На правах рукописи



Зайцев Никита Сергеевич

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ С ПЕРЕМЕННОЙ СТРУКТУРОЙ ДЛЯ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМОГО СИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

Специальность: 2.4.2 – «Электротехнические комплексы и системы»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новокузнецк – 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский государственный индустриальный университет».

Научный руководитель: **Кубарев Василий Анатольевич,**
кандидат технических наук, доцент.

Официальные оппоненты: **Михальченко Сергей Геннадьевич,**
доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Томский университет систем управления и радиоэлектроники» (г. Томск), кафедра промышленной электроники, профессор;

Кладиев Сергей Николаевич,
кандидат технических наук, доцент, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (г. Томск), отделение электроэнергетики и электротехники», доцент.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева» (г. Кемерово).

Защита диссертации состоится 18 февраля 2027 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.347.07 при федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» по адресу: 630073, г. Новосибирск, пр-т К. Маркса, 20, корпус I, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомится в библиотеке Новосибирского государственного технического университета и на сайте организации: www.nstu.ru.

Автореферат разослан «___» ноября 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.347.07,
канд. техн. наук, доцент Максим Александрович Дыбко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Актуальность темы. Частотно-регулируемый (ЧР) электропривод (ЭП), электромеханическую основу которого составляет синхронный электродвигатель (СД) классической конструкции – с обмоткой возбуждения (ОВ) на роторе, начиная с конца XX века получает широкое распространение в качестве приводной силы различных ответственных агрегатов и установок, для которых характерно колоссальное потребление мощности (единицы и десятки МВт). В общем случае можно утверждать, что электромеханические системы (ЭМС) с ЧР синхронной машиной являются одними из наиболее перспективных в плане применения в области ЭП большой мощности, в которой и по сей день в отечественной промышленности зачастую эксплуатируются в некоторой степени морально и технически устаревшие регулируемые ЭП постоянного тока. Указанные обстоятельства в полной мере справедливы в отношении ЭМС главной линии реверсивных и нереверсивных прокатных станов.

Перспективность и конкурентоспособность ЧР синхронного ЭП в качестве приводной силы валков крупных прокатных станов объясняется общеизвестными достоинствами, связанными с конструктивными особенностями применяемой машины, которых могут быть лишены асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором и двигатели постоянного тока с независимым возбуждением. Несмотря на отмеченное обстоятельство ЧР синхронный ЭП главных линий прокатных станов имеет свои недостатки, одним из которых является сложность построения систем автоматического регулирования (САР), за счет работы которых достигаются показатели качества регулирования, удовлетворяющие требованиям, предъявляемым к главному электроприводу прокатных станов. Трудности построения таких САР могут быть связаны как с моделированием самой синхронной машины с электромагнитным (ЭМ) возбуждением, выступающей в качестве объекта управления (ОУ), так и с относительно низким уровнем проработанности вопросов создания таких САР в общедоступной научно-технической литературе. Сложность математического моделирования СД с ОВ обусловлена нелинейностью и многомерностью ОУ. В ряде случаев ситуацию также усугубляет необходимость учета эффекта насыщения магнитной системы, влияния вихревых токов в стали машины и т.д. Помимо этого, сложность модели ОУ напрямую зависит от количества замкнутых контуров, относящихся к ротору СД. Подобными контурами могут являться явные – контур демпферной обмотки (ДО) и реже контур компенсационной обмотки, и неявные – контуры вихревых токов. Наконец, выбор системы относительных единиц (о.е.), которую применяют при рассмотрении электромагнитных процессов, протекающих в различных режимах работы СД, также оказывает прямое влияние на трудность построения модели синхронного ЭП. В настоящий момент можно утверждать, что проблемам разработки и анализа моделей САР ЧР СД с дополнительными контурами на роторе уделяется крайне мало исследовательского внимания.

Большая часть отмеченных выше проблем актуальна для синхронного ЭП вращения валков прокатных станов. Работа с высокими ударными нагрузками, являющимися неотъемлемой частью технологического процесса прокатки металла, приводит к целому ряду негативных моментов: насыщению магнитной системы машины при моментах нагрузки кратно превышающих номинальный, качанию ротора, возникновению колебаний по координатам электромагнитного момента и тока статора, наличию чрезмерного динамического момента и др. Указанное обстоятельство и те или иные

проблемы, характерные для определенного ЭП прокатного стана, приводят к усложнению как самой конструкции синхронной машины, так и системы автоматического управления (САУ). Негативное влияние насыщения магнитной системы на эффективность и работоспособность ЭП может быть нивелировано с помощью определенных законов управления магнитным полем машины, колебания различных величин – путем введения в конструкцию СД демпферной обмотки и более сложной настройки регуляторов, входящих в контуры САУ; чрезмерный динамический момент – за счет учета упругих связей, возникающих между приводным двигателем и рабочим механизмом в модели САУ.

Выделив основные тезисы введения – перспективность применения и активное внедрение регулируемого СД в привод главной линии прокатных станов; относительно низкий уровень проработки вопросов построения и синтеза САУ синхронного ЭП; сложности, с которыми приходится сталкиваться при разработке и эксплуатации синхронного ЭП вращения валков прокатных станов, можно обосновать актуальность проведения исследований в области усовершенствования систем автоматического управления частотно-регулируемой синхронной машины, применяемой в качестве приводной установки валков черновых и чистовых клетей прокатных станов.

Степень научной разработанности темы исследования. Несмотря на ранее отмеченный факт, что проблемам построения САР синхронного ЭП присущ относительно низкий уровень теоретической проработки, можно отметить положительные тенденции, заключающиеся в том, что за последние два десятилетия наблюдается подъем исследовательского интереса в данной области. При выполнении настоящей работы целесообразно обращаться к научному опыту сразу по четырем направлениям:

– в области создания автоматизированных систем ЭП главных линий станов горячей прокатки;

– в области исследования статических и динамических режимов работы синхронной машины;

– в области управления синхронной машиной, работающей в двигательном режиме;

– в области создания частотно-регулируемого синхронного ЭП главных линий реверсивных прокатных станов.

Разработке автоматизированных систем ЭП прокатных станов посвящено большое количество трудов отечественных ученых. Большой вклад в теоретическую проработку вопросов, связанных с построением САР главных ЭП прокатных станов, внесли Слежановский О.В., Бычков В.П., Гарнов В.К., Афанасьев В.Д., Фотиев М.М., Островлянчик В.Ю. и др.

Ввиду того, что синхронная машина на протяжении большей части истории электрификации служит основным источником электроэнергии, анализу режимов ее работы посвящено огромное количество трудов. В то же время большинство из них ставит своей целью построение математических моделей, которые, в первую очередь, удобны для анализа переходных процессов синхронной машины, работающей в генераторном режиме. При моделировании ЭМ и электромеханических процессов, имеющих место при работе СД, в ходе диссертационного исследования использовались труды Harris M.R., Kundur P., Важнова А.И., Горева А.А., Меркурьева Г.В., Груздева И.А., Шхати Х.В.

Вопросам построения САУ частотно-регулируемого синхронного ЭП посвящен ряд трудов и статей отечественных и зарубежных исследователей. Наиболее полными, можно сказать фундаментальными, являются работы Вейнгера А.М. и Слежановского О.В., однако они датируются 80-ми годами XX века. Построению САР с подчиненным принципом регулирования координат ЧР СД с полеориентированным управлением (ПОУ) уделяется внимание в работах Wu B., Абакумова А.М., Виноградова А.Б., Соколовского Г.Г., Полякова В.Н. и Шрейнера Р.Т. Также можно выделить ряд статей, посвященных отдельным вопросам регулируемого синхронного ЭП за авторством Дацковского Л.Х. и Кузнецова И.С., Шрейнера Р.Т. и Полякова В.Н., Фираго Б.В. и Александровского С.В. и др.

Наконец, непосредственно автоматизированному синхронному ЭП главных линий реверсивных прокатных станов посвящены труды авторов: Гасиярова В.Р., Маклакова А.С., Мигунова Д.В., Мещерякова В.Н. и др.

В зарубежной научно-технической среде проработкой вопросов, связанных с регулируемым синхронным ЭП, как правило, занимаются крупные коммерческие фирмы, к примеру, Siemens (Германия), Toshiba (Япония), ABB (Швеция, Швейцария), General Electric (США) и ряд других компаний.

В качестве объекта исследования выступает частотно-регулируемый синхронный электропривод с полеориентированным управлением.

Предметом исследования является формирование целесообразного закона управления магнитным полем частотно-регулируемой синхронной машины в зависимости от нагрузки за счет системы автоматического управления.

Целью диссертационной работы является улучшение показателей качества переходных процессов синхронных электроприводов главных линий реверсивных прокатных станов в области высоких нагрузок путем построения системы автоматического управления с переменной структурой.

Основными задачами диссертационного исследования, за счет решения которых достигается поставленная цель, являются:

1. Проведение патентно-литературного обзора, позволяющего сформировать представление о современном состоянии систем автоматического управления автоматизированным частотно-регулируемым синхронным электроприводом вращения валков прокатных станов.

2. Описание методики, применяемой при математическом моделировании синхронной машины и ее системы автоматического управления.

3. Математическое моделирование объекта управления – синхронной машины – с учетом различных разного рода его особенностей и системы автоматического управления с переменной структурой.

4. Обоснование предлагаемого переменного закона управления магнитным полем синхронного двигателя в зависимости от прикладываемой нагрузки.

5. Имитационное моделирование типовой и усовершенствованной структур автоматизированного частотно-регулируемого синхронного электропривода.

6. Проведение сравнительного анализа показателей качества регулирования в обеих системах автоуправления на основе полученных имитационных моделей.

Научная новизна исследования определяется следующими положениями:

1. Получены функциональные зависимости, позволяющие связать различные координаты синхронного двигателя с электромагнитным моментом, потокосцеплением

статора (рассеяния) и углом между пространственными векторами потокосцепления статора (рассеяния) и током статора при произвольном режиме работы двигателя.

2. Предложен оригинальный способ управления магнитным полем частотно-регулируемого синхронного электродвигателя за счет формирования определенного угла между пространственными векторами потокосцепления и тока статора в зависимости от нагрузки, прикладываемой к валу машины.

3. Разработана математическая модель синхронного двигателя, которая может учитывать такие особенности, как наличие демпферной обмотке, отнесенной к ротору, и учет насыщения магнитной системы, удобная для синтеза с частотно-напряженческой системой автоматического управления.

4. Предложена методика синтеза системы автоуправления с переменной структурой для частотно-регулируемого синхронного двигателя, которая содержит четкие указания о настройке звеньев, отвечающих за организацию полеориентированного управления в данной системе автоматического регулирования – формирователей сигналов и блоков нелинейности.

5. Разработана математическая модель системы автоматического управления с переменной структурой для синхронной машины с полеориентированным управлением и осуществлена ее реализация в виртуальной среде с целью исследования динамических и статических характеристик электропривода при его работе в различных режимах.

Теоретическая значимость работы состоит в следующем: полученные функциональные зависимости, характеризующие установившийся режим работы нерегулируемого синхронного двигателя, могут быть использованы при рассмотрении электромагнитных процессов, составляющих статический режим работы машины; разработанная модель объекта управления может быть применена при синтезе с системами автоматического управления различной сложности.

Практическая значимость исследования заключается в том, что его результаты могут быть применены: при разработке или модернизации реальных систем автоматического управления синхронных электроприводов, которые, ввиду специфики области их применения, испытывают моменты перегрузки, приводящие к насыщению магнитной системы машины; при модернизации, настройке и наладке систем автоуправления находящихся в эксплуатации частотно-регулируемых электроприводов на основе синхронного двигателя классической конструкции, испытывающего в процессе своей работы частые перегрузки ударного характера; в учебном процессе в качестве лекционного материала, а также при проведении практических работ.

Помимо выше представленных пунктов практическая значимость исследования также определяется разработкой модернизированной системы автоматического управления, которая позволяет добиться лучших показателей качества регулирования переходных процессов синхронного электропривода, что подтверждается имитационным моделированием динамических режимов его работы.

Методы научного исследования включают в себя математическое моделирование и теоретическое описание, опирающееся на такие элементы математического анализа, как аналитические и числовые методы решения алгебраических и дифференциальных уравнений; преобразования Лапласа и Фурье; операторный метод и понятие комплексного переменного, а также на базовые положения теоретических основ электротехники и теории автоматического регулирования, среди которых стоит выделить понятия о пространственных (обобщенных) векторах, об обобщенной электрической

машине, о передаточной функции и операторе Лапласа, теорию электромагнитного поля и методы синтеза регуляторов многосвязных систем управления.

Для проверки адекватности разработанных математических моделей и оценки показателей качества регулирования, характерных для типовой и модернизированной САУ, применяется имитационное моделирование физических процессов, протекающих при работе частотно-регулируемого синхронного электропривода, в среде графического программирования MATLAB Simulink с использованием пакета символьной математики MATLAB.

Положения, выносимые на защиту:

1. Предложен новый способ смены закона управления магнитным полем синхронного двигателя в зависимости от величины возмущающего воздействия, который позволяет изменять структуру системы автоматического управления лишь за счет задания одной переменной – угла между пространственными векторами потокосцепления и тока статора.

2. Разработана методика синтеза частотно-напряженческой системы автоматического управления с переменной структурой для частотно-регулируемого синхронного электропривода с полеориентированным управлением, для электродвигателя которого может быть введен учет насыщения магнитной системы и в конструкции которого может присутствовать демпферная обмотка.

3. Разработанная система автоматического управления обеспечивает работоспособность электропривода в окрестности предельно-допустимых нагрузок в совокупности с обеспечением требуемых динамических и статических показателей качества переходных процессов в отличии от типовой, о чем свидетельствует сохранение темпа разгона и допустимая величина статической ошибки.

4. Разработанная система автоуправления с переменной структурой позволяет добиться лучших показателей качества регулирования (время переходного процесса, перерегулирование) при моментах нагрузки, превышающих номинальный электромагнитный момент в 1,8 и более раз.

Достоверность результатов, полученных в ходе диссертационного исследования, подтверждается имитационным моделированием в среде графического программирования MATLAB Simulink, а также апробацией предлагаемых методик.

Апробация работы. По материалам диссертации были сделаны доклады на VII Всероссийской научно-практической конференции «Высокие технологии, науки и образование: актуальные вопросы, достижения и инновации» (Пенза, 2020 г.); IX Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 90-летию СибГИУ «Автоматизированный электропривод и промышленная электроника» (Новокузнецк, 2020 г.); V Международной научно-практической конференции «Моделирование и наукоемкие информационные технологии в технических и социально-экономических системах» (Новокузнецк, 2021 г.); Всероссийских научно-практических конференциях (с международным участием) «Системы автоматизации (в образовании, науке и производстве) AS’2022»; AS’2023»; AS’2024» (Новокузнецк, 2022, 2023, 2024 г.).

Личный вклад автора заключается в разработке математических моделей синхронной машины, выступающей в качестве объекта управления, как при отсутствии, так и наличии на ее роторе дополнительных замкнутых контуров; в разработке математической модели машины, в которой учитываются процессы насыщения магнитной системы; в получении зависимостей различных координат нерегулируемого синхрон-

ного электродвигателя от ЭМ момента, потокосцепления статора и угла между пространственными векторами потокосцепления и тока статора; в разработке и математическом обосновании способа формирования целесообразного закона управления магнитным полем синхронного двигателя на основе задания определенного угла между пространственными векторами потокосцепления и тока статора в зависимости от нагрузки, прикладываемой к валу машины; в разработке методики синтеза САУ с переменной структурой для частотно-регулируемого СД; в построении и отладке моделей систем автоматического управления с типовой и усовершенствованной (переменной) структурой в виртуальной среде.

Публикации. По материалам диссертационного исследования было опубликовано 10 работ, в том числе 3 статьи в журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий (список научных журналов ВАК РФ).

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения, списка использованных источников литературы из 135 наименований, списка сокращений и условных обозначений и 5 приложений. Общий объем диссертации составляет 269 страниц основного текста, 33 таблицы, 97 рисунков.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дано обоснование актуальности выбранной темы диссертационной работы, определены объект и предмет исследования, поставлена цель исследования и соответствующие ей задачи, произведен обзор степени разработанности темы исследования, описана применяемая в работе методология, а также обозначена научная новизна и практическая значимость.

Первая глава диссертационной работы посвящена патентно-литературному обзору, в ходе которого дается информация об истории развития автоматизированного ЭП прокатных станов, о требованиях, предъявляемых к данному виду ЭМС и обосновывается перспективность применения частотно-регулируемой синхронной машины в силовой основе привода. В ходе патентно-литературного обзора также рассматривается современное силовое и слаботочное оборудование, применяемое при организации автоматизированного синхронного ЭП, а также законы управления скоростью синхронной машины, которые закладываются в основу при построении САР. В ходе обзора объясняются причины применения в текущей работе двухзвенного преобразователя частоты, принципа подчиненного регулирования при синтезе системы и полеориентированного управления координат машины.

В заключительной части главы приводится условная классификация проблематики применения СД в качестве силового агрегата автоматизированного электропривода прокатного стана, в рамках которой первая разделяется на три группы: опыт разработки и эксплуатации; методология разработки и эксплуатационные проблемы. В дальнейшем приводится подробное описание каждой из групп, на основе которого делается вывод о целесообразности модернизации типовых структур САУ.

Вторая глава диссертационной работы посвящена математическому моделированию всех элементов автоматизированного синхронного электропривода, аналитическому исследованию режимов работы синхронной машины и особенностей применяемых законов полеориентированного управления, а также разработке методики синтеза САР с переменной структурой. В начале главы проводится систематизация методов, применяемых при математическом моделировании физических особенностей объекта управления, среди которых стоит отдельно выделить применяемые системы координат,

понятие о пространственных векторах, используемые системы о.е., уравнения Парка-Горева, применяемые методики учета влияния насыщения магнитопровода СД на его параметры и др. К ключевым аспектам данной главы стоит отнести: формирование математической модели синхронного двигателя с демпферной обмоткой, в которой предусмотрен учет влияния эффекта насыщения магнитопровода по основному магнитному потоку; обоснование и аналитическое описание идеи получения целесообразного закона управления магнитным полем машины в зависимости от нагрузки, прикладываемой к валу двигателя; синтез всех элементов системы автоматического управления с переменной структурой для синхронного двигателя с полеориентированным управлением; составление методики синтеза системы автоматического управления с переменной структурой.

Математическая модель СД с ДО при учете эффекта влияния насыщения, как показано в диссертационном исследовании, является общим случаем для всех остальных моделей машин, рассматриваемых в рамках работы. То есть при подстановке в указанную модель параметров, коэффициентов, частных значений координат, соответствующих тому или иному случаю, можно свети систему уравнений, характеризующую синхронный двигатель с демпферной обмоткой при насыщении магнитной системы, к частной модели рассматриваемого объекта управления. Структурная схема указанной математической модели удобной для дальнейшего синтеза с САУ приводится на рис. 1.

Под целесообразным управлением магнитным полем машины в текущей работе понимается такое регулирование ее координат, при котором в области нагрузок, значительно превышающих номинальный электромагнитны момент, полеориентированное управление реализуется по магнитному полю рассеяния, а во всех остальных случаях – по магнитному полю статора. Управление по магнитному полю рассеяния повышает перегрузочную способность СД, однако неизбежно приводит к потреблению реактивной мощности из сети. Управление по магнитному полю статора является наиболее благоприятным в энергетическом плане. Однако в области высоких нагрузок данный закон управления не способен обеспечить удовлетворительное протекание переходных процессов (ПП) по координатам ЭП.

Идея принципа формирования переменного закона управления магнитным полем в самой САУ может быть пояснена за счет рассмотрения уравнений ЭМ момента СД $\bar{M}$ (1) и (2) и векторных диаграмм, приведенных на рисунках 2,а и 2,б.

$$\bar{M} = \frac{\frac{3}{2}Z_p\Psi_s I_s \sin\alpha}{\frac{3}{2}Z_p\Psi_б \mathrm{I}_{sб}} = \frac{\frac{3}{2}Z_p(\psi_{sd}i_{sq}-\psi_{sq}i_{sd})}{\frac{3}{2}Z_p\Psi_б \mathrm{I}_{sб}} = \bar{\psi}_{sd}\bar{\imath}_{sq} - \bar{\psi}_{sq}\bar{\imath}_{sd} = \bar{\Psi}_s\bar{I}_s \sin\alpha, \qquad (1)$$

$$\bar{M} = \frac{\frac{3}{2}Z_p\Psi_\delta I_s \sin\beta}{\frac{3}{2}Z_p\Psi_б \mathrm{I}_{sб}} = \frac{\frac{3}{2}Z_p(\psi_{\delta d}i_{sq}-\psi_{\delta q}i_{sd})}{\frac{3}{2}Z_p\Psi_б \mathrm{I}_{sб}} = \bar{\psi}_{\delta d}\bar{\imath}_{sq} - \bar{\psi}_{\delta q}\bar{\imath}_{sd} = \bar{\Psi}_\delta\bar{I}_s \sin\beta, \qquad (2)$$

где Z_p – число пар полюсов; Ψ_s и $\bar{\Psi}_s$ – потокосцепления статора в абсолютных единицах (а.е.) и о.е. соответственно; I_s и $\bar{I}_s$ – токи статора в а.е. и о.е. соответственно; α – угол между пространственными векторами потокосцепления и тока статора; $\Psi_б$ и $\mathrm{I}_{sб}$ – базовое потокосцепление и ток статора соответственно; ψ_{sd} и ψ_{sq} – проекции потокосцепления статора на ось d и q соответственно, выраженные в а.е.; i_{sq} и i_{sd} – проекции тока статора на ось q и d соответственно, выраженные в а.е.; $\bar{\psi}_{sd}$ и $\bar{\psi}_{sq}$ – величины ψ_{sd} и ψ_{sq}, выраженные в о.е.; $\bar{\imath}_{sq}$ и $\bar{\imath}_{sd}$ – величины i_{sq} и i_{sd}, выраженные в о.е.; β – угол между пространственными векторами потокосцепления рассеяния и тока статора;

Ψ_δ и $\bar{\Psi}_\delta$ – потокосцепления рассеяния в а.е. и о.е. соответственно, выраженные в а.е.; $\psi_{\delta d}$ и $\psi_{\delta q}$ – проекции потокосцепления рассеяния на ось d и q соответственно, выраженные в а.е.; $\bar{\psi}_{\delta d}$ и $\bar{\psi}_{\delta q}$ – величины $\psi_{\delta d}$ и $\psi_{\delta q}$ соответственно, выраженные в о.е.

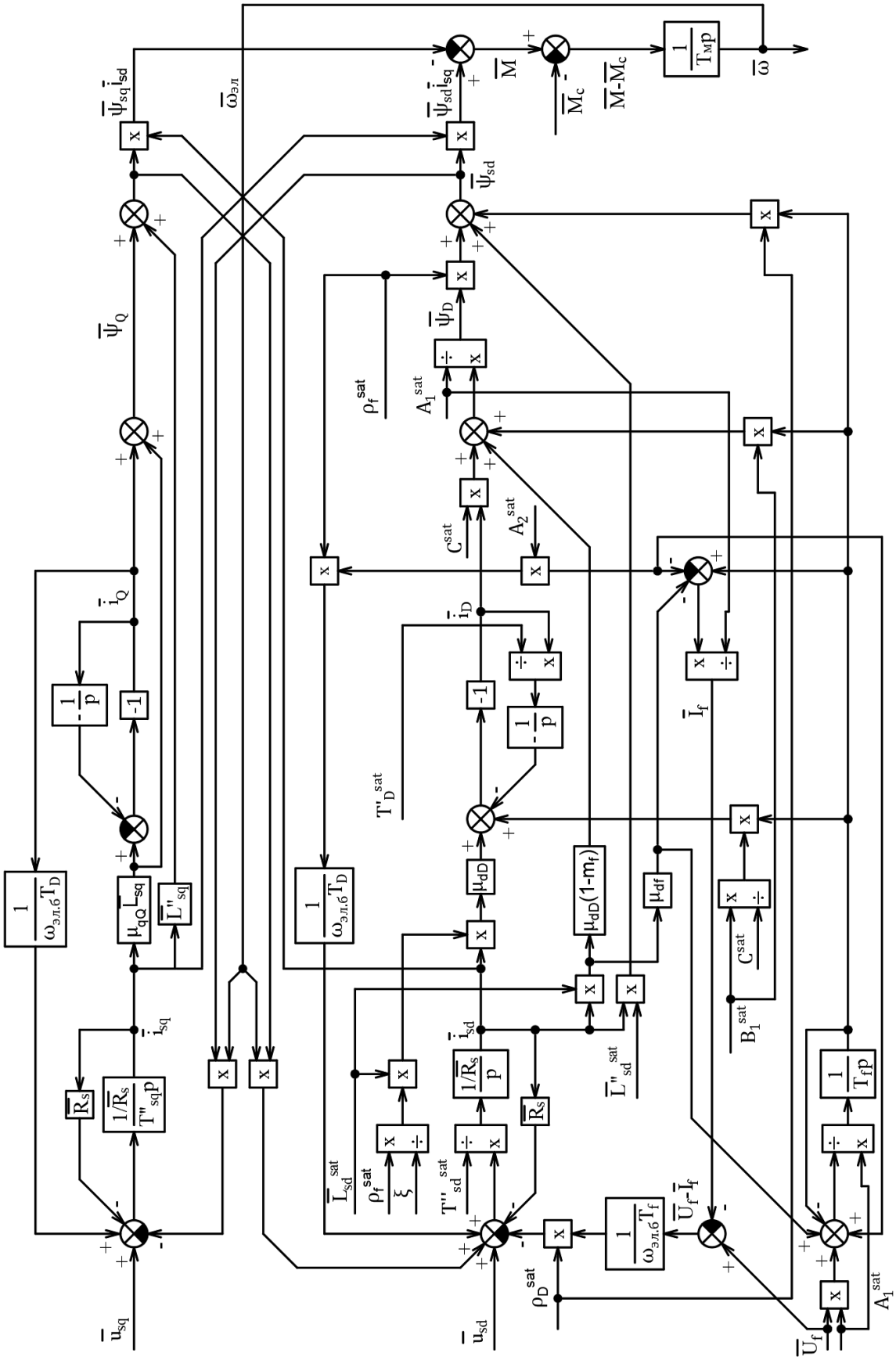
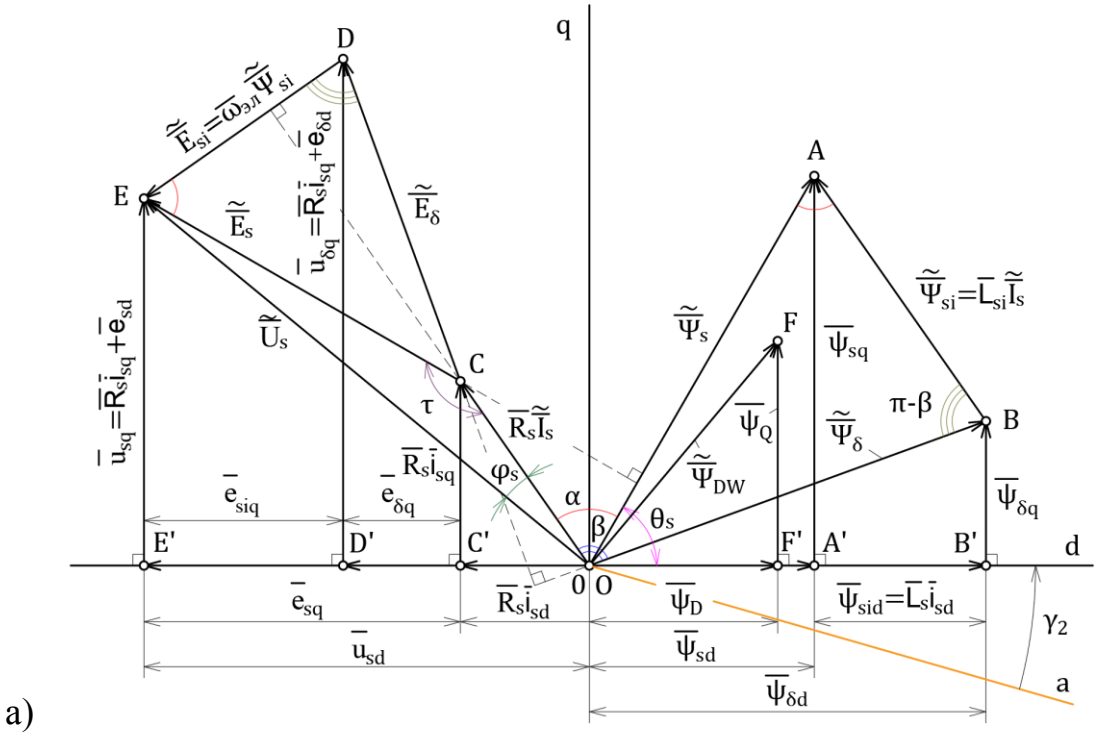
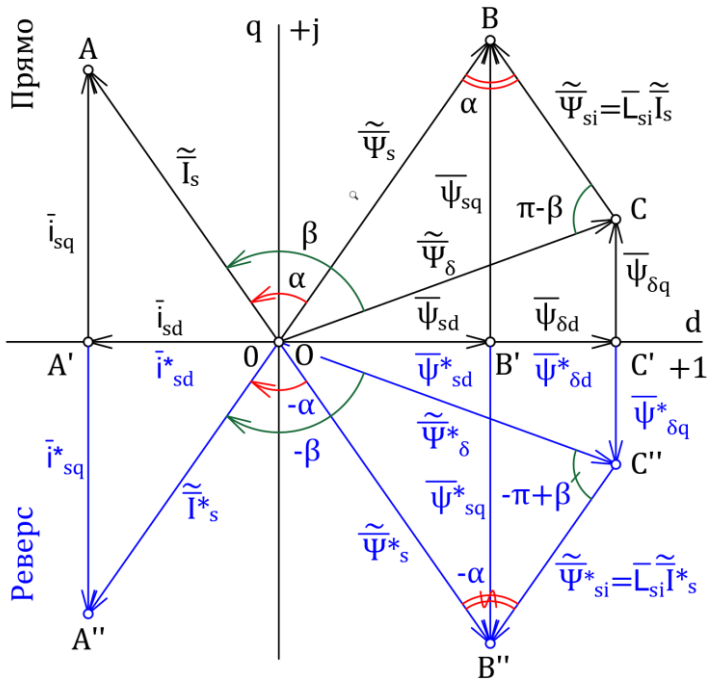


Рисунок 1 – Структурная схема модели синхронного двигателя с демпферной обмоткой с учетом насыщения по основному магнитному потоку



а)



б)

Рисунок 2 – Векторные диаграммы установившегося режима работы машины: а) – векторная диаграмма нерегулируемого по магнитному полю СД; б) – упрощенная векторная диаграмма СД при различном направлении вращения ротора

Описывая аналитически векторные диаграммы рисунка 2, можно получить следующие функциональные зависимости для регулируемых координат машины:

$$\bar{\imath}_{sq} = \frac{\bar{I}_s \sin\alpha}{\sqrt{1-2\frac{\bar{L}_{sq}\bar{I}_S}{\bar{\Psi}_s}\cos\alpha+\frac{\bar{L}_{sq}^2\bar{I}_S^2}{\bar{\Psi}_s^2}}}, \tag{3}$$

$$\bar{\imath}_{sd} = \frac{\bar{I}_s\left(\bar{\Psi}_s\cos\alpha-\bar{L}_{sq}\bar{I}_S\right)}{\bar{\Psi}_s\sqrt{1-2\frac{\bar{L}_{sq}\bar{I}_S}{\bar{\Psi}_s}\cos\alpha+\frac{\bar{L}_{sq}^2\bar{I}_S^2}{\bar{\Psi}_s^2}}}, \tag{4}$$

$$\bar{\Psi}_f = \frac{1}{\sqrt{1-2\frac{\bar{L}_{sq}\bar{I}_S}{\bar{\Psi}_S}\cos\alpha+\frac{\bar{L}_{sq}^2\bar{I}_S^2}{\bar{\Psi}_S^2}}}\left[\bar{\Psi}_s - \left(\bar{L}_{sq}+\bar{L}'_{sd}\right)\bar{I}_s\cos\alpha + \frac{\bar{L}_{sq}\bar{L}'_{sd}\bar{I}_S^2}{\bar{\Psi}_s}\right], \quad (5)$$

где $\bar{L}_{sq}$ – индуктивность обмотки статора по оси q, о.е.; $\bar{\Psi}_f$ – потокосцепление ОВ, о.е.; $\bar{L}'_{sd}$ – индуктивность обмотки статора по оси d в переходном режиме, о.е.

Задавая определенную величину угла α и подставляя ее в уравнения (3) – (5), производится настройка на тот или иной закон управления магнитным полем. Задание угла α для каждого случая аналитически описывается следующими условиями:

$$\begin{cases} \alpha = \pm\frac{\pi}{2}, \text{при } 0 \le |\bar{M}| \le k_\alpha, \bar{\Psi}_s = \bar{\Psi}_б, \\ \alpha = \pm\arcsin\frac{1}{\sqrt{1+\frac{\bar{L}_{si}^2\bar{I}_S^2}{\bar{\Psi}_б^2}}}, \text{при } |\bar{M}| > k_\alpha,\ \beta = \pm\frac{\pi}{2} \text{ и } \bar{\Psi}_\delta = \bar{\Psi}_б, \end{cases} \quad (6)$$

где k_α – коэффициент численно равный кратности номинального ЭМ момента, при которой происходит смена законов управления магнитным полем машины, о.е.; $\bar{L}_{si}$ – индуктивность рассеяния на фазной обмотке статора, о.е.

На рисунке 3 представлена функциональная схема, дающая наглядное представление о способе организации ПОУ в САУ с переменной структурой.

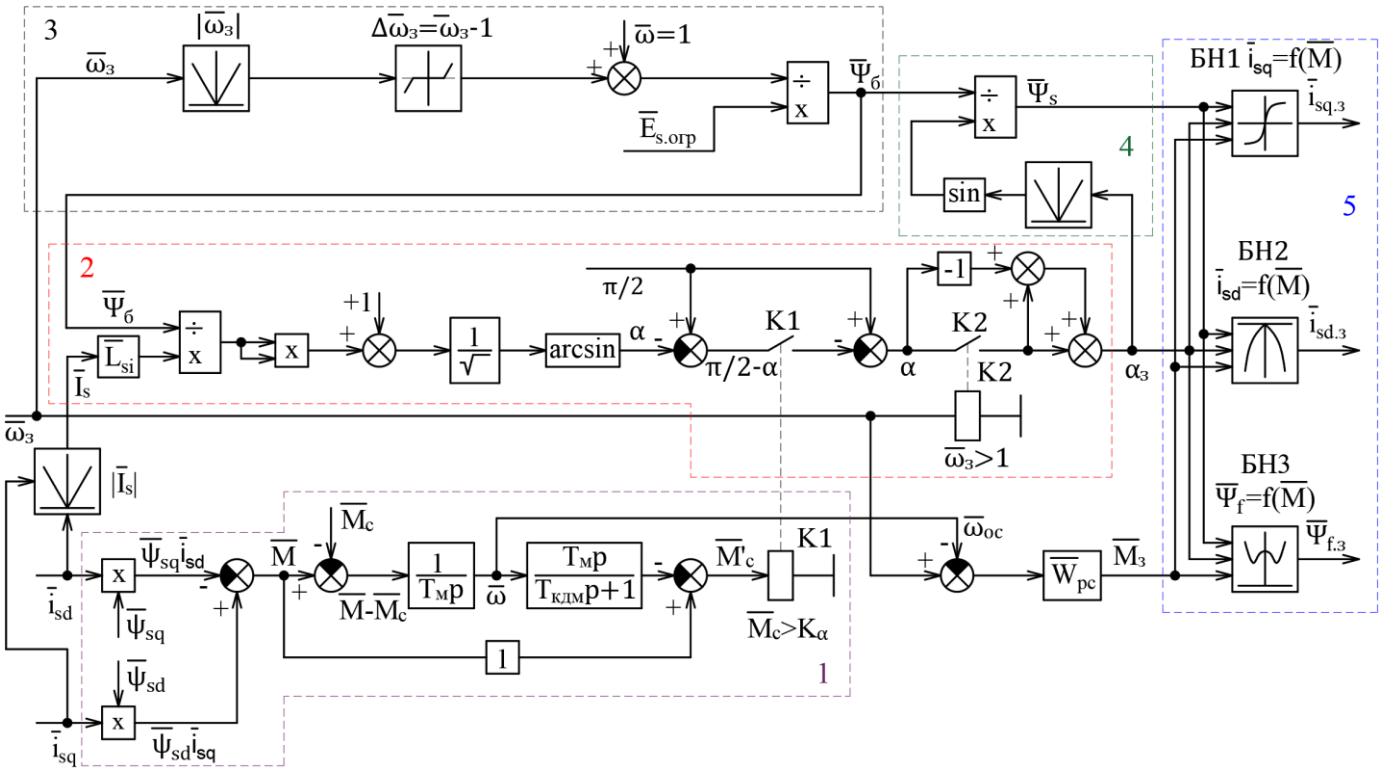


Рисунок 3 – Функциональная схема, поясняющая принцип ПОУ в САР синхронного ЭП главной линии прокатного стана

На рисунке 3: 1 – часть, отвечающая за измерение величины возмущающего воздействия; 2 – блок формирования угла между пространственными векторами потокосцепления и тока статора; 3 – блок формирования базового потокосцепления машины; 4 – блок формирования потокосцепления статора; 5 – блоки нелинейности, связывающие регулируемые координаты МКМ с ЭМ моментом.

На рисунке 4 представлена блок-схема алгоритма синтеза системы автоуправления с переменной структурой для СД с полеориентированным управлением.

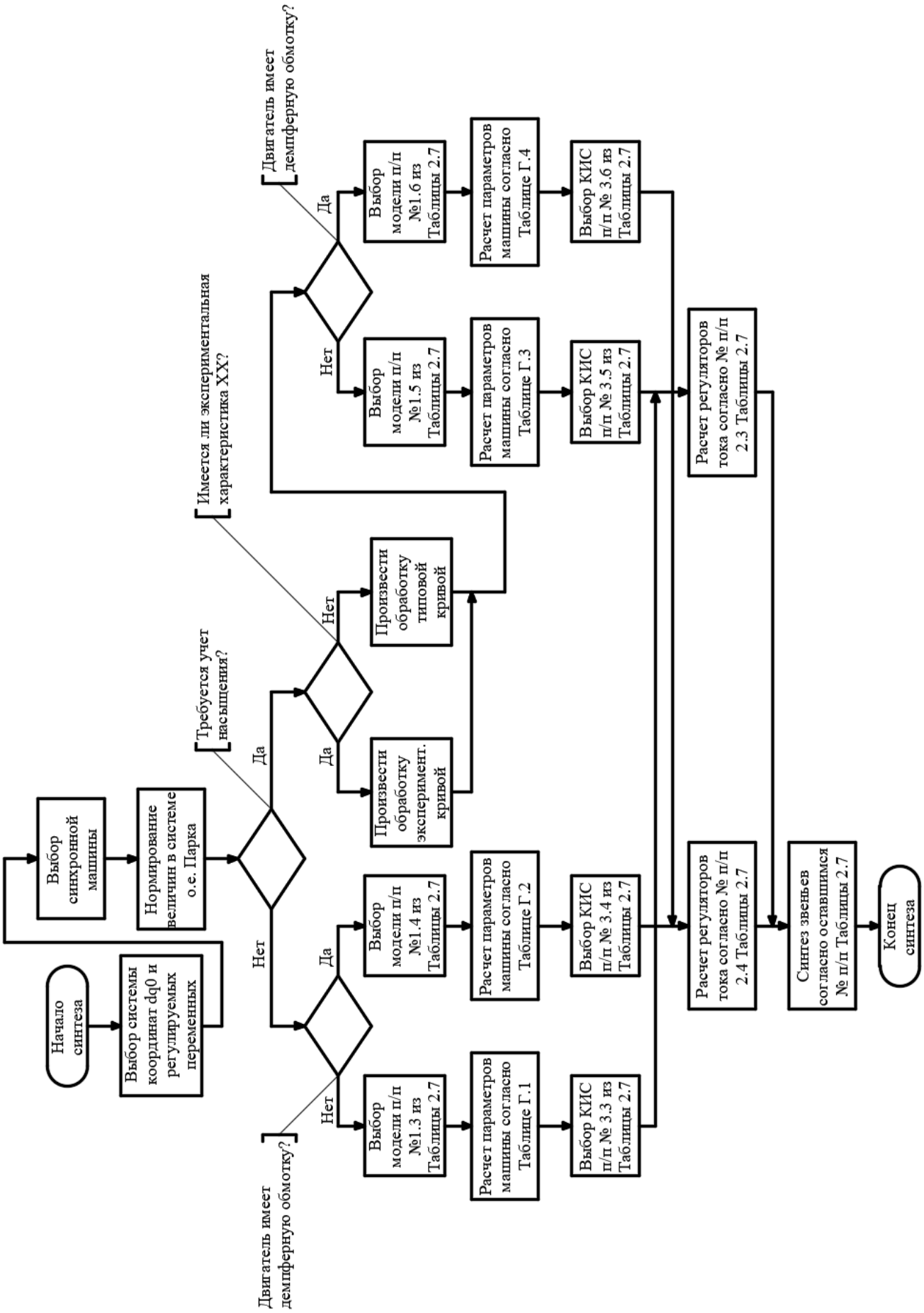


Рисунок 4 – Блок-схема алгоритма синтеза САУ с переменной структурой

В **третьей главе** произведено составление имитационных моделей автоматизированных синхронных приводов с САУ различной структуры и ОУ разной конструкции, а также определяются режимы работы ЭП, представляющие интерес для дальнейшего исследования с помощью полученных в графической среде моделей. Перед реализацией автоматизированных синхронных ЭП в виртуальной среде дается обоснование о требуемом количестве имитационных моделей для исследования, в ходе которого определяется, что все многообразие синтезированных САУ с ОУ может быть исследовано путем построения двух моделей, одна из которых предназначена для управления машиной с демпферной обмоткой при учете насыщения магнитной системы, а другая – для машины, не имеющей успокоительной обмотки, для которой также учтено насыщение стальных масс.

Имитационная модель, предназначенная для исследования особенностей работы разработанных схем автоматизированных синхронных ЭП, приводится на рисунке 5.

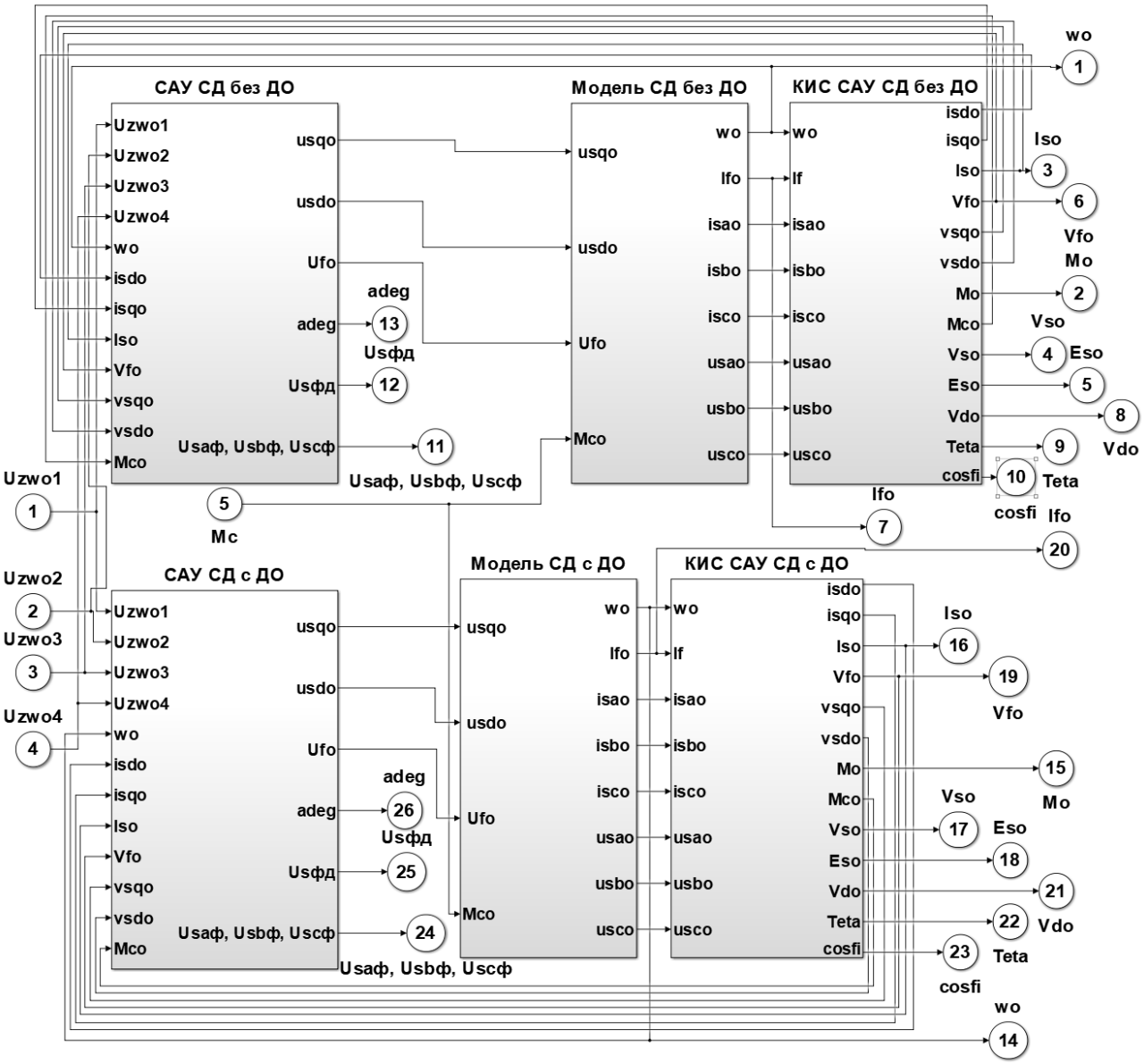


Рисунок 5 – Имитационные модели автоматизированных синхронных ЭП

Название каждого из блоков, выделенных жирным шрифтом, отображает имитационную модель того или иного объекта ЭП. По своей сути блоки «САУ СД с ДО» и «САУ СД без ДО» практически идентичны за исключением параметров регуляторов

тока. Каждый из этих блоков содержит в себе САУ с переменной структурой, которая может быть легко сведена к системе с типовой структурой, в которой поддерживается постоянство управления по магнитному полю статора, путем задания величины k_α, превышающей кратность отключающего момента нагрузки.

В четвертой главе проведено комплексное исследование ПП по различным координатам ЭП при режимах работы. При имитации режимов работы в графической среде определено, что система автоуправления с типовой структурой не способна обеспечить удовлетворительное качество ПП при разгоне ЭП с максимально допустимой нагрузкой на валу при любом заданном значении динамического тока, в то время как САУ с переменной структурой не только обеспечивает такой разгон, но и показывает удовлетворительные показатели времени ПП, статической ошибки по скорости и перерегулирования по иным координатам; различные координаты ЭП при разных законах управления магнитным полем ведут себя в соответствии с качественным и аналитическим анализом, проведенным в рамках второй главы.

На рисунке 6 приведены графики ПП по основным координатам ЭП (скорость ротора и ЭМ момент), на рисунке 7 – графики ПП по координате коэффициента мощности при условиях режимов работы, характеристики которых приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Условия работы ЭП при заданной трапецеидальной тахограмме

Пропуск	Заданные условия			
	Задание на контур скорости $\bar{\omega}_з$, о.е.	Момент нагрузки $\bar{M}_с$, о.е.	Динамический ток $\bar{I}_{дин}$, о.е.	Постоянная времени ЗИ $T_{зи}$, с
I	1	2,0	0,49	0,8732
II	1	1,9	0,59	0,7252
III	1	1.8	0,69	0,6201
IV	1	1,7	0,79	0,5416

По графикам ПП, приведенным на рисунках 6 и 7, определены величины времени переходного процесса, перерегулирования и просадки по скорости, средневзвешенного коэффициента мощности синхронной машины для САУ с переменной и типовой структурой. Данные величины сведены в таблицу 2.

Проводя сравнительный анализ между системами по данным обработки графиков ПП, которые представлены в таблице 2, можно заключить, что при моменте нагрузки, составляющем 1,8 о.е., между САУ практически нет отличий в плане показателей качества регулирования по координате скорости, в то время как коэффициент мощности при использовании САУ с типовой структурой оказывается на 0,15 – 0,2 выше (в зависимости от конструкции СД). При статических возмущениях, превышающих данную величину, САР с переменной структурой обладает преимуществами в плане перерегулирования и быстродействия, причем разница в показателях качества тем выше, чем больше величина прикладываемой к валу нагрузки. Таким образом, можно утверждать, что разработанная в рамках текущей диссертационной работы система автоуправления с переменной структурой действительно обладает рядом преимуществ перед типовой.

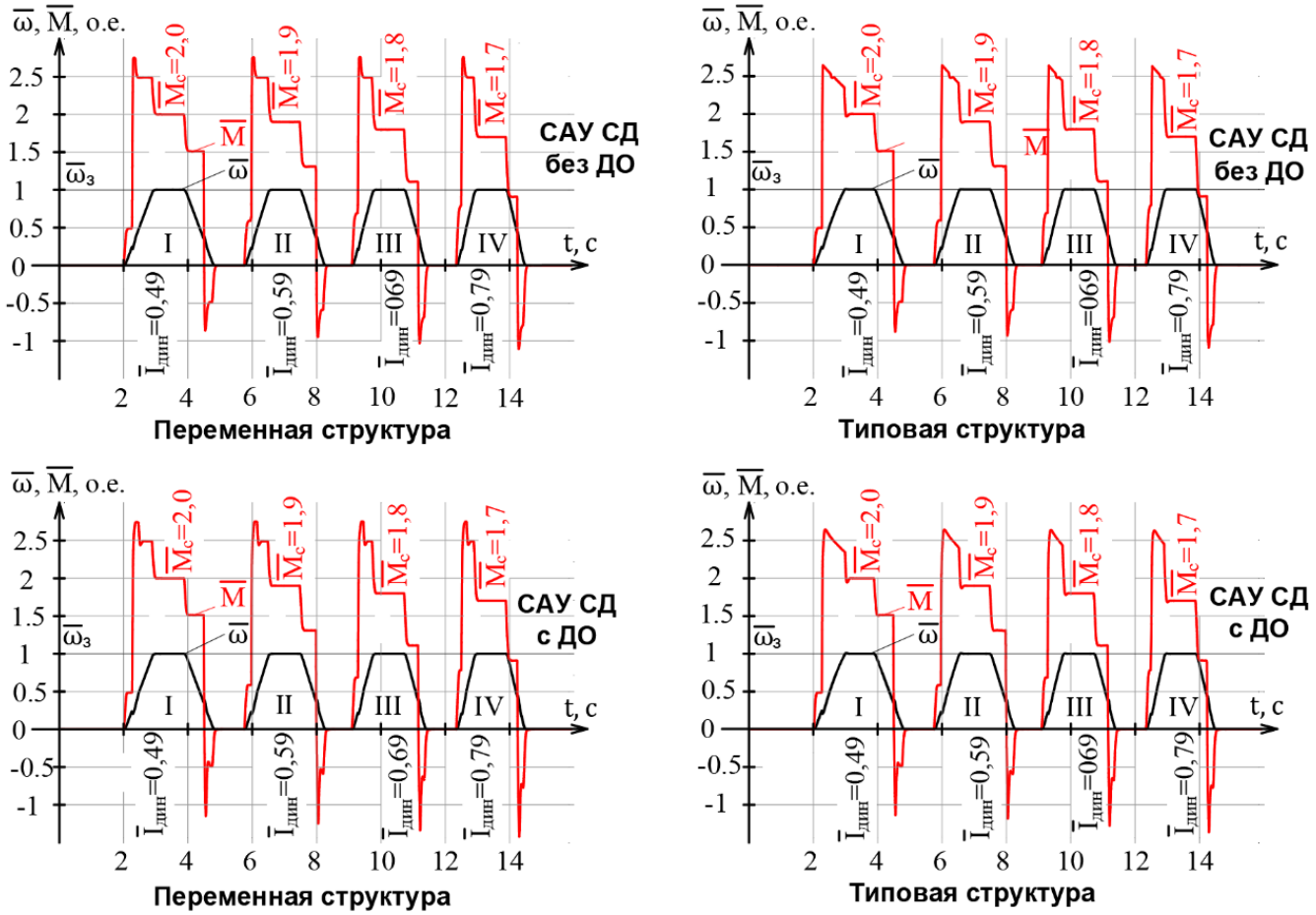


Рисунок 6 – Переходные процессы по основным координатам ЭП в режимах работы, моделируемых в соответствии с условиями таблицы 1

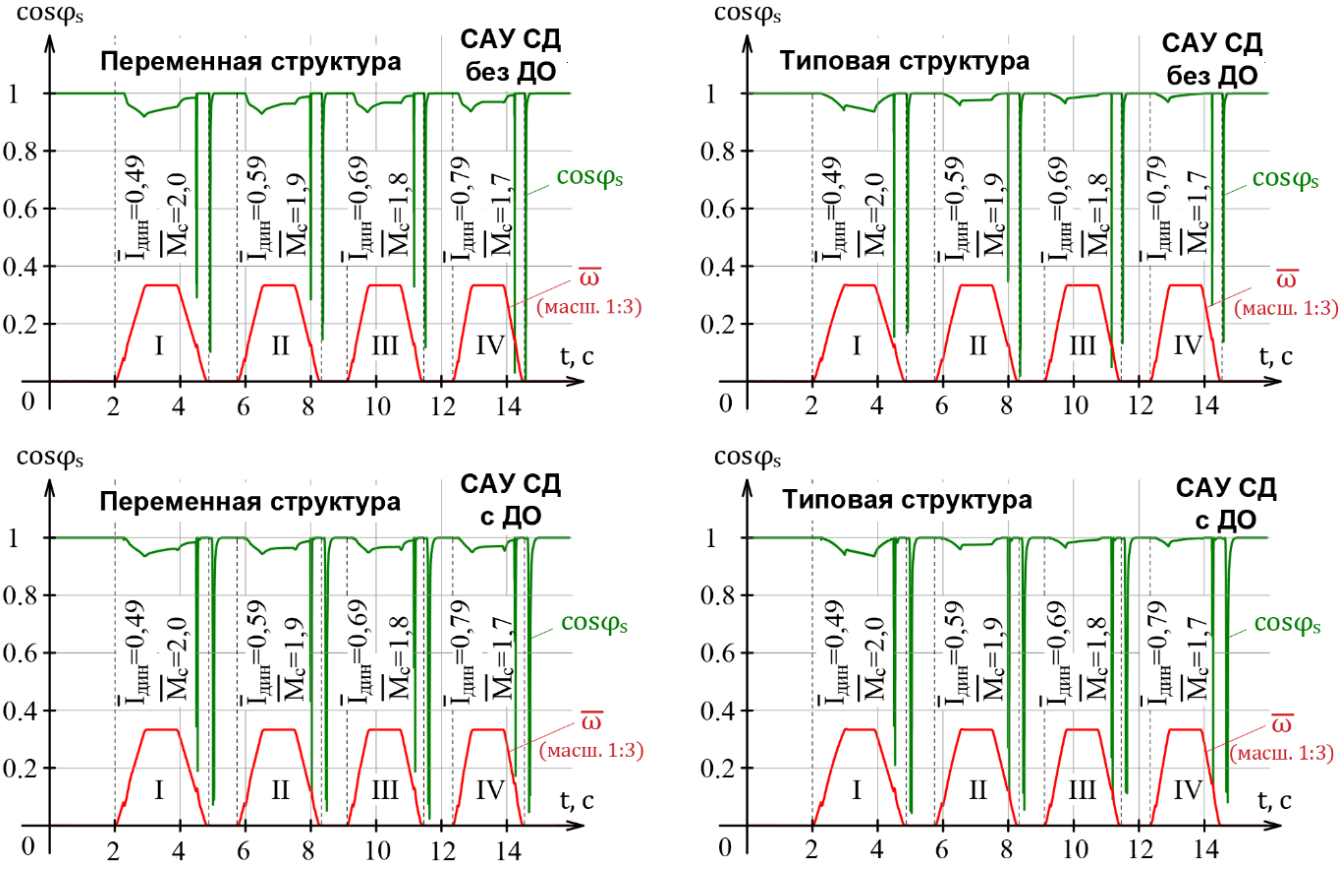


Рисунок 7 – Переходные процессы по коэффициенту мощности в режимах работы, моделируемых в соответствии с условиями таблицы 1

Таблица 2 – Показатели качества регулирования по координатам ЭП, переходные процессы для которых представлены на рисунках 6.

Величина	Схема	САУ с переменной структурой				САУ с типовой структурой			
		номер пропуска				номер пропуска			
		I	II	III	IV	I	II	III	VI
Время ПП, $t_{пп}$, с	без ДО	0,91	0,7677	0,6664	0,5923	0,9471	0,7736	0,6666	0,5908
	с ДО	0,9096	0,7462	0,6655	0,5913	0,9657	0,7804	0,6683	0,5908
Перерегулирование, σ, %	без ДО	0,00	0,00	0,00	0,00	0,50	0,18	0,14	0,13
	с ДО	0,00	0,00	0,00	0,00	0,78	0,42	0,25	0,18
Коэффициент мощности	без ДО	0,9609	0,9657	0,9714	0,9732	0,9695	0,9851	0,9910	0,9933
	с ДО	0,9701	0,9735	0,9749	0,9758	0,9703	0,9845	0,9902	0,9932
Просадка скорости, %	без ДО	12,04	10,00	8,10	6,26	12,12	10,09	8,15	6,31
	с ДО	16,50	13,52	10,69	8,08	16,54	13,56	10,69	8,13

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных научных исследований получены новые теоретические и практические результаты, направленные на повышение эффективности построения систем автоматического управления с переменной структурой для синхронных машин с электромагнитным возбуждением наиболее распространенных конструкций.

Применение предложенной системы автоматического управления позволит повысить эффективность прокатного производства за счет улучшения производительности главного электропривода реверсивных станов горячей прокатки. Кроме того, предложенная в данной работе система автоуправления и методика её синтеза могут быть распространены на иные синхронные электроприводы, которые в соответствии с технологическими особенностями их работы испытывают перегрузки, значительно превышающие номинальный электромагнитный момент, создаваемый на валу машины.

Проведенные в рамках диссертационной работы теоретические и экспериментальные исследования позволяют сформулировать следующие результаты, имеющую научную и практическую значимость:

1. Получена математическая модель идеализированного синхронного двигателя с демпферной обмоткой удобная для синтеза с так называемыми частотно-напряженческими системами автоматического регулирования. Величины, входящие в уравнения, составляющие данную математическую модель, нормированы относительно базисных величин системы о.е. Парка-Горева.

2. Произведено получение удобных для синтеза с САУ математических моделей объекта управления при различной его конструкции, для которого введен учет влияния эффекта насыщения магнитной системы на различные параметры.

3. Получены выражения для определения координат синхронной машины в установившемся режиме работы в отсутствии какого-либо закона управления магнитным полем машины. Данные статические нелинейные функциональные зависимости выражены в общем виде относительно угла между пространственными векторами потокосцепления и тока статора и непосредственно относительно модуля пространственного вектора потокосцепления статора. Такой вид выражений для различных координат позволяет осуществлять относительно легкий переход между двумя законами полеориентированного управления машиной.

4. Предложен оригинальный способ построения системы автоматического управления с переменной структурой для синхронной машины с электромагнитным возбуждением, идея которого основана на перемене способа формирования угла между пространственными вектора потокосцепления и тока статора.

5. Разработана методика синтеза частотно-напряженческих систем автоматического управления с переменной структурой, которые могут быть использованы для управления синхронными двигателями различной конструкции (в зависимости от наличия или отсутствия демпферной обмотки), претерпевающими в процессе своей эксплуатации частые перегрузки ударного характера.

6. Получены имитационные модели САУ с переменной структурой для синхронной машины при учете эффекта насыщения ее магнитной системы и при его отсутствии; при наличии в ее конструкции демпферной обмотки и при ее отсутствии.

7. Осуществлен анализ графиков ПП по различных координатам ЭП в имитационной среде как в случае применения типовой структуры САУ, так и в случае использования вариативного закона управления магнитным полем машины. Данные, полученные в ходе обработки сигналов, представленных на отмеченных графиках, позволяют сделать вывод о большей эффективности применения САУ с переменной структурой по сравнению с системой, в которой определенный закон ПОУ формируется на постоянной основе, при наличии эксплуатационных нагрузок, значительно превышающих величину номинального электромагнитного момента на валу машины. В частности, САУ с переменной структурой, позволяет сохранить работоспособность и обеспечить заданный темп разгона в совокупности с технологически заданной величиной статической ошибки при значении возмущающего воздействия близкого к максимально-допустимому, а также обеспечивает отсутствие перерегулирования и большее быстродействия при моментах нагрузки, в 1,8 и более раз превышающих номинальный электромагнитный момент.

Полученные математические модели адекватно описывают различные электромагнитные и электромеханические процессы, имеющие место при работе синхронной машины, что подтверждается исследованием работы моделей в виртуальной графической среде. В связи с этим они могут быть использованы при синтезе систем автоматического управления синхронной машины различной сложности.

Синтез разработанной системы автоматического управления с переменной структурой, хоть и сложнее чем синтезом типовой системы автоуправления, однако не обладает значительной трудоемкостью, а также может быть легко унифицирован для различных синхронных машин с электромагнитным возбуждением, ввиду применения принципа подчиненного регулирования и единого математического описания различных звеньев, участвующих в организации полеориентированного управления.

Имитационные модели автоматизированных синхронных ЭП и программа расчета их величин, которая составляет файл-сценарий, могут быть использованы при исследовании и отладке систем автоматического управления с полеориентированным управлением синхронной машины независимо от области ее применения.

Дальнейшая разработка темы может идти в следующих направлениях: синтез САУ с переменной структурой для полеориентированного управления синхронной машины в классе многосвязных оптимальных систем; получение математической и имитационной модели цифровой системы автоматического управления; введение контура регулирования динамического тока (момента) в структуру системы.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК РФ:

1. Математическое и имитационное моделирование двухзонной системы автоуправления частотно-регулируемого синхронного электродвигателя с демпферной обмоткой / В. Ю. Островлянчик, В. А. Кубарев, Н. С. Зайцев, Д. Е. Модзелевский, Е. С. Кузнецова, Д. А. Маршев // Горное оборудование и электромеханика. – 2022. - № 5 (163). – С. 46–58.

2. Способ построения системы автоуправления переменной структуры для частотно-регулируемого синхронного электропривода / В. Ю. Островлянчик, Н. С. Зайцев, В. А. Кубарев, Е. С. Кузнецова, Д. Е. Модзелевский // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2023. – Вып. 4. – С. 614–624.

3. Зайцев, Н. С. Качество регулирования в системах автоуправления синхронного электропривода при учете насыщения магнитной системы машины / Н. С. Зайцев, В. А. Кубарев, Е. С. Кузнецова // Известия Транссиба. – 2025. – № 3 (63). – С. 138 – 152.

Публикации в материалах и трудах конференций:

1. Основные проблемы двухдвигательного электропривода прокатных станов / В. А. Кузнецов, Е. С. Кузнецова, Д. А. Лузин, Н. С. Зайцев // Высокие технологии, наука и образование: актуальные вопросы, достижения и инновации : сборник статей VII Всероссийской научно-практической конференции, 27 июня 2020. – Пенза : МЦНС «Наука и Просвещение», 2020. – С. 81–86.

2. Имитационное моделирование системы автоматического управления главным электроприводом прокатного толстолистового стана по системе «частотный преобразователь – синхронный двигатель» / В. А. Кузнецов, Н. С. Зайцев, Е. С. Кузнецова // Автоматизированный электропривод и промышленная электроника : сборник статей IX Всероссийской научно-практической конференции, 25-26 ноября 2020. – Новокузнецк : изд-во СибГИУ, 2020. – С. 32–40.

3. Модернизация системы управления синхронным электроприводом вращения валков прокатного стана / В. А. Кузнецов, Е. С. Кузнецова, Н. С. Зайцев // Моделирование и наукоемкие информационные технологии в технических и социально-экономических системах : труды V Международной научно-практической конференции, 14 апреля 2021. – Новокузнецк : изд. центр СибГИУ, 2021. – С. 315–321.

4. Разработка модели электропривода прокатного стана рельсового производства по системе «ПЧ-СД» с двухзонным регулированием скорости / В. А. Кузнецов, Е. С. Кузнецова, Н. С. Зайцев // Металлургия: технологии, инновации, качество «Металлургия – 2021» : труды XXII Международной научно-практической конференции, 10 – 11 ноября 2021. – Новокузнецк : изд. центр СибГИУ, 2021. – Ч. 2. – С. 204–213.

5. Имитационное моделирование системы автоуправления с переменной структурой для векторного управления синхронным электродвигателем классической конструкции / В. Ю. Островлянчик, В. А. Кубарев, Н. С. Зайцев, Е. С. Кузнецова // Системы автоматизации (в образовании, науке и производстве). AS'2022 : труды Всероссийской научно-практической конференции (с межд. участие), 15–16 декабря 2022. – Новокузнецк : Изд. центр СибГИУ, 2022. – С. 586–592.

6. Математическое моделирование синхронного двигателя с демпферной обмоткой в системе относительных единиц «Парка-Горева» / В. А. Кубарев, Н. С. Зайцев, Е. С. Кузнецова // Системы автоматизации (в образовании, науке и производстве) : AS`2023 : труды Всероссийской научно-практической конференции (с межд. участием) / СибГИУ. – Новокузнецк : Издательский центр СибГИУ, 2023. – С. 339–345.

7. Математическое моделирование подчиненных систем автоуправления синхронного электропривода с переменной структурой при различном исполнении замкнутых контуров / В. А. Кубарев, Н. С. Зайцев, Е. С. Кузнецова. // Системы автоматизации (в образовании, науке и производстве) : AS`2024 : труды Всероссийской научно-практической конференции (с межд. участием), 10–12 декабря 2024. / СибГИУ. – Новокузнецк : Издат. центр СибГИУ, 2024. – С. 406–413.

Напечатано в полном соответствии с авторским оригиналом

Подписано в печать 09.11.2026 г.
Формат бумаги 60×84 1/16 Бумага писчая. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 1,16. Уч-изд. л 1,30. Тираж 100 экз. Заказ 197

Сибирский государственный индустриальный университет
654007, Кемеровская область – Кузбасс, г. Новокузнецк,
ул. Кирова, зд. 42, Издательский центр СибГИУ