам системы и ограничение напряжения питания вносят существенные погрешности регулирования, не позволяя использовать все возможности электрической машины.

Реализация эффективного управления электроприводом требует многокритериального подхода к синтезу управления. В настоящее время процесс формализации многокритериальных задач неизбежно связан с экспертными оценками, как самих критериев качества, так и связей между ними. Известен ряд решений задач многокритериальной оптимизации методом анализа иерархий. Обычно, из физического смысла задачи следует, что локальные критерии имеют различную важность при решении задачи, т.е. один локальный критерий имеет какой-то приоритет над другим критерием. Это следует учитывать при выборе принципа опти-

мальности и определения области возможных решений, отдавая предпочтение более важным критериям. Основанный на суждении экспертов по вкладу каждого критерия качества в общую оценку, метод анализа иерархий не дает решения задачи эффективного управления электроприводом.

Отсутствие правила (принцип оптимальности), не позволяет формализовать задачу управления, обеспечивающего наиболее полное использование электрической машины и источника питания для реализации технологических требований.

Целью работы – является создание теории и структур энергоэффективного управления быстродействующим электроприводом переменного тока, которое отличается наиболее полным использованием электрической машины и источника питания для реализации технологических требований.

Идея работы состоит в том, что используя функции энергетического состояния, связывающие силовые и энергетические характеристики электрической машины, устанавливается правило выбора решений многокритериальной оптимизации электропривода, позволяющее формализовать задачу многокритериального управления, учитывая потери в стали и насыщение магнитной системы двигателя. Формализация по энергетическим показателям делает вариационную задачу управления значительно проще, рассматривая в функционале качества только критерий быстродействия.

Задачи диссертации:

1. Разработать теорию комплексного подхода к синтезу многомерного управления, способного наряду с формированием электромагнитного момента регулировать основные свойства электропривода, наилучшим образом отвечающие технологическим требованиям.

2. Сформулировать правило выбора решений многокритериальной оптимизации работы электропривода, на основании которого можно формализовать задачу эффективного управления, обеспечивающего наилучшее сочетание энергетических и динамических свойств электропривода в рамках установленных ограничений. Для сопоставления различных решений, разработать аналитический метод интегральной оценки эффективности законов управления электроприводом переменного тока различного типа в переходных режимах.

3. Исследовать изменение состояния электрической машины за минимальное время на примере нелинейного многомерного объекта управления.

4. Разработать динамическую модель системы многомерного управления электроприводом, позволяющую в аналитическом виде определить мгновенные значения регулируемых переменных и выходных величин электрической машины в любой момент времени.

5. Разработать энергоэффективные алгоритмы и структуры многомерного управления электроприводом с синхронными машинами электромагнитного возбуждения и возбуждением от постоянных магнитов (явнополюсным и неявнополюсным).

6. Разработать энергоэффективные алгоритмы и структуры многомерного управления быстродействующим электроприводом на основе асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.

7. Провести экспериментальные исследования, подтверждающие полученные аналитические выводы.

Методы исследований. В работе применялись методы теоретического и экспериментального исследования. Теоретические исследования основывались на методах векторного, матричного исчисления и теории дифференциальных уравнений. Использовались положения теории электромеханического преобразования энергии, теории электропривода и современной теории автоматического управления. Для анализа динамических процессов энергоэффективных систем, учитывающих нелинейность характеристики намагничивания, и проверки аналитических решений, применялись методы численного моделирования на основе интегрированных программных пакетов. Экспериментальные исследования проводились на физической установке.

Научная новизна работы:

1. Сформулировано правило выбора решений многокритериальной оптимизации, отличающееся использованием аналитических связей силовых и энергетических характеристик, учитывая потери в стали и насыщение магнитной системы двигателя.

2. Разработана методология комплексного подхода к синтезу многомерного управления, отличающегося способностью регулировать основные свойства электропривода при апериодическом характере формирования электромагнитного момента.

3. Определены условия изменения состояния электрической машины за минимальное время при формировании выходных величин. Решение отличается применением вариационных методов при синтезе многомерного управления электроприводом методом обратной модели с линеаризацией по выходу.

4. Впервые предложен метод формализации задачи эффективного управления, обеспечивающего наилучшее сочетание динамических и энергетических свойств электропривода в рамках установленных ограничений. В качестве ограничений могут выступать характеристики основных свойств электропривода, связанные в явном виде посредством показателей качества:

- коэффициент полезного действия;
- показатель интенсивности процессов преобразования энергии;
- показатель эффективности использования напряжения;
- показатель эффективности использования мощности.

5. Предложен метод интегральной оценки эффективности управления электроприводом различного типа в переходных режимах, отличающийся применением функций энергетического состояния, связывающих силовые и энергетические характеристики электрической машины.

6. Получена динамическая модель системы многомерного управления электроприводом, отличающегося способностью наряду с формированием электромагнитного момента, учитывая нелинейность характеристики намагничивания и потери в стали, регулировать динамические и энергетические свойства электропривода в условиях существующих ограничений.

7. Разработана стратегия многомерного управления различными типами машин переменного тока, отличающегося формированием электромагнитного момента при одновременном регулировании энергетических свойств в функции скорости или нагрузки быстродействующего электропривода.

Теоретическая значимость полученных результатов

1. Концептуальные положения комплексного подхода к синтезу многомерного управления электроприводом методом обратной модели с линеаризацией по выходу, в совокупности с применением вариационных методов, могут быть использованы для решения нелинейных задач современной теории управления многомерными объектами.

2. Связи силовых и энергетических характеристик электрической машины, представленные в явном виде, дают возможность получить новые знания в теории электромеханического преобразования энергии, на основании которых выбираются решения многокритериальной оптимизации электрической машины электропривода переменного тока для реализации тех или иных требований технологического процесса.

3. Установленная аналитическая зависимость показателей качества основных свойств электропривода от аргументов, характеризующих положение векторов, определяет новые знания теории электропривода, на основании которых становится возможным формализовать задачу управления, обеспечивающего желаемую производительности технологических процессов при максимально возможном снижении потребления энергии.

4. Разработанная методология многокритериального синтеза многомерного управления электрической машиной переменного тока вносит новые знания в развитие теории управления электроприводом переменного тока, на основании которых формируется управление, обеспечивающее наряду с формированием электромагнитного момента регулирование основных свойств электропривода переменного тока различного назначения. Новые решения синтеза управления, обеспечивающего апериодический характер формирования электромагнитного момента, определяют прогнозируемость процессов управления и преемственность синтеза внешних контуров способами подчиненного регулирования систем воспроизведения движения, повышая точность регулирования. Разработанная методология синтеза управления способствует решению практически важных задач энергосбережения высокодинамичных систем воспроизведения движения большой и малой мощности в условиях технологических ограничений.

Практическая значимость полученных результатов

1. Разработанная методология многокритериального синтеза многомерного управления электрическими машинами (синхронных с электромагнитным возбуждением, явнополюсных и неявнополюсных синхронных машин с возбуждением от постоянных магнитов и асинхронных машин с короткозамкнутым ротором) быстродействующего электропривода, позволяет повысить точность регулирования и улучшить интегральную оценку *КПД* за время переходного процесса на 6 - 8%. Такое управление значительно расширяет потребительские свойства электропривода переменного тока.

2. Аналитический метод интегральной оценки энергетической эффективности работы электропривода позволяет на стадии проектирования сопоставить основные свойства различных систем воспроизведения движения в статических и динамических режимах.

3. Разработанные теоретические положения в совокупности с практическими результатами создают объективные предпосылки для внедрения в практику электроприводов нового поколения. Областью применения разработанных алгоритмов управления могут быть электроприводы металлургической, металлообрабатывающей промышленности, электроприводы подвижного состава железнодорожного транспорта, где к технологическим процессам предъявляются высокие динамические и энергетические требования в условиях существенного изменения нагрузки.

Научные положения выносимые на защиту:

1. Изменение состояния электрической машины за минимальное время, при формировании выходных величин, должно осуществляться в условиях пропорционального изменения регулируемых переменных с одинаковым темпом.

2. Выбор решений многокритериальной оптимизации осуществляется посредством показателей качества, характеризующих основные свойства электропривода, аналитически связанных зависимостью силовых и энергетических характеристик электрической машины.

3. Метод формализации задачи многомерного управления, обеспечивающего эффективное использование электрической машины и источника питания электропривода для реализации технологических требований в рамках установленных ограничений, основан на правиле выбора решений многокритериальной оптимизации.

4. Метод интегральной оценки эффективности законов управления, использующий аналитические связи силовых и энергетических характеристик электрической машины, позволяет сопоставить качество работы электроприводов различного типа при различных способах управления в переходных и статических режимах.

5. Для регулирования основных свойств электропривода переменного тока различного типа наряду с формированием электромагнитного момента за минимальное время должен применяться комплексный подход к синтезу многомерного управления, используя метод Лагранжа в понтрягинской форме в совокупности с методом обратной модели и правилом выбора решений многокритериальной оптимизации.

6. Методология синтеза многомерного управления, основанная на концептуальных положениях комплексного подхода, позволяет определить стратегию формирования алгоритмов управления, обеспечивающего наилучшее сочетание энергетических и динамических свойств электропривода переменного тока в рамках существующих ограничений.

Достоверность полученных результатов

Сформулированные в работе научные положения, выводы и рекомендации не противоречат известным положениям теории электромеханического преобразования энергии, теории электропривода и теории автоматического управления.

Достоверность научных результатов определяется корректностью постановок задач, обоснованностью принятых допущений, использованием апробированных математических и численных методов, а также экспериментальным подтверждением основных теоретических выводов при достаточном для инженерной практики совпадении результатов аналитического анализа, компьютерного моделирования и физического эксперимента.

Реализация результатов работы. Результаты, полученные в диссертационной работе, используются при разработке электроприводов на предприятии госкорпорации «РОСАТОМ» ФГУП ПО «Север» г. Новосибирск.

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались и обсуждались: на всероссийской научно - технической конференции «Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири» (г. Иркутск, 1994); на десятой научно технической конференции ЭПТТ - 95 с международным участием «Alternative current electrical drives» (г. Екатеринбург, 1995); на второй научно - технической конференции с международным участием «Электротехника, электромеханика и электротехнологии ЭЭЭ – 2005» (г. Новосибирск, 2005); на научно - технической конференции с международным участием «Электротехника, электромеханика и электротехнологии ЭЭЭ - 2009» (г. Новосибирск, 2009); 12th International conference on actual problems of electronic instrument engineering proceedings (г. Новосибирск, 2014); первой международной научно конференция молодых ученых «Электротехника, энергетика, машиностроение» (г. Новосибирск, 2015); на всероссийской научно практической конференции Энергетика и энергосбережение: теория и практика» (г. Кемерово, 2015); 16 научно – техническая конференция «Электроприводы переменного тока»– ЭПТТ 2015 (г. Екатеринбург); 2016 11th International Forum on Strategic Technology (IFOST) IEEE «Mechatronics and Automation» (Novosibirsk, Russia), 9 международная конференция по автоматизированному электроприводу АЭП 2016 (г. Пермь); IEEE, 13th International Scientific – Technical Conference APEIE 2016 Novosibirsk; 18th International conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices Novosibirsk 2017; на семнадцатой научно технической конференции ЭПТТ - 2018 с международным участием «Alternative current electrical drives» (г. Екатеринбург, 2018).

Публикации. Основное содержание диссертации опубликовано в 58 научных работах, в числе которых 9 научных публикаций, входящих в систему цитирования Scopus, 22 публикации в рецензируемых журналах, рекомендованных перечнем ВАК РФ, из них 16 работ опубликовано в журналах «Электротехника» и «Электричество», одна монография, патент на способ управления, 3 свидетельства регистрации электронного ресурса, 13 докладов на научных конференциях, 10 работ опубликованных в сборниках научных трудов.

Личный вклад автора состоит в постановке задач исследований, разработке методов исследований, создании нового способа управления, подтвержденного патентом Российской Федерации, и обобщению полученных результатов. Все научные положения и формулы разработаны автором лично.

В работах, выполненных совместно с научным консультантом Г. М. Симаковым, автору принадлежат результаты, относящиеся к разработке концепции исследований, задач исследований и методов решения. В других совместных работах, автору принадлежит постановка задач исследований, обоснование математических моделей и методов решений.

Структура и объём работы. Диссертационная работа состоит из введения, 7 глав, заключения, списка литературы из 186 наименований и приложений. Объём составляет 344 страницы основного текста, в том числе: рисунков 122, таблиц 5.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении сделан анализ существующих решений управления электроприводом, показаны недостатки известных способов управления машиной переменного тока, изложена общая характеристика работы – актуальность, цель и задачи исследования, научная новизна и практическая ценность, описана структура работы.

Первая глава посвящена анализу существующих решений и постановке задачи управления электроприводом переменного тока. Рассмотрены алгоритмы управления быстродействующим электроприводом, в частности алгоритмы, обеспечивающие стабилизацию энергии магнитного поля и алгоритмы, не требующие предварительного намагничивания магнитной системы электрической машины.

Анализ ключевых положений концепции комплексного исследования управления электроприводом позволил сформулировать следующие выводы:

1. Современный электропривод должен наилучшим образом отвечать, как динамическим, так и энергетическим требованиям, учитывая существующие ограничения. Предъявляемые требования к электроприводу обусловлены желанием улучшить производительность технологических процессов и снизить потери энергии.

2. Аперiodический характер формирования электромагнитного момента позволит улучшить прогнозируемость и точность регулирования траектории движения исполнительного механизма, используя принципы подчиненного регулирования.

3. Обладая некоторой избыточностью, часть ресурсов управления электрической машиной быстродействующего электропривода направляются на стабилизацию потокосцепления, обеспечивая линеаризацию системы, приводя структуру управления к одноканальному виду. Но формирование электромагнитного момента в этих условиях не отличается экономичностью, поскольку поддерживать потокосцепление на уровне номинальной величины при различной нагрузке двигателя энергетически неэкономично.

4. Экстремальное управление электроприводом по минимуму тепловых потерь не отличается высоким быстродействием. Такое управление характеризуется значительной реактивной мощностью и не эффективным использованием напряжения, величина которого всегда ограничена. Управление отличается существенными потерями в стали и повышенной мощностью, подводимой к обмоткам двигателя для изменения электромагнитного момента с заданным темпом.

5. Для решения задачи эффективного управления необходимо сопоставить динамические и энергетические свойства электропривода, учитывая величину реактивной мощности, потери в стали, потери в меди, мощность мгновенного изменения энергии магнитного поля при формировании электромагнитного момента, эффективность использования напряжения и мощности, подводимой к обмоткам двигателя. Эти свойства, в условиях тех или иных ограничений электропривода, имеют противоречивый характер и зависят от нагрузки, что значительно усложняет задачу формирования управления, обеспечивающего высокую производительность технологических процессов при снижении энергетических затрат.

6. Для создания эффективного электропривода должен быть многокритериальный подход к синтезу управления. В настоящее время процесс формализации многокритериальных задач неизбежно связан с экспертными оценками, как самих критериев качества, так и связей между ними. Основанный на суждении экспертов по вкладу каждого критерия качества в общую оценку, метод анализа иерархий не позволяет найти решение задачи эффективного управления электроприводом.

7. Для унификации структуры электропривода, обеспечивающего высокую производительность технологических процессов при снижении энергетических затрат, следует исследовать физические свойства электрической машины, применяя вариационные методы синтеза.

Таким образом, в области организации управления электроприводом существует ряд проблемных теоретических задач. Для их решения, опираясь на теорию электромеханического преобразования энергии, теорию электропривода и современную теорию автоматического управления проработан ряд теоретических положений, объединенных концепцией комплексного подхода к синтезу многомерного управления электроприводом переменного тока различного типа.

Во второй главе представлено доказательство концептуального положения, являющегося первым научным положением, выносимым на защиту. Исследуется изменение состояния электрической машины за минимальное время при формировании выходных величин, нелинейно связанных с регулируемыми переменными. Сделав акцент на звене умножения, рассмотрена задача быстрогодействия на примере модели трехканальной нелинейной системы, характеризуемой тремя входными воздействиями и тремя выходными величинами, нелинейно связанными с регулируемыми переменными x_i , представленными в безразмерных единицах. Основная выходная величина m модели зависит от произведения (2) регулируемых переменных x_i . Другие выходные величины y_i , образуя вектор \mathbf{Y} , нелинейно связаны с регулируемыми переменными. Постановка задачи следующая.

В функции регулируемых переменных сформировать вектор многомерного управления $\mathbf{U}[x_i(t)]$, принадлежащий замкнутой области Ω n -мерного пространства \mathbf{R}^n допустимых управлений u_i , ограниченных по модулю u_{ogr} , обеспечивающий перевод системы из начального состояния в состояние определенное заданным значением выходных величин за минимальное время при ограничении полосы пропускания контуров регулируемых переменных $T_z^{-1} [rad/c]$.

Под допустимым управлением понимается все множество управлений позволяющих сформировать предписанные значения выходных величин.

Математическое описание представлено уравнениями описывающими состояние каждого канала регулирования многомерной нелинейной модели в ортогональной системе координат:

$$\frac{d\mathbf{X}}{dt} = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{U}[x_i(t)]; \left\{ \sum_{i=1}^n u_i^2 \leq u_{ogr}^2 \right\} \subset \Omega; \mathbf{U}[x_i(t)] \subset \Omega \forall t \in [t_0, t_1] \Omega \subset \mathbf{R}^n, \quad (1)$$

$$m = \prod_{i=1}^n x_i; i = \overline{1, n}; \mathbf{X}(t) \in \mathbf{R}^n; \mathbf{Y} = \mathbf{X} x^{-1}; x = \left(\mathbf{X}^T \mathbf{X} \right)^{1/2}; \mathbf{Y}(t) \in \mathbf{R}^n, \quad (2)$$

$$\mathbf{Y}_{ref} = \|y_{1ref} y_{2ref} y_{3ref}\|^T; \mathbf{X}(0) = 0; \left(\mathbf{Y}^T \mathbf{Y} \right) = 1,$$

где \mathbf{X} – вектор столбец регулируемых переменных x_i ; \mathbf{A} – стационарная квадратная матрица, характеризует динамические свойства модели; x – модуль вектора регулируемых переменных; T – знак транспонирования. При определенных допущениях, представленная модель близка модели обобщенной электрической машины. Ее основные свойства (определяемые связью тепловых потерь, напряжения, энергии магнитного поля и электромагнитного момента) зависят от положения векторов. Поэтому компоненты y_i вектора \mathbf{Y} выходных величин модели нелинейно зависят от соотношений регулируемых переменных x_i . В качестве задания выступает вектор \mathbf{Y}_{ref} . Рассматривая полные производные выходных величин, методом обратной модели с линеаризацией по выходу (Linearization by output injection) сформировано управление, приведя систему (1) к новым $\tilde{\mathbf{X}}$ регулируемым переменным:

$$\mathbf{U}[x_i(t)] = -\mathbf{G}\mathbf{K}\mathbf{X} + \mathbf{G}\mathbf{Y}_{ref} \frac{u_{ref}}{\|\mathbf{X}\|^2} (T_z y_{1ref} y_{2ref} y_{3ref})^{-1}, \quad (3)$$

$$3 \text{diag}\{x_1^2, x_2^2, x_3^2\} \frac{d\mathbf{X}}{dt} = 3 \text{diag}\{x_1^2, x_2^2, x_3^2\} \mathbf{A}\mathbf{X} + 3 \text{diag}\{x_1^2, x_2^2, x_3^2\} \mathbf{U}[x_i(t)],$$

$$\frac{d\tilde{\mathbf{X}}}{dt} = 3 \text{diag}\{y_1^2, y_2^2, y_3^2\} \mathbf{A}\mathbf{Y} x^3 + 3 \text{diag}\{y_1^2, y_2^2, y_3^2\} x^2 \mathbf{U}[x_i(t)]; \tilde{\mathbf{X}} = [x_1^3, x_2^3, x_3^3]^T,$$

где \mathbf{G} – матрица управления, в нашем случае рассматривается в виде единичной матрицы, \mathbf{K} – квадратная матрица регулятора размерностью матрицы \mathbf{A} , T_z^{-1} – параметр задает ограничение полосы пропускания контуров регулируемых переменных. При управлении (3), система (1) представлена в зависимости от задания $\tilde{\mathbf{X}}_{ref}$ вектора регулируемых переменных:

$$\frac{d\tilde{\mathbf{X}}}{dt} = 3(\mathbf{L} - \mathbf{K}_r)\tilde{\mathbf{X}} + 3\tilde{\mathbf{X}}_{ref} T_z^{-1}; \tilde{\mathbf{X}}_{ref} = \tilde{\mathbf{Y}}\mathbf{Y}_{ref} (y_{1ref} y_{2ref} y_{3ref})^{-1} u_{ref},$$

$$\mathbf{f}(\tilde{\mathbf{X}}, \tilde{\mathbf{Y}}, u_{ref}) = 3(\mathbf{L} - \mathbf{K}_r)\tilde{\mathbf{X}} + 3\tilde{\mathbf{X}}_{ref} T_z^{-1}; \mathbf{K}_r = \mathbf{Y}\mathbf{K}\mathbf{Y}^{-1}.$$

Путем определенной организации структуры управления (3), изображенной на рисунке 1, система приведена к линейному виду. Организованное управление нелинейно в системе исходных координат, но обеспечивает линейную зависимость всех выходных величин от задания. Следует определить элементы матрицы \mathbf{K} многомерного регулятора, посредством которого изменение состояния трехканальной модели осуществляется за минимальное время.

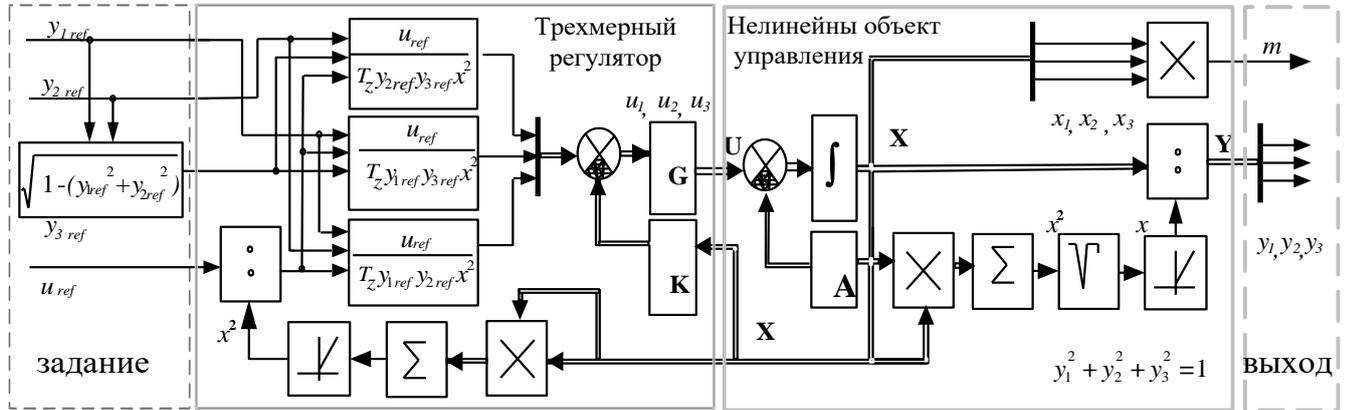


Рисунок 1 – Структурная схема управления трехканальным объектом

Так как критерием качества является время T , составлен гамильтониан H быстрогодействия:

$$T = \int_{t_0}^{t_1} 1 dt \rightarrow \min; H = \mathbf{S}^T \mathbf{f}(\tilde{\mathbf{X}}, \tilde{\mathbf{Y}}, u_{ref}); \mathbf{S} = \begin{bmatrix} s_1 & s_2 & s_3 \end{bmatrix}^T.$$

Координаты вектора \mathbf{S} сопряженной системы имеют сложную зависимость от времени:

$$\frac{d\mathbf{S}}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial \tilde{\mathbf{X}}^T} = -3(\mathbf{L} - \mathbf{K}_r)^T \mathbf{S}; \mathbf{S}(t) = e^{-3(\mathbf{L} - \mathbf{K}_r)^T t} \mathbf{S}(0).$$

Условия стационарности гамильтониана определены двумя требованиями:

$$\frac{\partial H}{\partial \tilde{\mathbf{Y}}^T} = 0, \quad \frac{\partial H}{\partial u_{ref}} = 0;$$

которые выполняются при определенном выборе элементов матрицы \mathbf{K}_r :

$$\mathbf{K}_r = (\mathbf{E}T_z^{-1} + \mathbf{L}), \\ -(\mathbf{L} - \mathbf{K}_r) = \mathbf{E}T_z^{-1}; \mathbf{K} = \tilde{\mathbf{Y}}^{-1} \mathbf{K}_r \tilde{\mathbf{Y}}.$$

Используя вариационные методы, решена задача управления многомерным объектом, а управление, при заданных ограничениях, реализует высокое быстродействие системы:

$$\mathbf{Y}(t) = \text{const}; \dot{\mathbf{Y}}(t) = \mathbf{Y}_{ref}; m(t) = U_{ref} [1 - \exp(-\frac{3t}{T_z})].$$

При ограничении полосы пропускания контуров регулируемых переменных и организации управления в области допустимых управлений, быстродействие многомерной системы (3) в три раза превышает быстродействие системы, приведен-

ной к одноканальному виду. В результате решения поставленной задачи сделан важный вывод. Для многоканального объекта наилучшее по быстродействию управление должно обеспечивать пропорциональное изменение регулируемых переменных с одинаковым темпом. В этих условиях, в отличие от одноканальной структуры, форсирование управлений осуществляется сразу по всем каналам регулирования, что и обеспечивает более высокий темп изменения выходных величин многомерной системы при ограничении управляющих воздействий.

В третьей главе рассмотрено второе концептуальное положение. Установлены аргументы, характеризующие закон управления, определен перечень показателей качества, влияющих на динамические и энергетические свойства электропривода в зависимости от установленных аргументов. Сформулировано правило выбора решений многокритериальной оптимизации электропривода. Разработан метод формализации задачи многомерного управления, обеспечивающего наилучшее сочетание динамических и энергетических свойств электропривода в условиях заданных ограничений.

Учитывая разнообразие исследуемых объектов, в качестве преобразователя энергии исследуется обобщённая электрическая машина. Вектор напряжения \mathbf{U} определяет управление (4) электрической машиной:

$$\mathbf{U} = \mathbf{R}\mathbf{I} + \omega \mathbf{D}\Psi + \frac{d\Psi}{dt}; \quad \mathbf{U} = [u_d \quad u_q \quad u_{rd} \quad u_{rq}]^T, \quad (4)$$

$$\Psi = [\psi_d \quad \psi_q \quad \psi_{rd} \quad \psi_{rq}]^T; \quad \mathbf{R} = \text{diag}\{R_s \quad R_s \quad R_r \quad R_r\},$$

$$\mathbf{I} = \mathbf{L}^{-1}\Psi; \quad L_s = L_m + L_\sigma; \quad L_r = L_m + L_{\sigma r}; \quad L_m = \frac{\Psi_0}{I_0},$$

$$I_0 = \sqrt{(i_d + i_{rd})^2 + (i_q + i_{rq})^2}; \quad \Psi_0 = \sqrt{(\Psi_d - L_\sigma i_d)^2 + (\Psi_q - L_\sigma i_q)^2},$$

где \mathbf{D} матрица поворота; \mathbf{L} - матрица индуктивностей; $L_\sigma, L_{\sigma r}$ - индуктивности рассеивания обмоток статора и ротора; L_s, L_r - полные индуктивности обмоток статора и ротора; L_m - взаимная индуктивность обмоток статора и ротора определяет мгновенное отношение потокосцепления в воздушном зазоре Ψ_0 к току намагничивания I_0 . Для обобщенной электрической машины связь потокосцепления в воздушном зазоре и тока намагничивания имеет линейную зависимость.

Исследование основывается на математической модели (4) представленной уравнениями Кирхгофа в системе координат d, q , вращающихся со скоростью ротора ω , ориентированной по току ротора $i_{rq} = 0, i_{rd} = i_r$. Для анализа связей силовых и энергетических характеристик, в качестве которых выступают электромагнитный момент, энергия магнитного поля, тепловые потери и напряжение, подводимое к обмоткам двигателя, рассмотрены процессы электромеханического преобразования энергии.

Эти процессы неразрывно связаны с накоплением энергии w в обмотках (энергией магнитного поля) электрической машины и описываются уравнением

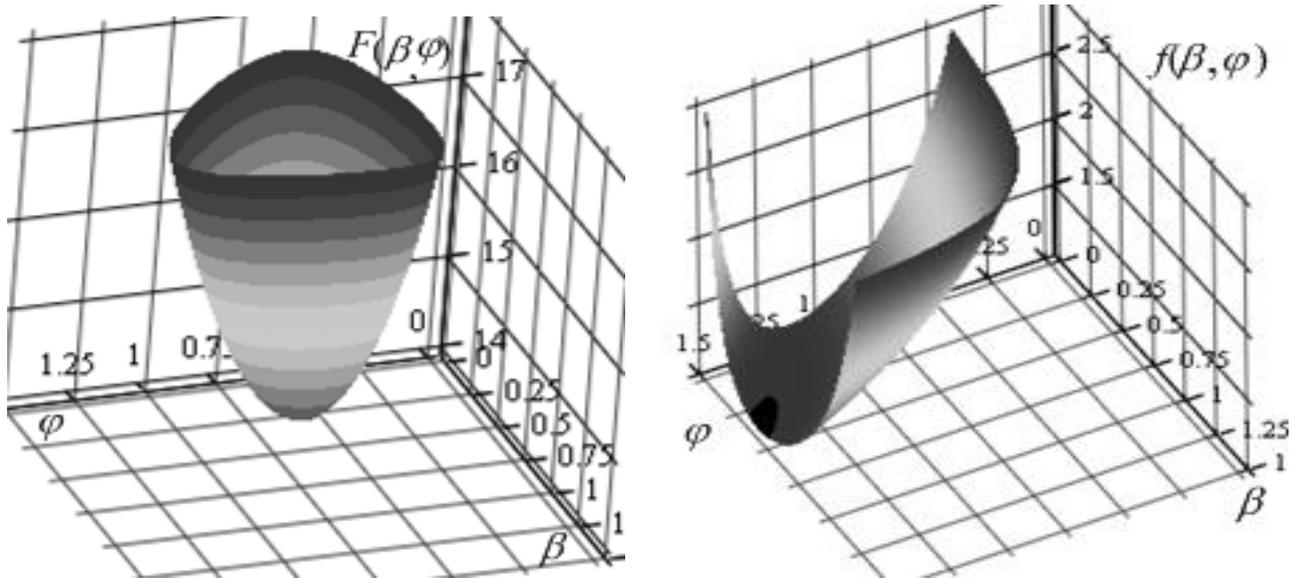


Рисунок 3 – Поверхности значений первой $f(\varphi, \beta)$ и второй $F(\varphi, \beta)$ функций энергетического состояния электрической машины

Проведенные исследования показывают, поверхность значений каждой из функций имеет минимум f_{min} , F_{min} , который зависит от конструктивного исполнения электрической машины и достигается при определенном положении векторов. Минимум $f(\varphi, \beta)$ существует при определенных аргументах β , φ :

$$f_{min} = \frac{2\sqrt{L_r L_s - L_m^2}}{L_m}; \beta = \frac{\pi}{2}; \varphi = \arcsin \sqrt{\frac{L_r L_s - L_m^2}{L_r L_s}}.$$

Минимум $F(\varphi, \beta)$ достигается при аргументах, определенных другими формулами:

$$F_{min} = \frac{2\sqrt{R_r R_s}}{L_m}; \varphi = \beta = \arcsin \left(L_s \sqrt{\frac{R_r}{R_r L_s^2 + R_s L_m^2}} \right).$$

Установленные связи силовых и энергетических характеристик позволяют интерпретировать полученные результаты и на другие типы электрических машин, учитывая потери в стали насыщение магнитной системы двигателя.

Повышая быстродействие системы путем форсирования управления, увеличивается напряжение и мощность, подводимая к обмоткам двигателя, что определяет увеличение интенсивности процессов преобразования энергии. Методом Эйлера – Лагранжа определены условия изменения состояния электрической машины за минимальное время при ограничении мощности, подводимой к обмоткам двигателя. Установлен показатель, характеризующий интенсивность процессов преобразования энергии. Показано влияние функций энергетического состояния на оценку энергетической эффективности и оценку интенсивности процессов преобразования энергии в зависимости от положения векторов в системе вращающихся координат.

Определены аргументы, при которых мощность, подводимая к обмоткам двигателя для изменения электромагнитного момента с заданным темпом, имеет минимальное значение.

Для решения этих задач использованы функции энергетического состояния полагая, что скорость вращения ротора ω в процессе формирования электромагнитного момента изменится незначительно. Критерием качества является время. Функция Лагранжа сформирована следующим образом:

$$L(w, \dot{w}, P_{ref}) = H - s_2 \dot{w}; \quad s_1 = -1; s_2 \neq 0,$$

где s_1, s_2 – множители Лагранжа, являются функциями времени не равными тождественно нулю. H – функция Гамильтона:

$$H = s_1 + s_2 \left[P_{ref} - 2w \frac{\omega + F(\beta, \varphi)}{f(\beta, \varphi)} \right].$$

Уравнение баланса мощностей выступает в качестве уравнения связи:

$$P_{ref} = \frac{dw}{dt} + \omega m + mF(\beta, \varphi).$$

При медленно изменяющемся параметре ω и неизменном положении векторов, получено решение для множителей Лагранжа:

$$\frac{ds_2}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial w} = 2s_2 \frac{\omega + F(\beta, \varphi)}{f(\beta, \varphi)}; \quad s_2 = e^{\frac{2t}{T_\delta}} s_0; \quad s_0 = P_{ref}^{-1}.$$

Определено решение для энергии (8), подводимой к обмоткам двигателя, при начальных условиях равных нулю:

$$\begin{aligned} \frac{dw}{dt} = \frac{\partial H}{\partial s_2} = -2w \frac{\omega + F(\beta, \varphi)}{f(\beta, \varphi)} + P_{ref}, \\ w = w_{ref} \left[1 - \exp\left(-\frac{2t}{T_\delta}\right) \right]; \quad w_{ref} = \frac{1}{2} \frac{P_{ref} f(\beta, \varphi)}{[\omega + F(\beta, \varphi)]}. \end{aligned} \quad (8)$$

Параметр времени T_δ , характеризую темп электромеханического преобразования энергии, может выступать в качестве показателя качества работы электропривода. Он зависит от функций энергетического состояния $F(\varphi, \beta)$, $f(\varphi, \beta)$ и угловой скорости вращения ротора ω :

$$T_\delta = \frac{f(\beta, \varphi)}{\omega + F(\beta, \varphi)}. \quad (9)$$

Положение векторов, при котором функция $f(\varphi, \beta)$ имеет минимальное значение, определяет условие наивысшей интенсивность процессов преобразования энергии (9), при заданной скорости. В этих условиях возрастают потери в электроприводе, что потребовало установить зависимость показателя η энергетической эффективности и показателя интенсивности процессов преобразования энергии T_δ :

$$\eta = \frac{m\omega}{m\omega + \Delta P} = \frac{\omega}{\omega + F(\beta, \varphi)}; \quad T_\delta = \frac{f(\beta, \varphi)}{\omega} \eta [\text{сек}]. \quad (10)$$

В зависимости от способа управления, реализуемого в электроприводе, к обмоткам двигателя подводится напряжение. Желаемые соотношения энергетиче-

ских и динамических свойств электропривода (10) могут быть реализованы только при достаточной величине напряжения, значение которого всегда ограничено. Поэтому оценка свойств будет неполной без оценки величины и эффективности использования напряжения u , подводимого к обмоткам двигателя. Для этой цели введена третья функция энергетического состояния $f_u(\varphi, \beta)$, устанавливающая зависимость между модулем напряжения статора и электромагнитным моментом:

$$f_u(\beta, \varphi) = \frac{u^2}{R_s m}, \text{ где } u = \sqrt{u_d^2 + u_q^2}.$$

Приняв обозначение $T_s = L_s/R_s$, третья функция энергетического состояния $f_u(\varphi, \beta)$ записана следующей формулой:

$$f_u(\beta, \varphi) = \frac{\operatorname{tg} \varphi^2 + [1 + \omega T_s (\operatorname{ctg} \beta + \operatorname{tg} \varphi)]^2}{T_s (\operatorname{ctg} \beta + \operatorname{tg} \varphi)} [\text{сек}].$$

Поверхность значений функции $f_u(\varphi, \beta)$ представлена на рисунке 4. При заданной скорости вращения ротора аргументы функции $f_u(\varphi, \beta)$ могут характеризовать величину необходимого напряжения.

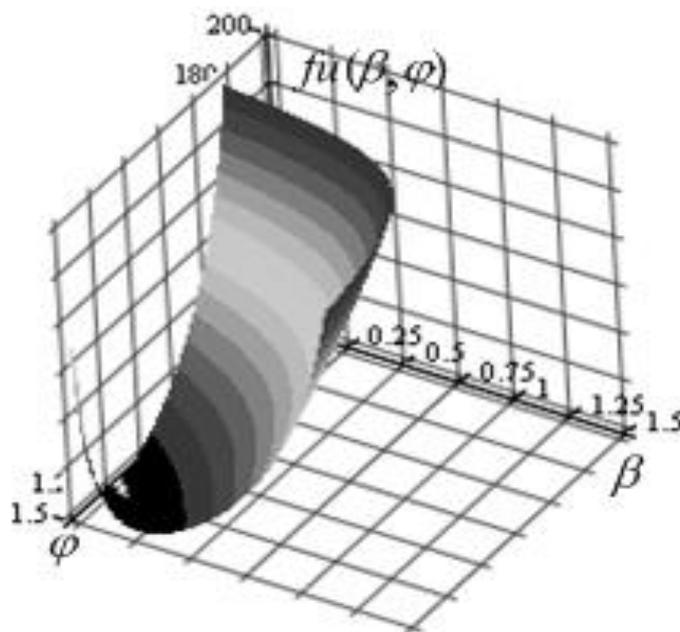


Рисунок 4 – Третья функция энергетического состояния, характеризующая связь электромагнитного момента и напряжения, подводимого к обмоткам двигателя

Для оценки эффективности использования напряжения U_o выбрано отношение U_{min} к величине напряжения U , требуемого для реализации того или иного способа управления:

$$U_o = \frac{U_{min}}{U} = 2 \sqrt{\frac{\omega}{f_u(\beta, \varphi)}}; U_{min} = 2 \sqrt{R_s \omega m}, \quad (11)$$

где U_{min} – величина минимального напряжения необходимого для передачи исполнительному механизму заданной мощности при фиксированной скорости ω .

Сочетание аргументов φ , β функций (6) и (7) определяет основные свойства работы электрической машины, которые характеризуются показателями качества. Аргументы φ , β могут выступать в качестве задания основных свойств электропривода при организации многомерного управления. На рисунке 5 представлена структурная схема связей основных свойств электропривода от аргументов, определяющих положение векторов в системе вращающихся координат.

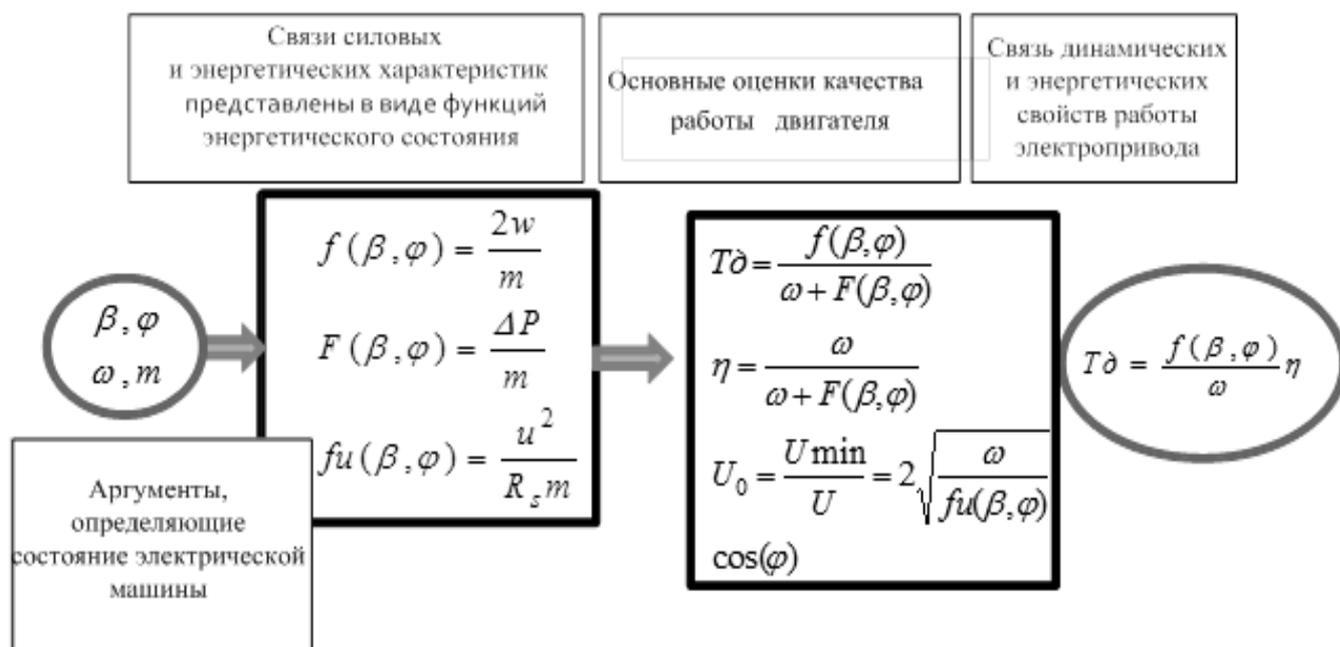


Рисунок 5 – Структура связей показателей основных свойств электрической машины

В качестве показателей качества выступают:

- коэффициент полезного действия;
- показатель интенсивности процессов преобразования энергии;
- показатель эффективности использования напряжения;
- показатель эффективности использования мощности.

Установленный перечень взаимосвязанных показателей качества динамических и энергетических свойств позволяет сформулировать правило выбора решений многокритериальной оптимизации работы электропривода в зависимости от характера технологической задачи и ее цели.

Задавая один показатель, всегда можно определить аргументы, при которых другие показатели качества имеют наилучшее значение.

Рассмотрим применение этого правила на простом примере. Пусть задано время t_{ref} , в течение которого необходимо линейно сформировать электромагнитный момент m_{ref} при ограничении мощности P_{ref} , подводимой к обмоткам двигателя. Скорость вращения ротора равна нулю.

В этих условиях необходимо определить аргументы β , φ , в области значений, где возможно сформировать электромагнитный момент, при минимальных потерях ΔP_{min} . Полагая, что мощность потерь существенно меньше мощности

изменения энергии магнитного поля, определено значение первой функции энергетического состояния $f(\beta, \varphi)$, соответствующее условиям заданного быстродействия, при ограничении мощности:

$$\frac{dw}{dt} = P_{ref} = \frac{f(\beta, \varphi) dm}{2} \frac{dm}{dt}; f(\beta, \varphi) = \frac{P_{ref} t_{ref}}{2 m_{ref}},$$

$$\beta = f(\varphi); \Delta P_{min} = F(\beta) m_{ref} . \quad (12)$$

Установленное значение функции $f(\beta, \varphi)$ позволяет определить связь аргументов φ, β в области значений, где выполняются заданные требования. В этой области следует выделить те значения переменных, при которых вторая функция $F(\beta, \varphi)$ минимальна. Подставив установленное соотношение аргументов в (7), вторая функция $F(\beta)$ представлена в зависимости от одной переменной. Минимум функции $F(\beta)$ определяет аргументы, при которых тепловые потери минимальны в условиях заданного быстродействия. Несколько усложнив задачу управления, переменные, доставляющие наилучшее соотношение динамических и энергетических свойств электропривода можно определить в функции скорости вращения ротора или насыщения магнитной системы двигателя, учитывая потери в стали. Решение следует проверить при существующих ограничениях. В качестве ограничений могут выступать показатели, представленные на рисунке 5 в структурированном виде. В случае выхода на ограничение (напряжения или эффективности использования мощности), следует снизить быстродействие или, в условиях ограничения быстродействия, увеличить потери, определив новые значения аргументов. На основании разработанного правила выбора решений многокритериальной оптимизации предложен метод формализации требований к управлению, обеспечивающему эффективное использование электрической машины и источника питания для реализации цели управления, являющийся третьим научным положением, выносимым на защиту.

В этой же главе, используя функции энергетического состояния, представлен интегральный метод анализа энергетических характеристик электропривода в переходных режимах. Задавая переходной процесс, при линейном изменении электромагнитного момента с заданным темпом, устанавливается закон изменения положения векторов при различных алгоритмах управления машинами переменного тока электропривода различного типа. Применяя явные связи основных показателей качества, связи силовых и энергетических характеристик, интегрирование функций, при заданном переходном процессе, значительно упрощается.

Разработанный метод позволяет на стадии проектирования в аналитическом виде сопоставить основные свойства электропривода переменного тока с различными типами электрических машин при различных законах управления, доказывая четвертое научное положение, выносимое на защиту.

В четвертой главе, на основании основных положений представленной концепции, используя установленные закономерности и возможности управления, рассмотрена методология многокритериального синтеза многомерного управления электроприводом переменного тока на примере обобщенной электрической машины.

Используя полные производные выходных величин, методом обратной модели с линеаризацией по выходу осуществлен переход к системе новых регулируемых переменных. Организованное управление обеспечивает линейную зависимость всех выходных величин от задания. Методом Лагранжа в понатрягинской форме рассмотрен выбор параметров многомерного регулятора управления, обеспечивающего изменение состояния электрической машины за минимальное время в условиях ограничения полосы пропускания контуров регулируемых переменных. В качестве задания основных свойств обобщенной электрической машины выступают два аргумента φ , β , характеризующие положение векторов, устанавливая заданное соотношение регулируемых переменных. На основании метода формализации требований к многокритериальному управлению определены параметры регулятора эффективного управления электроприводом, доказывая пятое научное положение, выносимое на защиту. Показано, что величина и характер формирования электромагнитного момента не зависят от задания свойств электропривода. Используя комплексный подход, разработаны основные положения многокритериального синтеза многомерного управления, позволяющего наряду с апериодическим характером формирования электромагнитного момента регулировать энергетические свойства электропривода. В аналитическом виде представлена динамическая модель многомерной системы управления электроприводом, позволяющая определить значения регулируемых переменных и выходных величин электрической машины в любой момент времени переходного процесса.

Определена стратегия эффективного управления, доказывая шестое научное положение, выносимое на защиту. Применение методологии комплексного подхода к синтезу управления различными типами электрических машин предполагает следующие действия:

- с помощью установленного правила выбора решений многокритериальной оптимизации по различным критериям качества $L_i(\beta, \varphi)$, учитывая нелинейность характеристики намагничивания и потери в стали, формализуются требования к управлению электроприводом;

- определяется связь регулируемых переменных и выходных величин электрической машины в зависимости от аргументов, характеризующих положение векторов в системе рассматриваемых координат;

- на основании формализованных требований к управлению электроприводом, посредством функций энергетического состояния, учитывающих потери в стали и насыщение магнитной системы двигателя, устанавливается зависимость аргументов от скорости вращения ротора и отношения потокосцепления в воздушном зазоре к току намагничивания;

- устанавливается уровень ограничения полосы пропускания контуров регулируемых в зависимости от желаемого быстродействия и возможности источника питания;

- настраиваются корректоры динамических и энергетических характеристик многомерного регулятора управления, обеспечивающего желаемые свойства электропривода.

В пятой главе представлена стратегия формирования управления синхронными машинами различного типа.

Опираясь на методологию комплексного подхода к синтезу многомерного управления, в основе которого лежит идея управления, новизна и приоритет которого подтверждена патентом на изобретение № 2092967 РФ, H 02 P 21/00, решена задача управления синхронной машиной с электромагнитным возбуждением. Структура многомерной системы многокритериального управления синхронной машиной представлена на рисунке 6.

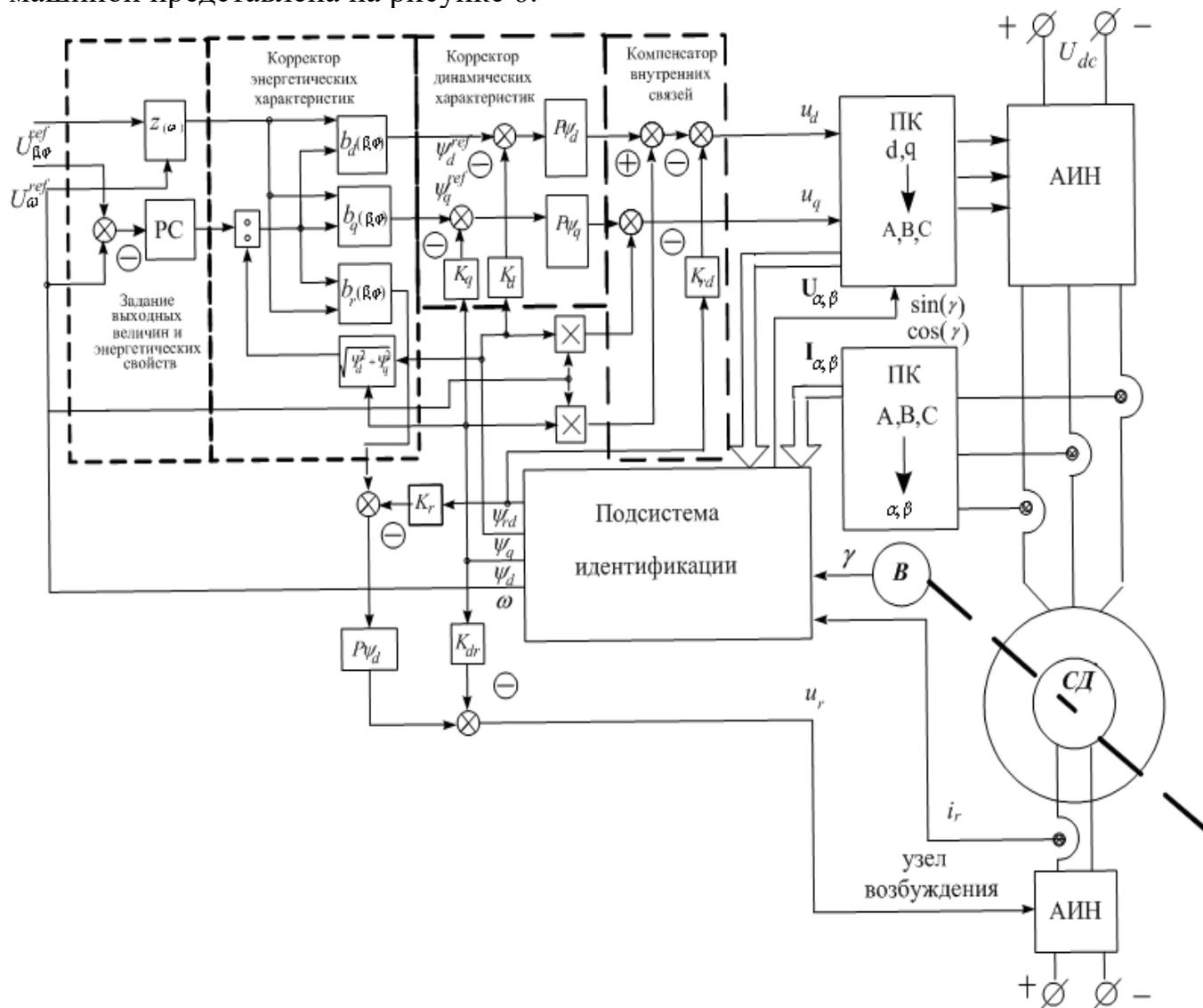


Рисунок 6 – Структура энергоэффективного управления синхронной машиной с электромагнитным возбуждением быстродействующего электропривода

Сформированное методом обратной модели управление обеспечивает апериодический характер изменения электромагнитного момента за минимальное время при минимизации тепловых потерь в условиях минимума реактивной мощности. Сделаны интегральные оценки энергетических свойств работы электропривода при различных способах управления в переходных режимах и ограничении модуля напряжения на номинальном уровне. Выбор желаемых свойств электропривода выполнен в соответствии с разработанным методом формализации задачи управления на основании технологических требований. Корректор динамических характеристик устанавливает ограничение полосы пропускания контуров ре-

гулируемых переменных, определяя настройку регуляторов. Корректор энергетических характеристик формирует задание основных свойств электропривода. Развязку внутренних связей осуществляет соответствующий компенсатор.

Предлагаемое управление позволяет отказаться от предварительного намагничивания магнитной системы электрической машины. Отсутствие предварительного намагничивания дает возможность улучшить интегральную оценку КПД в переходных процессах электропривода на 5 – 8 %. При ограничении модуля вектора напряжения на уровне $U = 311$ [В] и заданной полосе пропускания T_z^{-1} замкнутых контуров регулируемых переменных, процессы формирования электромагнитного момента, представленные на рисунке 7, в два раза быстрее относительно системы приведенной к одноканальному виду, где осуществляется предварительное намагничивание. Совпадение фазных токов и напряжений говорит о выполнении условий минимизации реактивной мощности. Аперриодический характер формирования электромагнитного момента определяет прогнозируемость процессов управления и преимущество синтеза внешних контуров способами подчиненного регулирования, что способствует повышению точности регулирования траектории при малой и большой скорости вращения ротора.

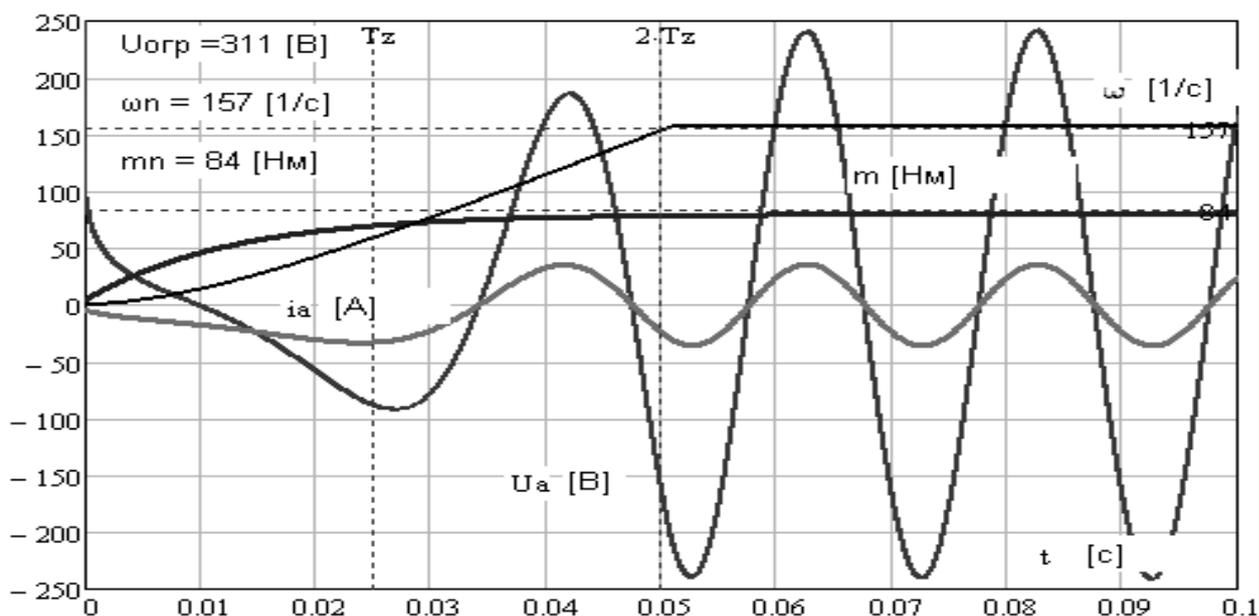


Рисунок 7 – Процессы формирования электромагнитного момента при минимизации тепловых потерь в условиях одновременного регулирования реактивной мощности синхронной машины до своего минимального значения

Предлагаемое управление, за счет регулирования энергетических характеристик электропривода, обеспечивает эффективную работу синхронной машины с электромагнитным возбуждением.

В этой же главе рассмотрено многомерное управление синхронным двигателем с постоянными магнитами (СДПМ) высоко-динамичного электропривода. Управление синхронной машиной с постоянными магнитами (явнополусной и

неявнополюсной) обеспечивает аperiодический характер изменения электромагнитного момента при одновременном регулировании реактивной мощности. Структурная схема представлена на рисунке 8.

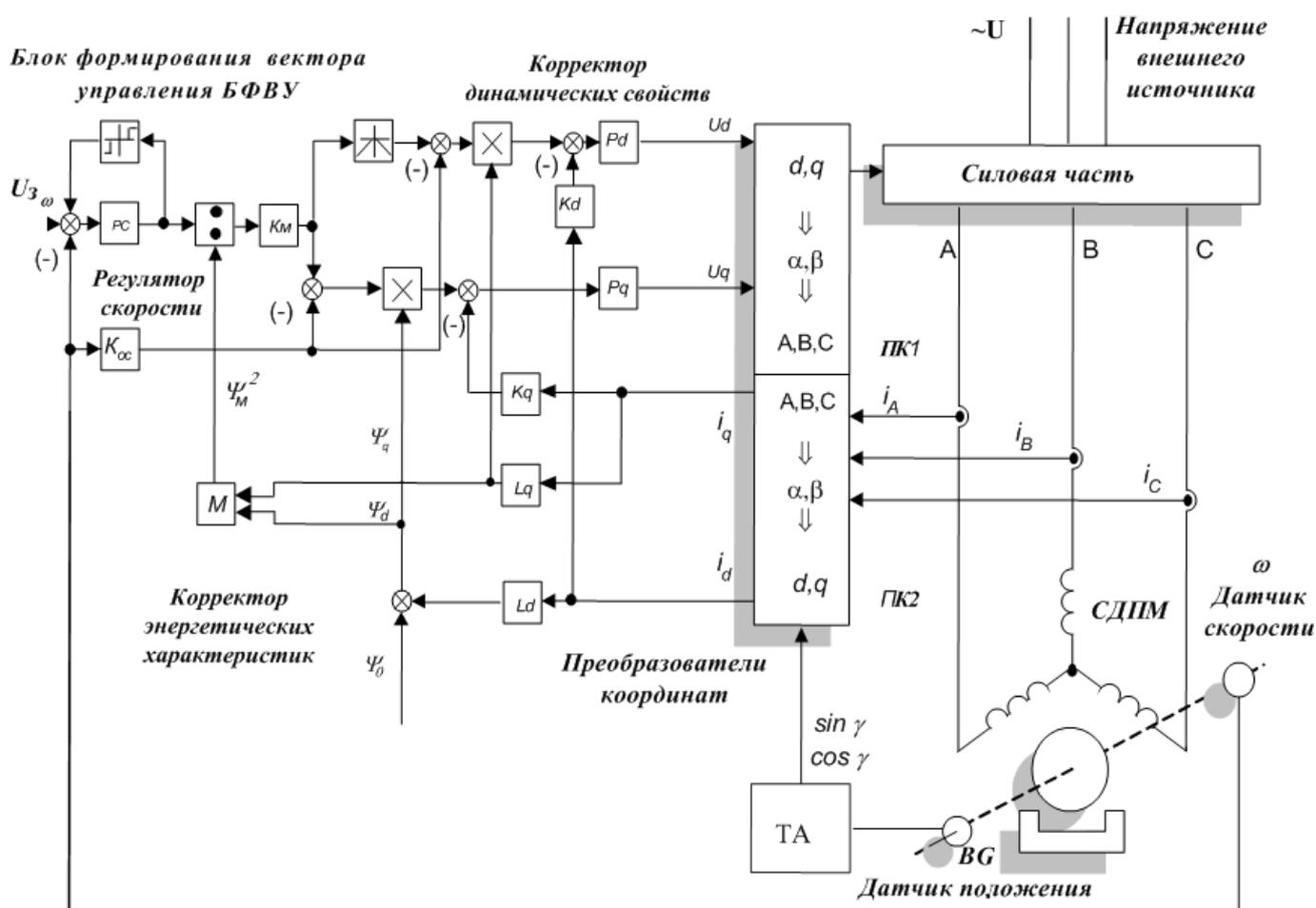


Рисунок 8 – Общая структура энергоэффективного управления синхронной машиной с возбуждением от постоянных магнитов

По сравнению с управлением СДПМ током, ориентированным по поперечной оси, предлагаемое управление позволяет более эффективно использовать мощность, подводимую к обмоткам двигателя, расширяя диапазон регулирования скорости на 15-20 % в области высоких скоростей движения, что особенно актуально для систем с автономным источником питания.

В шестой главе рассмотрено применение методологии комплексного подхода к синтезу многомерного управления асинхронной машиной с короткозамкнутым ротором.

Имея наиболее широкое применение в массовом электроприводе, асинхронная машина конструктивно выполняется таким образом, чтобы в номинальных режимах работы потери в двигателе были достаточно низки при наилучшем значении $\cos(\varphi)$. При большой и малой нагрузке этот показатель качества значительно снижается, ухудшая энергетические возможности работы всего электроприво-

да. Экстремальные законы управления по минимуму потерь не в состоянии обеспечить высокое быстродействие электропривода в условиях ограничения напряжения источника питания. Поэтому ставится задача сохранения энергетических показателей номинального режима быстродействующего электропривода при различной нагрузке в условиях высокой точности регулирования.

Для аналитического решения задачи комплексного подхода к синтезу многомерного управления, используя в качестве регулируемых переменных потокосцепления, организация управления асинхронной машины рассматривается в области аргументов, где насыщение магнитной системы двигателя проявляется слабо (минимум реактивной мощности) при различной нагрузке. Математическое описание представлено уравнениями Кирхгофа, описывающими состояние асинхронной машины с короткозамкнутым ротором (13) в системе вращающейся координат со скоростью ω_s поля, ориентированной по потокосцеплению ротора:

$$\frac{d\Psi}{dt} = \mathbf{f}; \quad \mathbf{f} = \mathbf{V}\Psi + \mathbf{U}[\psi_i(t)]; \quad \mathbf{V} = -\mathbf{R}\mathbf{L}^{-1} - \omega_s \mathbf{E}_s \mathbf{D} - (\omega_s - p\omega_r) \mathbf{E}_r \mathbf{D}, \quad (13)$$

$$i = \overline{1, n}; \quad \Psi = \mathbf{B} \frac{m}{\Psi_{rd}}; \quad L_s = L_m + L_\sigma; \quad L_r = L_m + L_{\sigma r}; \quad L_m = \frac{\Psi_0}{I_0}, \quad (14)$$

$$I_0 = \sqrt{(i_d + i_{rd})^2 + (i_q + i_{rq})^2}; \quad \Psi_0 = \sqrt{(\Psi_d - L_\sigma i_d)^2 + (\Psi_q - L_\sigma i_q)^2},$$

$$\mathbf{B} = \frac{2}{3p} \frac{(L_s L_r - L_m^2)}{L_m} \left\| \begin{matrix} \operatorname{tg}(\beta)^{-1} & 1 & 0 & 0 \end{matrix} \right\|^T; \quad \cos \varphi_{\max} = \sqrt{\frac{L_m^4}{L_m^4 + 4L_r L_s (L_r L_s - L_m^2)}},$$

$$Q(\beta) = \frac{3}{2} \omega_s \psi_i \sin \varphi(\beta); \quad m = p \frac{3}{2} (\Psi_d l_q - \Psi_q l_d). \quad (15)$$

где $\mathbf{E}_s, \mathbf{E}_r$ – матрицы, разделяющие процессы в статоре и роторе; \mathbf{B} – матрица, связывающая регулируемые переменные и выходные величины (15). В качестве регулируемых переменных выбран вектор потокосцеплений Ψ , такой выбор позволяет достаточно просто учесть насыщение магнитной системы двигателя. Нелинейность характеристики намагничивания (14) учитывается путем вычисления отношения потокосцепления в воздушном зазоре Ψ_0 к току намагничивания I_0 . Применяя метод обратной модели с линеаризацией по выходу, левая и правая часть основного уравнения умножена на скалярную величину потокосцепления ротора и дополнена до представления полной производной, обеспечивая переход к системе новых регулируемых переменных $\Psi \Psi_r$.

Вектор управления $\mathbf{U}[\psi_i(t)]$ организован таким образом, чтобы в совокупности с обратными связями по регулируемым переменным, в области Ω допустимых управлений u_i пространства \mathbf{R}^n , он формировал задание U_{ref} основной выходной величины системы и задание энергетических свойств посредством элементов матрицы \mathbf{B}_{ref} :

$$\frac{d(\Psi \Psi_r)}{dt} = \mathbf{V}\Psi \Psi_r + \Psi \frac{d\Psi_r}{dt} + \mathbf{U}[\psi_i(t)]\Psi_r,$$

$$\mathbf{U}[\psi_i(t)] = -\mathbf{E}_s \mathbf{K} \Psi - \mathbf{E}_s \left(\frac{R_r L_m}{L_r L_s - L_m^2} \Psi_d - \frac{R_r L_s}{L_r L_s - L_m^2} \Psi_r \right) \Psi_r^{-1} \Psi + \mathbf{B}_{ref} \frac{U_{ref}}{T_z} \Psi_r^{-1}, \quad (16)$$

где \mathbf{K} - матрица коэффициентов регулятора (16) размерностью соответствующей размерности матрицы \mathbf{V} ; T_z^{-1} - параметр, ограничивает полосу пропускания регулируемых переменных. На основании формализации требований к управлению, используя явные связи показателей качества основных свойств работы асинхронной машины, определены аргументы, позволяющие сформировать задание основных свойств электропривода, отвечающие технологическим требованиям. В результате состояние системы, при ограниченном по модулю u_{ogr} допустимом управлении и заданном ограничении полосы пропускания замкнутых контуров регулируемых переменных, представлено в зависимости от элементов матрицы \mathbf{B}_{ref} , задающих желаемые энергетические свойства электропривода, элементов матрицы \mathbf{K} регулятора и сигнала задания электромагнитного момента U_{ref} :

$$\frac{d(\Psi \Psi_r)}{dt} = \mathbf{F}, \text{ где } \mathbf{F} = (\mathbf{V} - \mathbf{K})(\Psi \Psi_r)_r + \mathbf{B}_{ref} \frac{U_{ref}}{T_z}, \quad (17)$$

$$\left\{ \sum_{i=1}^n u_i^2 \leq u_{ogr}^2 \right\} \subset \Omega; i = \overline{1, n}; \mathbf{U}[\psi_i(t)] \subset \Omega \quad \forall t \in [t_0, t_1] \quad \Omega \subset \mathbf{R}^n; (\Psi \Psi_r) \subset \mathbf{R}^n,$$

$$\Psi(0) = 0; \mathbf{B}_{ref} = \frac{2}{3p} \frac{(L_s L_r - L_m^2)}{L_m} \left\| \operatorname{tg}(\beta_{ref})^{-1} \quad 1 \quad 0 \quad 0 \right\|^T; \beta_{ref} = \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{L_r L_s - L_m^2}{L_r L_s}},$$

$$T = \int_{t_0}^{t_1} 1 dt \rightarrow \min; Q(\beta) = \min; m = p \frac{3}{2} \frac{L_m}{L_r L_s - L_m^2} \Psi_r \Psi_q,$$

где T - функционал качества; $Q(\beta)$ - реактивная мощность; m - электромагнитный момент; \mathbf{B}_{ref} - матрица корректора энергетических характеристик, формирующая задание на минимизацию реактивной мощности Q посредством аргумента β_{ref} , функционально связанного с углом φ . Следует определить элементы матрицы \mathbf{K} регулятора многомерного управления, при котором состояние асинхронной машины изменится за минимальное время.

Для этой цели, используя метод Лагранжа в понтрягинской форме, установлена связь (18) оптимального управления, системы регулируемых переменных и решений сопряженной системы посредством гамильтониана быстрогодействия:

$$H = \mathbf{S}^T \mathbf{F}, \mathbf{S} = \|s_1 \quad s_2 \quad s_3 \quad s_4\|^T, \quad (18)$$

где составляющие (19) вектора \mathbf{S} сопряженной системы:

$$\frac{d\mathbf{S}}{dt} = - \frac{\partial H}{\partial (\Psi_r \Psi^T)} = (-\mathbf{V} + \mathbf{K})^T \mathbf{S}, \quad (19)$$

имеют достаточно сложную зависимость во времени:

$$\mathbf{S}(t) = e^{(-\mathbf{V} + \mathbf{K})^T t} \mathbf{S}(0),$$

где $\mathbf{S}(0)$ - значение вектора сопряженной системы в начальный момент времени. Определены условия стационарности:

$$\frac{\partial H}{\partial U_{ref}} = 0; \quad \frac{\partial H}{\partial U_{ref}} = \mathbf{S}^T \frac{\mathbf{B}_{ref}}{T_z} = \frac{s_1 b_d + s_2 b_q}{T_z}. \quad (20)$$

Основным требованием условий (20) является пропорциональное изменение составляющих вектора сопряженной системы s_1 и s_2 . Эти требования могут быть выполнены при определенном выборе (19) элементов матрицы \mathbf{K} регулятора:

$$\mathbf{V} - \mathbf{K} = \mathbf{A}; \quad \mathbf{A} = 2\mathbf{E}_r \mathbf{V} - \mathbf{E}_s T_z^{-1}, \quad (21)$$

где матрица \mathbf{A} определяет желаемые динамические свойства системы (19). В результате получено решение сопряженной системы:

$$\mathbf{S}(t) = e^{\frac{t}{T_z}} \mathbf{S}(0); \quad \mathbf{S}(0) = \|s_0 \quad s_0 \quad 0 \quad 0\|^T, \quad \text{где } s_0 = \left[\frac{3}{2} p \frac{U_{ref}}{T_z} (b_d + b_q) \right]^{-1}.$$

Определенный выбор элементов матрицы \mathbf{K} регулятора влияет и на решение основной системы уравнений:

$$\Psi \Psi_r(t) = e^{At} \Psi \Psi_r(0) + \int_{t_0}^t e^{A(t-\tau)} \mathbf{B} \frac{U_{ref}}{T_z} d\tau, \quad (22)$$

которое удалось получить в аналитическом виде для токов и потокосцеплений. На основании (22), при начальных условиях равных нулю, получено решение (23) для электромагнитного момента:

$$m = U_{ref} \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{T_z}\right) \right]. \quad (23)$$

Выполненная проверка позволяет утверждать, что решение (22) при начальных условиях равных нулю, отвечает максимуму гамильтониана. Сделан сравнительный анализ динамических свойств и энергетической эффективности работы электропривода в условиях минимизации реактивной мощности с управлением, обеспечивающим формирование электромагнитного момента предварительно намагниченного асинхронного двигателя АИР100S4УЗ при стабилизации потокосцепления ротора. Рисунок 9 отображает зависимости $\eta(m)$, $\cos(\varphi)(m)$ и $U(m)$ от величины электромагнитного момента при номинальной угловой скорости а) в условиях стабилизации потокосцепления ротора $\Psi_{rd} = 0.88$ [Вб]. Величина потокосцепления ротора выбрана исходя от величины модуля вектора напряжения $u_{ogr} = 311$ [В] номинального режима. Ток намагничивания составляет 30% тока номинальной величины. Представленные характеристики иллюстрируют значительное снижение КПД и $\cos\varphi$ при малой и большой нагрузке.

Характеристики б) получены в условиях минимизации реактивной мощности без предварительного намагничивания асинхронной машины. Величина $\cos(\varphi)_{max} = \max$ и КПД соответствуют номинальным значениям. Наблюдается увеличение потокосцепления ротора $\Psi_{rd} = 0.88$ [Вб], при нагрузке $1.5 m_n$. В силу меньшего

падения напряжения на активных сопротивлениях обмоток статора, увеличение напряжения на обмотках двигателя при номинальной нагрузке не наблюдается. При нагрузке $2 m_n$, потокосцепление ротора $\Psi_{rd} = 1.0$ [Вб]. Во всем диапазоне нагрузок изменения энергетических характеристик, при больших и малых нагрузках, не отмечено. За счет отсутствия предварительного намагничивания, интегральная оценка КПД работы электропривода улучшена в переходных режимах на 5-6 %.

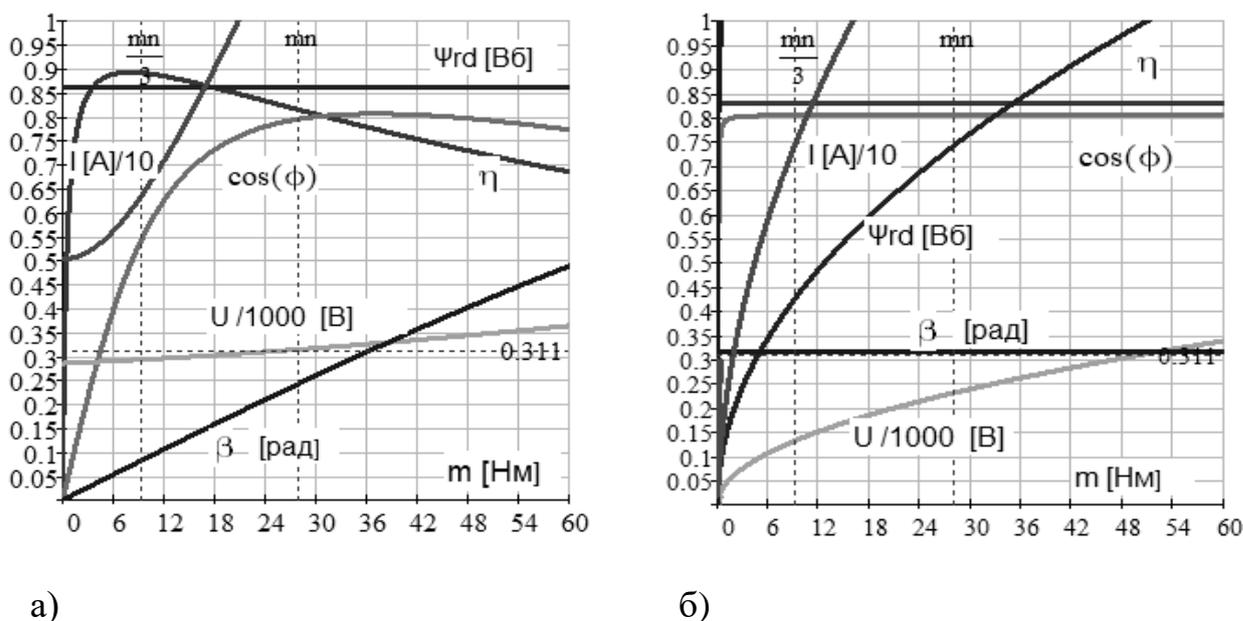


Рисунок 9 – Зависимость $\eta(m)$, $\cos(\varphi)(m)$ и $U(m)$ при линейном изменении электромагнитного момента двигателя АИР100S4У3 и номинальной скорости вращения ротора в условиях стабилизации потокосцепления (а) и минимизации реактивной мощности (б)

Структура многомерного управления (16) асинхронной машиной с короткозамкнутым ротором иллюстрирована на рисунке 10. Динамика процессов формирования электромагнитного момента не отличается от управления при стабилизации потокосцепления ротора. Используя решения Р. Т. Шрейнера, нелинейная связь тока намагничивания и потокосцепления в воздушном зазоре модели асинхронного двигателя представлена степенным многочленом.

Контур скорости синтезирован методом подчиненного регулирования. При формировании управления нелинейность характеристики намагничивания учитывается путем вычисления отношения потокосцепления в воздушном зазоре к току намагничивания. Результаты эксперимента показывают, при увеличении нагрузки до величины $3m_n$, наблюдается увеличение потокосцепления ротора до величины 1.2 [Вб], снижение взаимной индуктивности составляет 30%. Влияние насыщения магнитной системы двигателя на динамику электромагнитных процессов не отмечено. Процессы формирования электромагнитного момента без предварительного намагничивания двигателя иллюстрированы на рисунках 11 и 12.

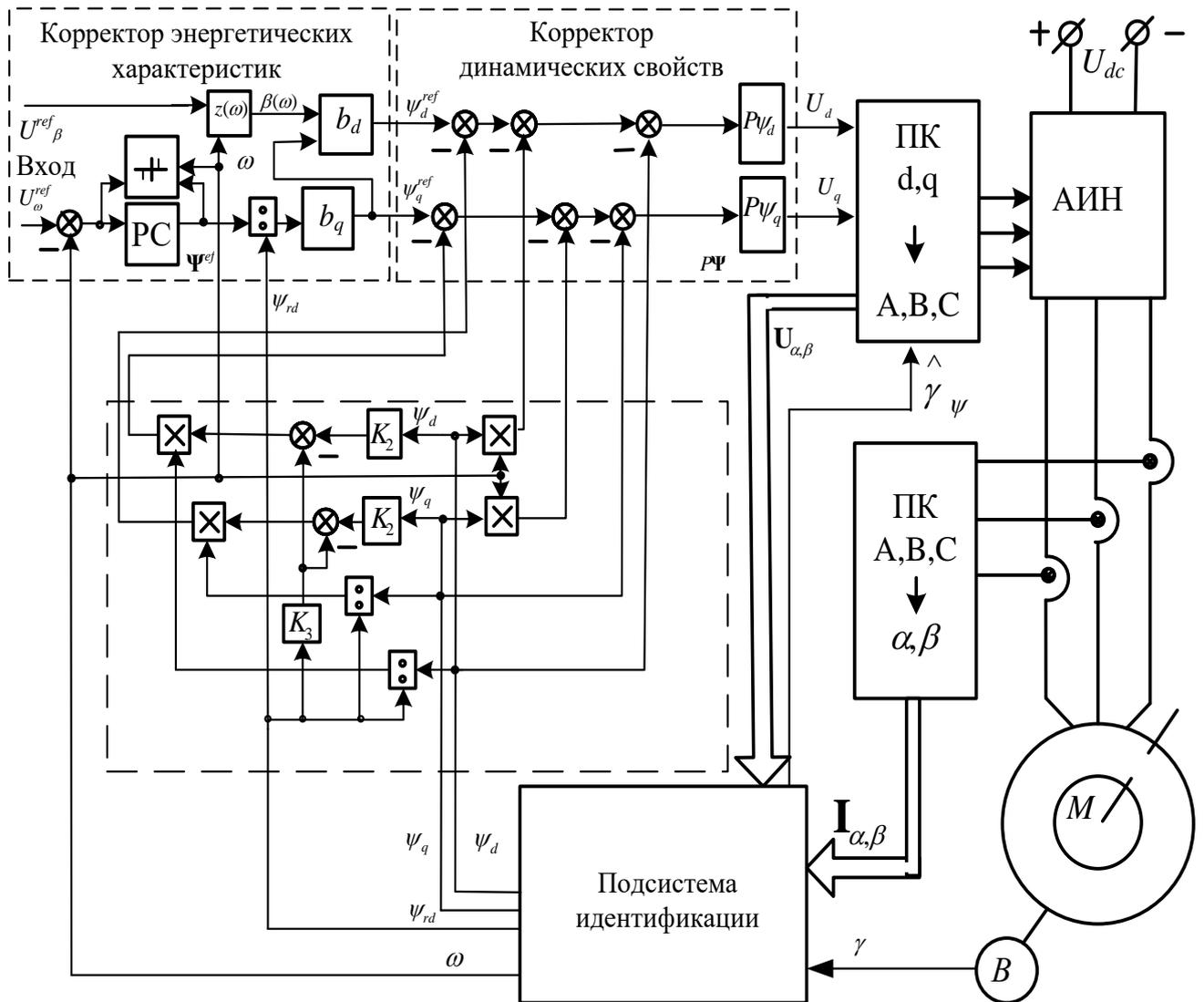


Рисунок 10 – Общая структура многомерного управления асинхронной машиной с короткозамкнутым ротором быстродействующего электропривода

При начальных условиях равных нулю в условиях ограничения модуля вектора напряжения 311 [В], быстрое изменение потокосцепления ротора достигается за счет форсирования тока намагничивания в 6 раз. При этом величина модуля тока статора не превышает $2.5I_n$, что отражено на рисунке 12.

В этой же главе рассмотрена стратегия формирования электромагнитного момента при одновременном регулировании энергетических свойств электропривода в функции скорости вращения ротора. Способ назван комбинированным управлением электроприводом. Для аналитического решения задачи комплексного подхода к синтезу многомерного управления, отношение потокосцепления в воздушном зазоре к току намагничивания определено постоянной величиной.

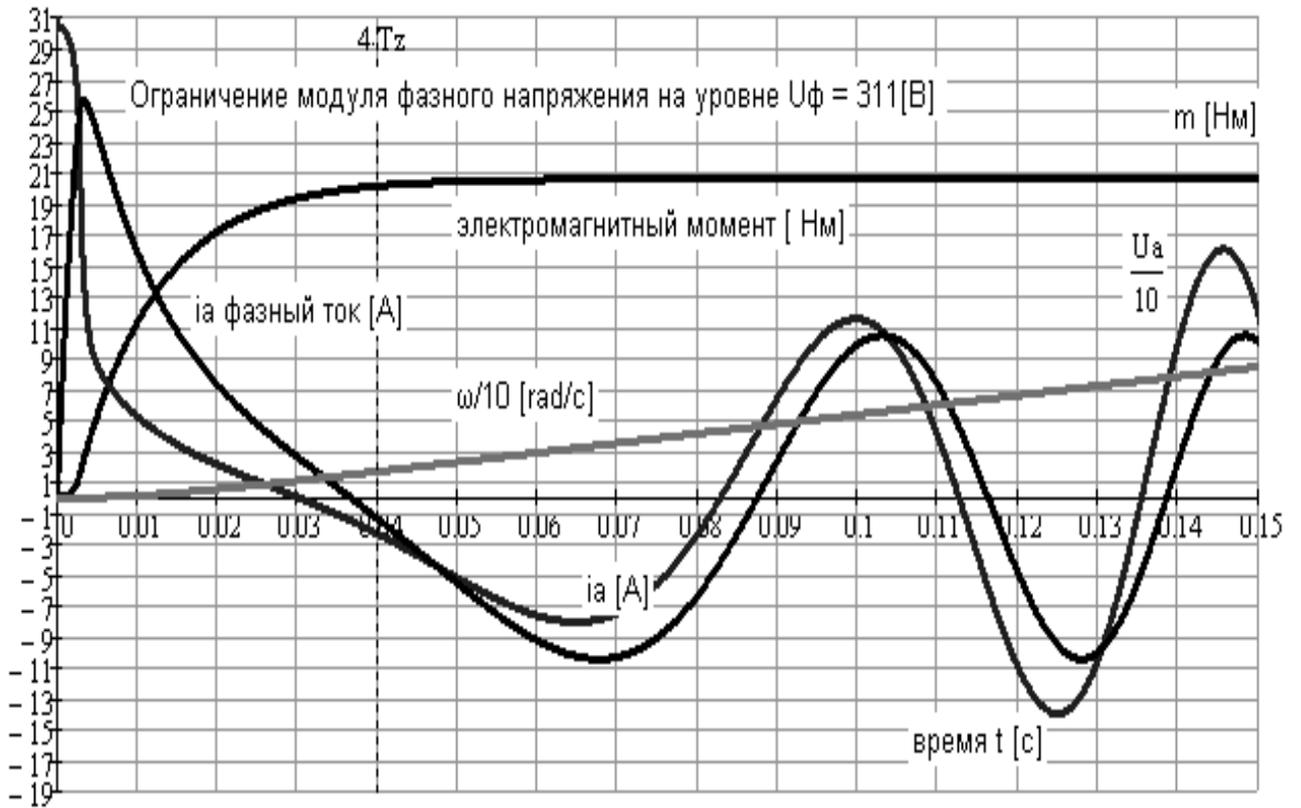


Рисунок 11 – Фазные значения тока и напряжения управления при минимизации реактивной мощности без предварительного намагничивания двигателя АИР100S4У3 с учетом нелинейности характеристики намагничивания

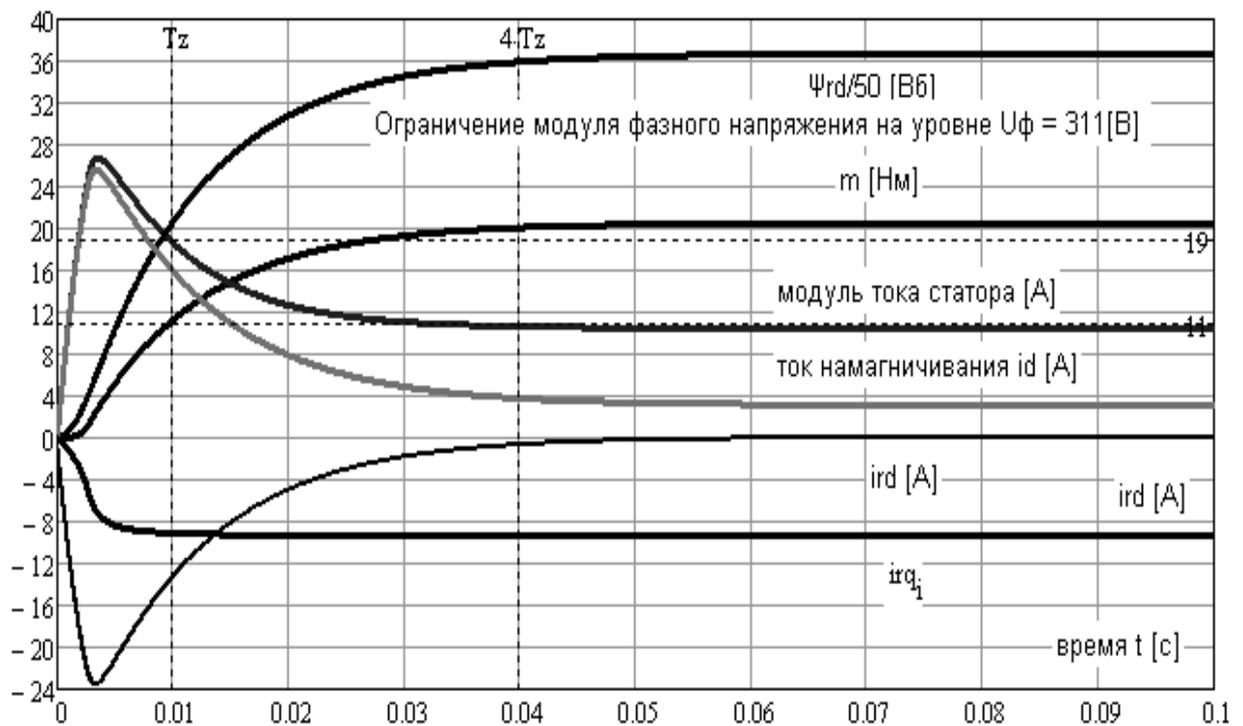


Рисунок 12 – Процессы формирования электромагнитного момента в условиях минимизации реактивной мощности без предварительного намагничивания двигателя АИР100S4У3 с учетом нелинейности характеристики намагничивания

На основании установленного правила многокритериальной оптимизации предлагаемое управление обеспечивает формирование электромагнитного момента на низкой скорости вращения ротора при минимуме тепловых потерь. В силу малых значений ЭДС вращения, вся мощность источника питания направляется на изменение электромагнитного момента с заданным темпом. С ростом частоты вращения ротора осуществляется стабилизация коэффициента полезного действия *КПД* путем изменения положения векторов в функции скорости. При достижении наименьшей величины реактивной мощности, за счет дальнейшего роста скорости *КПД* увеличивается, обеспечивая экономичное управление асинхронной машиной. Ограничение полосы пропускания контуров регулируемых переменных задано параметром на уровне $1/T_z = 100[\text{с}^{-1}]$. Изменение электромагнитного момента носит апериодический характер. Ограничение тока статора выполнено путем ограничения задания электромагнитного момента и ограничения напряжения источника питания, функционально связанного с модулем тока статора.

При некотором усложнении структуры комплексного подхода многомерного управления асинхронной машиной, интегральная оценка энергетической эффективности работы электропривода улучшается на 6 - 8 % относительно управления при стабилизации потокосцепления ротора.

Седьмая глава посвящена экспериментальным исследованиям структур комплексного подхода к синтезу многомерного управления электроприводом переменного тока различного типа. Рассмотрены результаты моделирования системы управления нелинейным многомерным объектом, подтверждающие теоретические положения первого научного положения, выносимое на защиту.

На рисунке 13 представлена классификация разработанных алгоритмов управления. Целью исследований работы асинхронного и синхронного электропривода является подтверждение полученных теоретических положений и апробирование структур комплексного подхода к синтезу многомерного управления машинами переменного тока различного типа быстродействующего электропривода. Проведены эксперименты, подтверждающие верность аналитических решений, доказывающих второе научное положение.

Эксперименты на физической установке подтвердили эффективность концепции комплексного подхода к синтезу многомерного управления электроприводом.

Приложения содержат материалы раздела электропривода государственного стандарта РФ, типовое решение задачи Лагранжа в понтрянгинской форме. Патенты и свидетельства. Математическую модель системы управления асинхронной машиной, учитывающую нелинейность характеристики намагничивания, результаты моделирования и документы, подтверждающие использование положений диссертационной работы.

Алгоритмы управления быстродействующим электроприводом сформированные методом последовательного синтеза

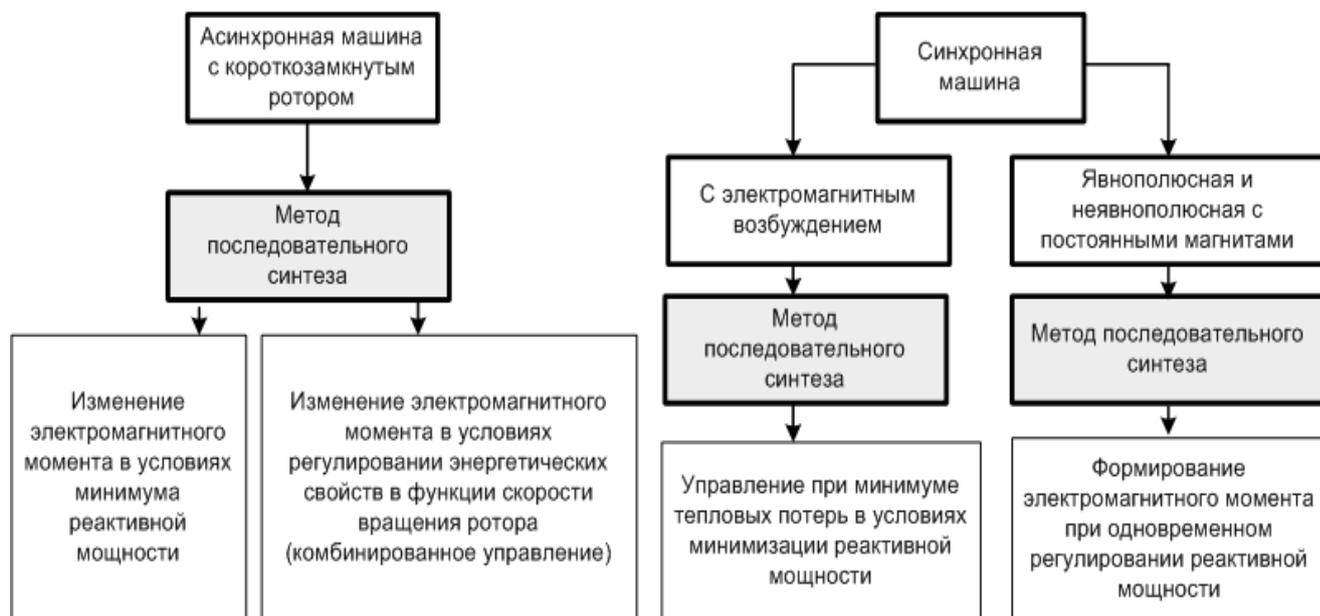


Рисунок 13 – Классификация алгоритмов, сформированных методом последовательного синтеза многомерного управления электроприводом

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В работе дано решение крупной научно-технической проблемы энергоэффективного управления быстродействующим электроприводом переменного тока. На основании выполненных исследований, автором предложена методология синтеза управления, обеспечивающего эффективное использование электрической машины и источника питания для реализации различных технологических задач в рамках установленных ограничений. Разработанные теоретические положения, объединенные общей концепцией комплексного подхода к синтезу многомерного управления электроприводом переменного тока, имеют важное теоретическое и практическое значение.

Перечень полученных научных положений и практических результатов:

1. Доказаны положения современной теории управления нелинейными многомерными объектами определенного класса, на основании которых формируется управление электрической машиной, обеспечивающее апериодический характер изменения электромагнитного момента за минимальное время в условиях одновременного регулирования энергетических свойств электропривода.
2. Показано, что изменение состояния электрической машины за минимальное время, при формировании выходных величин в условиях ограничения полосы пропускания внутренних контуров, должно осуществляться при пропорциональном изменении регулируемых переменных с одинаковым темпом.

3. На основании физических особенностей электрической машины установлены связи силовых и энергетических характеристик в зависимости от аргументов, определяющих положение векторов в системе вращающихся координат. В качестве характеристик выступают электромагнитный момент, энергия магнитного поля, тепловые потери и напряжение, подводимое к обмоткам двигателя. Показано влияние этих связей на процессы электромеханического преобразования энергии.
4. Используя метод Эйлера - Лагранжа установлены условия управления, при которых мощность, подводимая к обмоткам двигателя для изменения электромагнитного момента с заданным темпом, имеет минимальное значение.
5. Применяя функции энергетического состояния, установлена аналитическая зависимость показателей энергетической эффективности и интенсивности процессов преобразования энергии электрической машины.
6. Установлена в явном виде связь основных свойства работы электропривода с помощью четырех показателей качества, способных выступать в качестве ограничений при реализации желаемого соотношения энергетических и динамических свойств электропривода, задаваемого технологическими требованиями.
7. На основании явной связи основных свойства работы электропривода разработано правило выбора решений многокритериальной оптимизации электропривода переменного тока.
8. Разработан метод формализации требований к управлению, обеспечивающему эффективное использование электрической машины и источника питания, в зависимости от технологической задачи, учитывая потери в стали и насыщение магнитной системы двигателя.
9. Разработана методология комплексного подхода к синтезу многомерного управления, отличающегося способностью регулировать основные свойства электропривода, при апериодическом характере формирования электромагнитного момента.
10. Получена динамическая модель структуры многомерного управления электроприводом переменного тока, позволяющая определить мгновенные значения всех компонент вектора состояния и значения основных показателей качества в любой момент времени переходного процесса.
11. Разработан метод интегральной оценки эффективности различных законов управления электрической машиной в переходных режимах. Используя функции энергетического состояния, метод позволяет на стадии проектирования сопоставить в аналитическом виде основные свойства электропривода переменного тока различного типа при различных алгоритмах управления.
12. Предложено управление синхронной машиной электромагнитного возбуждения без предварительного намагничивания, отличающееся апериодическим характером изменения электромагнитного момента при минимизации тепловых потерь в условиях минимума реактивной мощности. Время формирования электромагнитного момента относительно системы приведенной к одномерному виду уменьшено в два раза. Интегральная оценка КПД за время переходного процесса улучшена на 7 - 8%.

13. Предложено управление явнополюсной и неявнополюсной синхронной машиной с возбуждением от постоянных магнитов, отличающееся формированием электромагнитного момента при минимуме реактивной мощности. Управление позволяет в номинальных режимах снизить величину требуемого напряжения на 20%, что позволяет на 20% расширить диапазон регулирования скорости и, путем дополнительного форсирования управления, повысить темп изменения электромагнитного момента.

14. Предложено управление асинхронной машиной с короткозамкнутым ротором, отличающееся отсутствием предварительного намагничивания двигателя при апериодическом характере формирования электромагнитного момента и одновременном регулировании реактивной мощности до своего минимального значения. Относительно управления при стабилизации потокосцепления, при одинаковом быстродействии, интегральная оценка *КПД* за время переходного процесса улучшена на 5 - 6%;

15. Предложена структура комбинированного управления асинхронной машиной с короткозамкнутым ротором, обеспечивающего изменение электромагнитного момента при одновременном регулировании энергетических свойств электропривода в функции скорости вращения ротора. При некотором усложнении структуры управления и одинаковом быстродействии с системой управляемой при стабилизации потокосцепления ротора, интегральная оценка *КПД* улучшена на 6 – 8% за время переходного процесса.

16. Разработанные теоретические положения в совокупности с практическими результатами создают объективные предпосылки для внедрения в практику электроприводов нового поколения, позволяющих увеличить производительность технологических процессов при снижении энергетических затрат.

Областью применения разработанных алгоритмов управления могут быть электропривода металлургической, металлообрабатывающей промышленности, электропривода подвижного состава железнодорожного транспорта, где к технологическим процессам предъявляются высокие динамические и энергетические требования в условиях существенного изменения нагрузки.

Представленные исследования и научные положения, связанные единой целью разработанной концепции, рассматриваются как решение научной проблемы имеющей важное народно - хозяйственное значение, отвечающее актуальной проблеме современности - эффективности управления и ресурсосбережения.

Решение таких задач путем оптимизации управления относится к приоритетным направлениям развития науки, определенным указом президента РФ от 07.07.2011 N 899 «Об утверждении приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в Российской Федерации и перечня критических технологий Российской Федерации».

Направление дальнейших исследований.

Дальнейшие исследования предполагают разработку устройств идентификации взаимной индуктивности двигателя при насыщении его магнитной системы, разработку простых устройств наблюдения для реализации многомерного управ-

ления электроприводом различного типа без датчика положения на валу электрической машины.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Публикации в изданиях входящих в международные реферативные базы данных и системы цитирования

- 1 Simakov, G. M. Energy – efficient control of synchronous machine / Yu. P. Filushov, G.M. Simakov // 12th International conference on actual problems of electronic instrument engineering. APEIE - 2014. IEEE Catalog Number CFP14471 - PRT, Volume1, pp. 837 – 841.
- 2 Bochencov, B. The optimization of the work of the electric drives alternating current on vector criterion quality// Yu. Filushov, B. Bochencov / IFOST 2008, Mechatronics and Automation, IEEE. 978– 1– 4244– 2319– 4/08/2008, Vol. 694. pp. 406 – 408.
- 3 Bochencov, B. Analysis of control laws related to rapid electric drives of alternating current / Yu. Filushov, B. Bochencov // ISSN 1068– 3712, Russian Electrical Engineering, 2009, Vol. 80, №. 4, pp. 194 – 199.
- 4 Bochencov, B. Alternating current drive control with the optimum combination of energetic properties and voltage efficiency / Yu. Filushov, B. Bochencov // ISSN 1068-3712, Russian Electrical Engineering, 2009, Vol. 80, №. 7, pp. 365 – 370.
- 5 Simakov, G. M. Management of a multichannel object / Yu. P. Filushov, G.M. Simakov // EEM December 2 – 6, 2014. Electrical engineering. Energy mechanical engineering. International scientific conference of young scientists. In 3 sections, section1, 254 – 2, 2014, Vol. 463, pp. 190 – 198.
- 6 Simakov, G. M. Multi - channel controlled object / G. M. Simakov, Yu. P. Filushov, I. I. Skokova //Applied Mechanics and Materials. 2015, Vol. 698, pp. 77 – 82.
- 7 Filushov, Yu. P. The formation of energy – efficient control of a high – speed AC electric drive // Yu. P. Filushov, G. M. Simakov, V. Yu. Filushov / IFOST 2016, Mechatronics and Automation, IEEE. 2016, Vol. 721, pp. 324 – 329.
- 8 Simakov, G. M. Combined Control of an Asynchronous Machine with Squirrel - Cage Rotor //Yu. P. Filushov, G. M. Simakov, V. Yu. Filushov/13th International Scientific – Technical Conference APEIE – 39281 / IEEE Catalog Number: CFP16471 – PRT, 2016, Vol.403, pp. 175 – 179.
- 9 Simakov, G. M. Asynchronous electric drive control without pre – magnetization / G. M. Simakov, V. Yu. Filushov, Yu. P. Filushov //18th International conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices. 2017. Vol. 742, pp. 525 – 528.

Публикации в изданиях из перечня ВАК РФ

- 10 Бочонков, Б. М. Решение задачи предельного и качественного управления в электроприводах переменного тока / Б. М. Бочонков, Ю. П. Филушов // Электротехника. – 2006. – № 11. – С.44 – 52.

- 11 Бочонков, Б. М. Алгоритм управления, обеспечивающий желаемое сочетание энергетических и динамических свойств электропривода переменного тока / Б. М. Бочонков, Ю. П. Филюшов // Электротехника. – 2006. – № 11. – С. 53 – 61.
- 12 Бочонков, Б. М. Оптимизация электропривода переменного тока по векторному критерию качества / Б. М. Бочонков, Ю. П. Филюшов // Электричество. – 2007. – №8. – С. 13 – 17.
- 13 Филюшов, Ю. П. Оптимальное по быстродействию управление машиной переменного тока / Ю. П. Филюшов // Электричество. – 2011. – № 2. – С. 46 – 51.
- 14 Филюшов, Ю. П. Оптимизация электромагнитных процессов в асинхронной машине с короткозамкнутым ротором / Ю. П. Филюшов // Электричество. – 2011. – №5. – С. 42 – 47.
- 15 Филюшов, Ю. П. Оптимальное управление тяговым электроприводом / Ю. П. Филюшов // Вестник транспорта Поволжья. – 2011. – № 5(29). – С. 66 – 74.
- 16 Филюшов, Ю. П. Оптимизация электромагнитных процессов в синхронной машине / Ю. П. Филюшов, В. Ю. Филюшов // Электричество. – 2011. – № 8. – С. 57 – 62.
- 17 Филюшов, Ю. П. Энергоэффективное управление машиной переменного тока / Ю. П. Филюшов, П. В. Зонов // Ползуновский вестник. – 2011. – № 2/1. – С. 45 – 51.
- 18 Филюшов, Ю. П. Многокритериальная оптимизация работы тягового электропривода переменного тока / Ю. П. Филюшов // Вестник транспорта Поволжья – 2011. – № 6 (30). – С.36 – 43.
- 19 Филюшов, Ю. П. Метод оптимального синтеза управляющих воздействий машины переменного тока / Ю. П. Филюшов // Электротехника. – 2012. – №8. – С.28 – 34.
- 20 Филюшов, Ю. П. Управления синхронной машиной при минимизации тепловых потерь в условиях минимума реактивной мощности / Ю. П. Филюшов, В. Ю. Филюшов // Электротехника. – 2013. – № 12. – С. 57 – 63.
- 21 Филюшов, Ю. П. Состояние и оценка качества работы электропривода переменного тока / Ю. П. Филюшов // Силовая электроника. – 2013. – № 1. – С 36 – 39.
- 22 Филюшов, Ю. П. Способ оптимального управления электрической машиной / Ю.П. Филюшов // Силовая электроника. – 2013. – № 2. – С. 54 – 58.
- 23 Филюшов, Ю. П. Управления асинхронной машиной в условиях минимума реактивной мощности / Ю. П. Филюшов, В. Ю. Филюшов // Электротехника. – 2014. – № 2. – С. 15 – 20.
- 24 Филюшов, Ю. П. Энергоэффективное управление асинхронной машиной / Ю. П. Филюшов // Электротехника. – 2014. – № 6. – С.57 – 65.
- 25 Симаков, Г. М. Метод синтеза управления многоканальным объектом / Г. М. Симаков, Ю. П. Филюшов // Электричество. – 2015. – № 7. – С. 56 – 61.
- 26 Симаков, Г. М. Управление асинхронной машиной тягового электропривода / Г.М. Симаков, Ю. П. Филюшов // Транспорт: наука, техника, управление. – 2015. – № 1. – С. 36 – 39.

- 27 Симаков, Г. М. Управление асинхронной машиной тягового электропривода в условиях минимизации реактивной мощности / Г. М. Симаков, Ю. П. Филюшов // Вестник транспорта Поволжья. – № 2 (42). – 2015. – С. 24 – 31.
- 28 Филюшов, Ю. П. Анализ энергетических характеристик работы электропривода переменного тока в переходных режимах / Г. М. Симаков, Ю. П. Филюшов // Электротехника. – 2016. – № 12. – С. 34 – 37.
- 29 Симаков, Г. М. Сравнительная оценка работы асинхронной машины в условиях минимизации реактивной мощности / Г. М. Симаков, Ю. П. Филюшов // Электротехника. – 2017. – № 2. – С. 8 – 15.
- 30 Симаков, Г. М. Сравнительные оценки энергетических свойств работы асинхронного электропривода в переходных процессах / Г. М. Симаков, Ю. П. Филюшов // Электротехника. – 2017. – № 5. – С. 60 – 66.
- 31 Воевода, А. А. Синтез алгоритма управления многоканальным объектом / А. А. Воевода, Ю. П. Филюшов // Вестник РГРТУ. 2017. – № 61. – С. 88 – 95.

Публикации результатов интеллектуальной деятельности

- 32 Патент: №2092967 РФ, Н 02 Р 21 / 00. Электропривод с синхронным двигателем / Ю. П. Филюшов. Заявка № 95113680. Подано 27. 07. 95. Опубликовано 10. 10. 97. Билл. изобрет. – 1997. – № 28. – 6с.: ил.
- 33 Хамитов, Р. Н. Программа «Модель асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, учитывающая нелинейность характеристики намагничивания». – Свидетельство о регистрации электронного ресурса: № 22296 от 01 декабря 2016. / Р. Н. Хамитов, Ю. П. Филюшов. – М.: ОФЭРНИО, 2016.
- 34 Хамитов, Р. Н. Программа «Модель системы управления синхронным двигателем с постоянными магнитами, учитывающая нелинейность характеристики намагничивания». Свидетельство о регистрации электронного ресурса: № 22381 от 14 декабря 2016 / Р. Н. Хамитов, Ю. П. Филюшов. – М.: ОФЭРНИО, 2016.
- 35 Хамитов, Р. Н. Программа «Модель системы управления асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором, учитывающая нелинейность характеристики намагничивания». Свидетельство о регистрации электронного ресурса: № 22382 от 14 декабря 2016 / Р. Н. Хамитов, Ю. П. Филюшов. – М.: ОФЭРНИО, 2016.

Публикации в прочих рецензируемых научных изданиях

- 36 Симаков, Г. М. Энергоэффективное управление электроприводом переменного тока / Г. М. Симаков, Ю. П. Филюшов. – Новосибирск: Изд. – во НГТУ, 2016. – 245 с.
- 37 Бочонков, Б. М. Условия рационального управления динамичным электроприводом при ограничении напряжения. / Б. М. Бочонков, Ю. П. Филюшов // Автоматизированные электромеханические системы: Сб. науч. трудов. – Новосибирск: Изд. – во НГТУ, 1999. – С. 24 – 31.

- 38 Бочонков, Б. М. Условия рационального преобразования энергии в электрической машине при ограниченном значении напряжения статора. Автоматизированные электромеханические системы. Коллективная монография / Б. М. Бочонков, Ю. П. Филюшов; под ред. В. Н. Аносова. – Новосибирск: НГТУ, 2004. – С.143 – 149.
- 39 Филюшов, Ю. П. Система управления синхронным двигателем с электромагнитным возбуждением, минимизирующая потери энергии / Ю. П. Филюшов // Автоматизированные электромеханические системы: Сб. науч. трудов. – Новосибирск: Изд. – во НГТУ. – 1994. – С. 54 – 64.
- 40 Филюшов, Ю. П. Управление синхронной машиной с электромагнитным возбуждением в условиях минимизации реактивной мощности / Ю. П. Филюшов // Автоматизированные электромеханические системы: Сб. науч. трудов. – Новосибирск: Изд. – во НГТУ. - 1996. – С. 31 – 34.
- 41 Бочонков, Б. М. Энергооптимальные алгоритмы векторного управления электроприводом с синхронным двигателем / Б. М. Бочонков, Ю. П. Филюшов // Автоматизированные электромеханические системы: Сб. науч. трудов. – Новосибирск: Изд. – во НГТУ. – 1997. – С. 49 – 64.
- 42 Филюшов, Ю. П. Синтез системы управления синхронным двигателем с непосредственным регулированием фазных напряжений / Ю. П. Филюшов // Автоматизированные электромеханические системы: Сб. науч. Трудов. – Новосибирск: Изд. – во НГТУ. – 1997. – С. 84 – 91.
- 43 Филюшов, Ю. П. Управление синхронной машиной с постоянными магнитами при минимуме реактивной мощности / Ю. П. Филюшов // Автоматизированные электромеханические системы: Сб. науч. трудов. – Новосибирск: Изд. – во НГТУ. – 1998. – С. 31 – 35.
- 44 Филюшов, Ю. П. Оценка эффективности процесса преобразования энергии в двигателе в зависимости от применяемого алгоритма управления /Ю. П. Филюшов // Автоматизированные электромеханические системы: Сб. науч. трудов. – Новосибирск: Изд. – во НГТУ. – 1998. – С. 93 – 98.
- 45 Симаков, Г. М. Моделирование электромеханических процессов: учеб. пособие для студ. вузов / Г. М. Симаков, Ю. П. Филюшов. – Новосибирск: ИЦ Золотой колос, 2014. – 131с.

Публикации по итогам конференций

- 46 Филюшов, Ю. П. Синтез структуры управления синхронным двигателем в системе его физических переменных, обеспечивающий минимум реактивных потерь / Ю. П. Филюшов // Труды всероссийской научно – технической конференции по повышению эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири. – Иркутск, 1994. – С. 5 – 7.
- 47 Филюшов, Ю. П. Линеаризация канала управления моментом синхронной машины, синтезируемого в системе физических координат, обеспечивающего минимум реактивных потерь / Ю. П. Филюшов // Труды десятой научно

технической конференции «Электроприводы переменного тока». – Екатеринбург, 1995. – С. 148 – 151.

48 Бочонков, Б. М. Решение задачи предельного и качественного управления в электроприводах переменного тока / Б. М. Бочонков, Ю. П. Филюшов // Труды второй научно – технической конференции с международным участием. – Новосибирск.: Изд. – во НГТУ, 2005. – 244 с.

49 Бочонков, Б. М. Предельно быстрое управление электрической машиной переменного тока. Электротехника, электромеханика и электротехнологии ЭЭЭ – 2009: материалы четвертой научно – технической конференции с международным участием / Б. М. Бочонков, Ю. П. Филюшов; под ред. В. В. Панкратова. – Новосибирск: Изд. – во НГТУ, 2009. – 116 с.

50 Симаков, Г. М. Управление многоканальным объектом / Г. М. Симаков, Ю. П. Филюшов // Первая международная научно конференция молодых ученых «Электротехника, энергетика, машиностроение». – Новосибирск, 2014. – С. 36 – 40.

51 Симаков, Г. М. Энергоэффективное управление синхронной машиной / Ю. П. Филюшов, Г. М. Симаков // АПЭП – 2014. Двенадцатая международная научно техническая конференция «Актуальные проблемы электронного приборостроения». – Новосибирск, 2014. – С. 38 – 42.

52 Симаков, Г. М. Анализ энергетических характеристик электропривода переменного тока в переходных процессах / Г. М. Симаков, Ю. П. Филюшов // Первая Всероссийская научно – практическая конференция Энергетика и энергосбережение: теория и практика». – Кемерово, 2015. – С. 34 – 37.

53 Симаков, Г. М. Метод последовательного синтеза энергетически эффективного управления электроприводом переменного тока / Г. М. Симаков, Ю. П. Филюшов // 16 научно – техническая конференция ЭППТ 2015 «Электроприводы переменного тока». – Екатеринбург, 2015. – С 123 – 126.

54 Симаков, Г. М. Анализ быстродействия многоканального объекта управления / Г. М. Симаков, Ю. П. Филюшов // Вторая Всероссийская научно – практическая конференция Энергетика и энергосбережение: теория и практика». – Новосибирск, 2015. – С. 42 – 45.

55 Симаков, Г. М. Связь функций энергетического состояния с процессами электромеханического преобразования энергии / Г. М. Симаков, Ю. П. Филюшов // Вторая Всероссийская научно – практическая конференция Энергетика и энергосбережение: теория и практика // Грант № 15 – 08 – 20939 Российского фонда фундаментальных исследований. – Кемерово, 2015. – С. 127 – 130.

56 Симаков, Г. М. Формирование энергетически эффективных законов управления быстродействующим электроприводом переменного тока / Г. М. Симаков, Ю. П. Филюшов, В. Ю. Филюшов // Седьмая научно конференция молодых ученых «Электротехника, энергетика, машиностроение». – Новосибирск, 2015. – С. 58 – 62.

57 Филюшов, Ю. П. Новое решение для управления синхронной машиной с электромагнитным возбуждением быстродействующего электропривода / Г. М. Симаков, Ю. П. Филюшов // III Международная научно–практическая

конференция «Современные тенденции развития науки и производства». – Кемерово, 2016. – С. 174 – 177.

58 Симаков, Г. М. Энергоэффективное управление. Исследование энергоэффективного управления быстродействующим асинхронным электроприводом / М. Симаков, Ю. П. Филлюшов, В. Ю. Филлюшов // АЭП 2016. Девятая международная конференция по автоматизированному электроприводу. – Пермь, 2016. – С. 152 – 168.

Работы [13 – 15, 18–22, 24, 32, 39 – 40, 42 – 44, 46– 47] выполнены автором единолично. В работах [1 –12, 16 – 17, 23, 25 – 31, 33 – 38, 41, 45, 48– 58], написанных в соавторстве, автору принадлежит 80% общего объема представленного материала, а именно, общая постановка проблем и задач исследований, обоснование математических моделей и методов решения.