

На правах рукописи



Поползин Иван Юрьевич

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ
ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ШАХТНОЙ ПОДЪЕМНОЙ УСТАНОВКИ НА ОСНОВЕ
МАШИНЫ ДВОЙНОГО ПИТАНИЯ

Специальность: 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новокузнецк – 2020

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

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Островляничик Виктор Юрьевич

Официальные оппоненты:
Шклярский Ярослав Элиевич доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой общей электротехники ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет»

Юдинцев Антон Геннадьевич кандидат технических наук, доцент,
директор Научно-исследовательского института автоматизи- и
электромеханики Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет»

Защита состоится «9» сентября 2020 г. в 10.00 часов на заседании диссертационного совета Д212.102.01 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 +7 (3842) 39-69-60, e-mail: haa.omit@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/2020/pop/Dissertation.pdf>

Автореферат разослан «___» _____ 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Семькина И. Ю.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Транспортировка полезного ископаемого и других грузов из шахты на поверхность и обратно является важной частью технологических процессов строительства шахт и рудников и добычи полезного ископаемого. Шахтные подъемные установки (ШПУ) связывают подземные участки шахт с участками, находящимися на поверхности, они определяют производительность технологического процесса добычи, поскольку объем добычи ограничен объемом ископаемого, который может быть вывезен. При этом технический уровень подъёмных машин, и, в частности, систем управления приводными электрическими двигателями, не всегда соответствует современным требованиям.

По состоянию на 2019 год, большинство ШПУ оснащены электроприводом постоянного тока, построенным по системе «управляемый преобразователь — двигатель постоянного тока» или «генератор — двигатель», синхронным электроприводом, либо асинхронным электроприводом с фазным ротором и роторной станцией (АД ФР). Применение электроприводов на основе АД ФР с роторной станцией обусловлено сохранением в такой схеме перегрузочной способности двигателя на всем диапазоне регулирования скорости. В то же время, такие электроприводы имеют низкий КПД, а регулирование скорости в них осуществляется ступенчатым изменением сопротивления роторной станции, что ведет к возникновению динамических нагрузок в канатах, рывкам и ударам, а также приводит к потерям энергии.

Данных недостатков лишены системы электропривода с частотным управлением асинхронными двигателями. Однако применение частотного управления для уже имеющихся асинхронных двигателей, рассчитанных на неизменную частоту питающего напряжения 50 Гц, сопряжено с такими проблемами как ухудшение характеристик машины на пониженной частоте, перегрев стали, снижение КПД и коэффициента мощности машины. Кроме того, для мощных асинхронных двигателей с напряжением на статоре 6 кВ зачастую невозможно подобрать частотный преобразователь, имеющий удовлетворительные технико-экономические показатели.

Существует два основных варианта решения данной проблемы. Первый — замена имеющихся двигателей на асинхронные короткозамкнутые машины, специально предназначенные для систем частотного управления. Данное решение является дорогостоящим из-за стоимости самих специальных двигателей, частотного преобразователя (или нескольких, работающих параллельно), а также из-за стоимости работ по демонтажу старого двигателя и монтажу нового. Более того, оно требует остановки подъемной машины на период модернизации, что не всегда приемлемо. К тому же, уже имеющиеся двигатели зачастую являются уникальными по своим характеристикам и не всегда могут быть заменены серийными специальными машинами. Также при использовании данного решения встает вопрос об утилизации демонтированного двигателя.

Второй вариант состоит в использовании уже имеющихся двигателей с фазным ротором с модернизацией системы управления электроприводом. Одним из вариантов подобной модернизации является включение асинхронного

двигателя с фазным ротором по схеме машины двойного питания (МДП). При этом в существующих публикациях рассмотрению данного способа модернизации, изучению свойств МДП при регулировании скорости в большом диапазоне, разработке ее математической модели для этого случая и построению системы управления таким электроприводом уделяется недостаточно внимания. Таким образом, разработка системы управления электроприводом переменного тока ШПУ на основе МДП является актуальной научной задачей.

Степень разработанности темы исследования. Теорией МДП занимались такие ученые как М. М. Ботвинник, Г. Б. Онищенко, В. Н. Мещеряков, Д. В. Безденежных, А. В. Аристов, М. В. Глазырин, Г. М. Тутаев, В. Hopfensperger, M. S. Carmelli, S. Drid, P. C. Roberts и другие. Несмотря на значительный объем проведенных исследований, как в зарубежных, так и в отечественных публикациях по теме основное внимание уделяется либо вопросам применения МДП в системах ветроэнергетики, либо применению МДП для привода насосов, компрессоров и вентиляторов. В большинстве работ по теме исходным является утверждение о заведомой недостижимости в таких приводах широких диапазонов регулирования или нецелесообразности такого регулирования.

Цель работы заключается в разработке структуры системы автоматизированного управления электроприводом переменного тока ШПУ с МДП и алгоритмов ее функционирования.

Задачи исследования:

1. Разработать математическую модель МДП для электропривода ШПУ и исследовать особенности применения МДП в ШПУ при большом диапазоне регулирования скорости.
2. Исследовать возможные способы реализации характерных для ШПУ режимов в электроприводе на основе МДП, разработать и исследовать способы расширения диапазона регулирования скорости МДП применительно к ШПУ.
3. Разработать систему автоматического регулирования скорости и алгоритм работы системы автоматизированного управления электроприводом переменного тока ШПУ на основе МДП.

Научная новизна:

1. Разработана и исследована математическая модель МДП при изменении амплитуды, частоты и фазы добавочного напряжения на роторе.
2. Получен закон, в соответствии с которым должен изменяться фазовый сдвиг напряжения на роторе для обеспечения максимальной жесткости механических характеристик МДП.
3. Предложен и исследован способ увеличения жесткости механических характеристик МДП за счет изменения частоты добавочного напряжения на роторе.
4. Разработан алгоритм работы системы логического управления электроприводом ШПУ, обеспечивающий регулирование скорости в диапазоне не менее 30:1 с сохранением перегрузочной способности МДП за счет управления амплитудой, частотой и фазой добавочного напряжения на роторе.
5. Разработана система автоматического регулирования скорости для электропривода ШПУ на основе МДП, обеспечивающая регулирование скорости МДП с сохранением ее перегрузочной способности за счет переключения между питанием ротора от управляемого преобразователя напряжения с коррекцией

частоты и от управляемого преобразователя тока с прямым управлением активной составляющей тока ротора.

Теоретическая и практическая значимость работы: полученная математическая модель МДП при изменении амплитуды, фазы и частоты добавочного напряжения на роторе может быть использована при анализе и синтезе систем управления электроприводом, а также для изучения свойств МДП. Полученные законы изменения фазы, амплитуды и частоты добавочного напряжения, обеспечивающие максимизацию момента машины, могут быть использованы для управления электроприводами на основе МДП. Полученный алгоритм функционирования и структура электропривода ШПУ на основе МДП могут быть использованы при модернизации электроприводов существующих ШПУ и проектировании новых. Результаты работы могут быть использованы в учебном процессе при реализации подготовки обучающихся бакалавриата, магистратуры и аспирантуры по направлениям 13.03.02, 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника, 11.03.04, 11.04.04 Электроника и наноэлектроника, 13.06.01 Электро- и теплотехника, а также по смежным направлениям.

Методология и методы исследования. При исследовании применялись положения и методы математического анализа, теории электропривода, теории автоматического управления, теоретических основ электротехники, методы математического и компьютерного моделирования, методы экспериментального исследования.

Положения, выносимые на защиту:

1. Разработанная математическая модель МДП адекватно описывает процессы электромеханического преобразования энергии и пригодна для применения в системах управления электроприводом.

2. Полученное уравнение взаимосвязи фазового сдвига добавочного напряжения на роторе с номинальной и текущей скоростями МДП позволяет увеличить момент за счет коррекции фазового сдвига, что позволяет повысить жесткость механических характеристик и реализовать регулирование скорости МДП в диапазоне не менее 30:1 с сохранением критического момента на требуемом уровне.

3. Предложенный способ увеличения жесткости механических характеристик МДП за счет изменения частоты добавочного напряжения на роторе позволяет увеличить диапазон регулирования скорости не менее чем до 30:1.

4. Предложенный алгоритм работы системы логического управления позволяет реализовать управление электроприводом ШПУ на основе МДП с диапазоном изменения скорости не менее 30:1 за счет сочетания работы МДП с управляемым преобразователем напряжения и управляемым преобразователем тока в цепи ротора.

5. Разработанная система автоматического регулирования скорости электропривода переменного тока ШПУ на основе МДП позволяет реализовать режимы работы, характерные для электропривода ШПУ, а также обеспечивает регулирование скорости машины в диапазоне не менее 30:1 с сохранением критического момента.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность результатов работы подтверждена математическим и физическим моделированием, а также экспериментальными исследованиями в лаборатории автоматизированного электропривода ООО «НИИ АЭМ СибГИУ», проведенными на опытной установке с МДП. По материалам диссертации были сделаны доклады на VI-VIII Всероссийских научно-практических конференциях «Автоматизированный электропривод и промышленная электроника» (2014–2018 гг.); I-III Всероссийских научно-практических конференциях «Энергетика и энергосбережение: теория и практика» (2015–2017 гг.); конференциях «Наукоемкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов» (2015–2019 гг.); Международной научно-практической конференции «Математическое и экспериментальное моделирование физических процессов» (2016 г.), X-XII Всероссийских научно-практических конференциях с международным участием «Системы автоматизации в образовании, науке и производстве» (2015–2019 гг.). Разработки по материалам диссертации награждены Золотыми медалями выставок «Уголь России и майнинг» (2016, 2017 гг.) и Серебряной медалью выставки «Уголь России и майнинг»-2019 (приложение А); дипломами конкурса научно-технических разработок молодых ученых ФГБОУ ВО СибГИУ (2016, 2018 гг.); дипломом конференции молодых ученых г. Новокузнецка (2018 г.); представлялись на конференции Всероссийского акселератора Generation S-2016.

Личный вклад автора заключается в построении и анализе математической модели МДП; разработке алгоритма работы системы логического управления электроприводом ШПУ на основе МДП; разработке системы автоматизированного регулирования скорости для электропривода ШПУ на основе МДП; экспериментальных и модельных исследованиях полученных моделей и алгоритмов.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 29 печатных работ, в том числе, 4 статьи в рецензируемых журналах, рекомендуемых ВАК, 6 статей в изданиях, индексируемых в базе SCOPUS.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы из 155 наименований, трех приложений. Общий объем диссертации составляет 143 страницы основного текста, 53 рисунка, 2 страницы списка сокращений и условных обозначений, 15 страниц списка литературы, 7 страниц приложений с 6 рисунками.

Соответствие Паспорту номенклатуры специальностей. Содержание диссертационной работы соответствует областям исследования 1 и 3 специальности 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы» Паспорта номенклатуры специальностей научных работников (технические науки).

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обосновывается актуальность выбранной темы диссертационного исследования, характеризуется степень ее разработанности, определяются цели и задачи исследования, описывается теоретическая и практическая значимость исследования.

Первая глава диссертации посвящена анализу современного состояния электропривода шахтных подъемных установок (ШПУ) с выделением основных особенностей асинхронного электропривода ШПУ, проблем его эксплуатации и модернизации, а также анализу путей модернизации асинхронного электропривода ШПУ и обоснованию использования машины двойного питания (МДП) в электроприводе ШПУ. На основе анализа кинематики и динамики ШПУ формулируются основные требования к электроприводу ШПУ: необходимость обеспечения режима растормаживания и движения на малой скорости, необходимость регулирования скорости в большом диапазоне с сохранением перегрузочной способности двигателя на всем диапазоне регулирования скорости, необходимость работы двигателя установки во всех квадрантах координатной плоскости «момент-скорость».

Также проводится анализ научно-технической литературы по теме диссертации, в ходе которого делается вывод о том, что теоретические и практические вопросы применения МДП в электроприводе механизмов с большим диапазоном регулирования скорости разработаны недостаточно. Показано, что существующие варианты практической реализации электропривода ШПУ на основе МДП не в полной мере соответствуют сформулированным требованиям к электроприводу ШПУ. Обосновывается необходимость в проведении исследований и разработке системы автоматизированного управления электроприводом ШПУ на основе МДП.

Вторая глава диссертации посвящена выбору математической модели машины двойного питания, исследованию процессов электромеханического преобразования энергии в ней и определению способов расширения диапазона регулирования скорости МДП.

Для получения уравнения механической характеристики МДП и анализа влияния на ее вид параметров добавочного напряжения в цепи ротора была рассмотрена Т-образная схема замещения машины и уравнение механической характеристики машины в виде:

$$M = \frac{2M_{KPe}}{s_{KPe}/s + s/s_{KPe}} \left[1 - \frac{U_R^*}{s} \left(\cos \delta + \frac{s}{s_{KPe}} \sin \delta \right) \right], \quad (1)$$

где M – момент машины, M_{KPe} – критический момент машины на естественной механической характеристике, s_{KPe} – критическое скольжение машины на естественной механической характеристике, s – текущее скольжение или относительная частота добавочного напряжения на роторе, U_R^* – приведенное к напряжению на статоре действующее значение добавочного напряжения на роторе, δ – фазовый сдвиг между напряжением на статоре и добавочным напряжением на роторе. Из выражения (1) следует, что момент машины зависит от амплитуды и фазового сдвига добавочного напряжения на роторе.

МДП может работать в двух режимах, отличающихся способом задания частоты добавочного напряжения на роторе. В асинхронном режиме частота добавочного напряжения равна частоте собственной ЭДС ротора, т.е. выполняется условие:

$$f_R = sf_S, \quad (2)$$

где f_R – частота добавочного напряжения на роторе, f_S – частота напряжения на статоре. В этом случае механические характеристики машины имеют вид, приведенный на рисунке 1а, момент машины содержит только асинхронную составляющую, а машина по своим свойствам аналогична асинхронному двигателю. В синхронном режиме частота добавочного напряжения на роторе устанавливается независимо от частоты собственной ЭДС ротора. Регулирование скорости машины в синхронном режиме затруднено, поэтому в диссертации предлагается режим частотной коррекции скорости машины. При этом скорость машины определяется частотой добавочного напряжения на роторе:

$$(\omega_{0э} - \omega) \pm \Delta\omega_k - (\omega_0 - \omega) = \Delta\omega, \quad (3)$$

где ω – угловая скорость вращения ротора, ω_0 – угловая скорость вращения поля статора, $\Delta\omega$ – приращение скорости машины.

Момент машины при коррекции частоты содержит две составляющие – асинхронную и синхронную, за счет чего жесткость механической характеристики МДП увеличивается. Механические характеристики МДП в при коррекции частоты приведены на рисунке 1б.

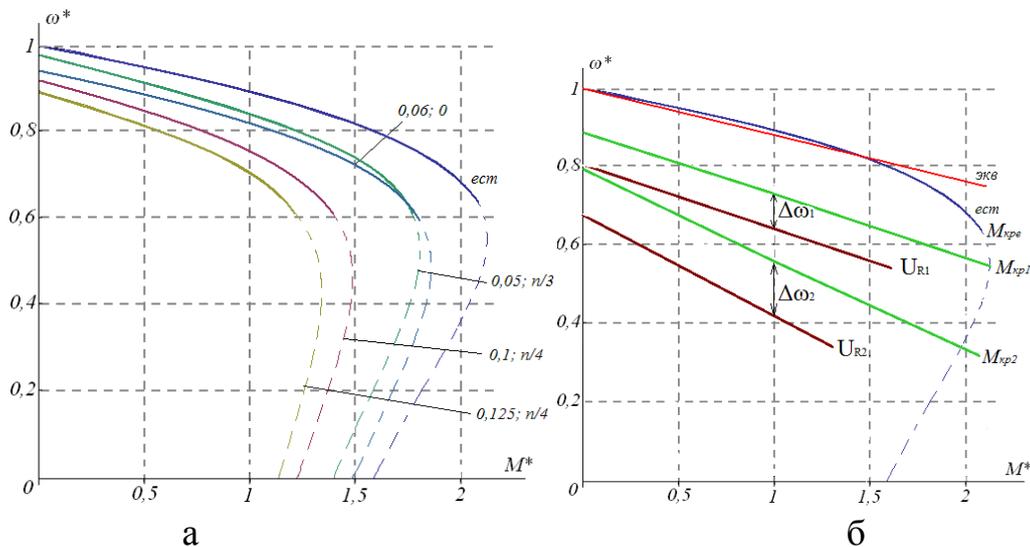


Рисунок 1 а – механические характеристики МДП в асинхронном режиме (скорости и моменты приведены к номинальным; цифры у характеристик обозначают относительную амплитуду и фазу встречно направленно для получения конкретной характеристики); б - механические характеристики МДП в синхронном режиме при различных значениях частоты добавочного напряжения на роторе

В асинхронном режиме диапазон регулирования скорости вниз от номинальной ограничен падением перегрузочной способности машины; в режиме частотной коррекции регулирование целесообразно в диапазоне скоростей $0-0,5\omega_{н}$, поскольку в этом диапазоне скоростей синхронная составляющая момента

имеет наибольшие значения. Таким образом, для достижения большого диапазона регулирования скорости целесообразна комбинация асинхронного режима и режима частотной коррекции.

Показано, что для математического описания МДП малоприспособны традиционно используемые для описания процессов в асинхронных двигателях системы координат α - β , d - q и x - y . Было предложено использование вращающейся ортогональной системы координат g - i , ось g которой ориентирована по изображающему вектору тока статора машины. При использовании системы координат g - i электромеханическое преобразование энергии в машине описывается следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} u_{Sg} = R_S i_{Sg} + L_S \frac{di_{Sg}}{dt} - L_\mu \frac{di_{Rg}}{dt} - \omega_g L_\mu i_{Ri}, \\ u_{Si} = -L_\mu \frac{di_{Ri}}{dt} + \omega_g L_S i_{Sg} - \omega_g L_\mu i_{Rg}, \\ u_{Rg} = R_R i_{Rg} + L_R \frac{di_{Ri}}{dt} + L_\mu \frac{di_{Sg}}{dt} - \omega_g s L_R i_{Ri}, \\ u_{Ri} = R_R i_{Ri} + L_R \frac{di_{Ri}}{dt} - \omega_g s L_R i_{Rg} + \omega_g s L_\mu i_{Sg}, \\ M = \frac{3}{2} z_{II} L_\mu i_{Sg} i_{Ri}, \end{cases} \quad (4)$$

где u_S , u_R – мгновенное значение напряжения статора и ротора соответственно; i_S , i_R – мгновенное значение статора и ротора соответственно; $\omega_g = \omega_0$ – скорость вращения системы координат g - i относительно неподвижной системы координат α - β ; R_S , R_R – активное сопротивление статора и ротора соответственно; L_S , L_R , L_μ – индуктивность статора, ротора и намагничивания машины соответственно; индексы g и i обозначают проекции на соответствующие оси выбранной системы координат.

Из уравнений системы (4) были получены передаточные функции обмоток двухфазной модели машины:

$$\begin{cases} i_{Sg} = \frac{1/R_S}{T_S p + 1} (u_{Sg} + p L_\mu i_{Rg} + \omega_g L_\mu i_{Ri}), \\ i_{Rg} = \frac{1/R_R}{T_R p + 1} (u_{Rg} - p L_\mu i_{Sg} + \omega_g s L_R i_{Ri}), \\ i_{Ri} = \frac{1/R_R}{T_R p + 1} (u_{Ri} + \omega_g s L_R i_{Rg} - \omega_g s L_\mu i_{Sg}), \\ M = \frac{3}{2} z_{II} L_\mu i_{Sg} i_{Ri}, \\ M - M_C = J_\Sigma \frac{d\omega}{dt}, \end{cases} \quad (5)$$

где $T_S = \frac{L_S}{R_S}$ – постоянная времени статора; $T_R = \frac{L_R}{R_R}$ – постоянная времени ротора; z_{II} – число пар полюсов машины; M_C – момент нагрузки на валу машины;

J_{Σ} – суммарный приведенный к валу машины момент инерции электропривода. Системе уравнений (5) соответствует структурная схема машины, приведенная на рисунке 2.

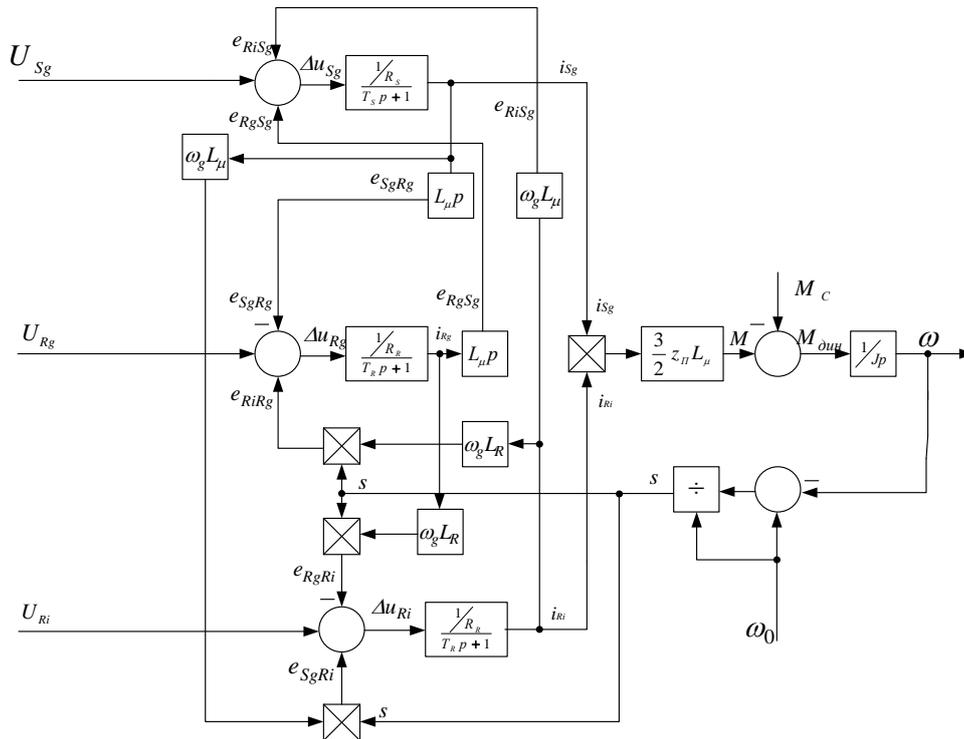


Рисунок 2 – Структурная схема машины двойного питания в системе координат, связанной с током статора

На рисунке 2 приняты следующие обозначения: e_{RgSg} – проекция на ось g ЭДС, наводимой магнитным потоком обмотки фазы g ротора в фазе g статора; e_{RiSg} – проекция на ось g ЭДС, наводимой магнитным потоком фазы i ротора в фазе g статора и обусловленной вращением ротора в поле статора; e_{SgRg} – проекция на ось g ЭДС, наводимой магнитным потоком фазы g статора в фазе g ротора; e_{RiRg} – проекция на ось g ЭДС, наводимой магнитным потоком фазы i ротора в фазе g ротора и обусловленной вращением ротора; e_{RgRi} – проекция на ось i ЭДС, наводимой магнитным потоком фазы g ротора в фазе i ротора и обусловленной вращением ротора; e_{SgRi} – проекция на ось i ЭДС, наводимой магнитным потоком фазы g статора в фазе i ротора и обусловленной вращением ротора в поле статора.

Было показано, что с учетом принятых допущений, структурная схема машины в асинхронном режиме принимает вид, показанный на рисунке 3; k_E – коэффициент внутренней обратной связи машины по ЭДС ротора.

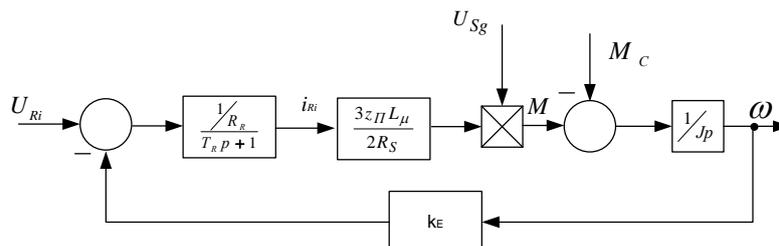


Рисунок 3 – Эквивалентная структурная схема машины двойного питания в асинхронном режиме

При применении частотной коррекции машина описывается следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} M = \left(\frac{C_{эм}}{p} + \beta \right) (\omega_0 - \omega), \\ \omega = \frac{M - M_c}{Jp}, \end{cases} \quad (6)$$

где $M_{ном}$ – номинальный момент двигателя, M_c – критический момент двигателя, s_k – критическое скольжение двигателя, $\theta_{ном} = \frac{3L_\mu U_S}{\omega_0 L_S \sqrt{R_R^2 + X_K^2 s^2}}$ – номинальный внутренний угол нагрузки машины.

Полученная в результате проведенных исследований структурная схема МДП с учетом (3), (5) и (6) приведена на рисунке 4.

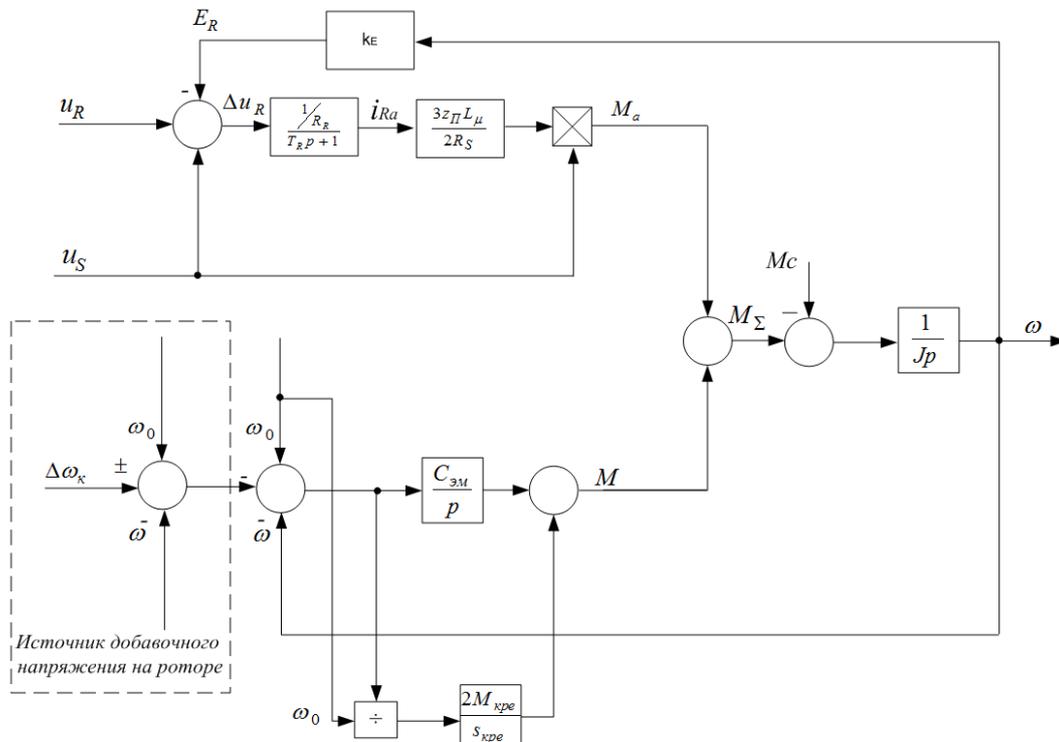


Рисунок 4 – Структурная схема машины двойного питания

Для полученной модели были проведены модельные исследования. По результатам модельных исследований был сделан вывод о том, что динамические свойства машины в асинхронном режиме аналогичны свойствам асинхронного двигателя, при этом в режиме частотной коррекции они приближаются к свойствам синхронного (значительно увеличивается жесткость рабочего участка механической характеристики). Растормаживание под номинальной нагрузкой невозможно ни в асинхронном режиме, ни в режиме частотной коррекции. Исходя из этого, был сделан вывод о необходимости дополнительного технического решения для реализации растормаживания и движения машины на малой скорости.

Третья глава диссертации посвящена разработке алгоритма управления и синтезу системы управления электроприводом на основе МДП с сочетанием различных режимов ее работы. Для реализации растормаживания машины и движения ее на малой скорости было предложено подключение к цепи ротора управляемого преобразователя тока (УПТ) на основе неуправляемого выпрямителя, резистора с большим сопротивлением и полупроводникового силового ключа, осуществляющего параметрическое регулирование активной составляющей тока ротора машины. Структурная схема такого регулирования приведена на рисунке 5.

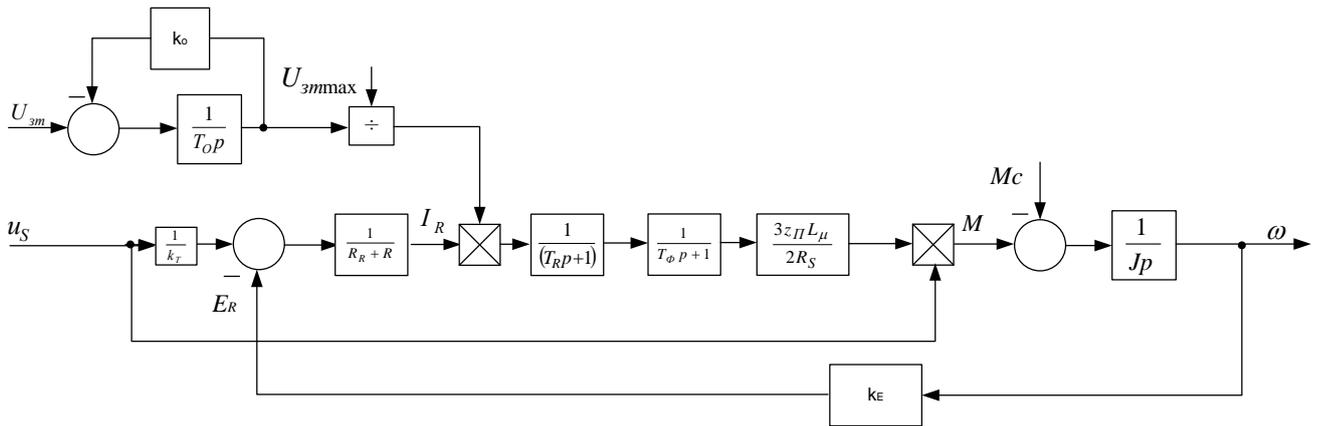


Рисунок 5 – Структурная схема МДП при подключении к цепи ротора УПТ

В главе 2 было показано, что момент машины зависит от амплитуды и фазы добавочного напряжения, однако его регулирование осуществляется изменением амплитуды, поскольку фаза влияет только на жесткость рабочих участков механических характеристик машины в асинхронном режиме. На основе анализа уравнения механической характеристики машины (1) было получен закон изменения фазы добавочного напряжения для максимизации асинхронной составляющей момента МДП:

$$\delta = \arctg\left(\frac{s}{s_{KPe}}\right), \quad (7)$$

где s – текущее скольжение или относительная частота ЭДС ротора (в синхронном режиме).

Также было получено выражение для оптимального значения приращения частоты при частотной коррекции:

$$\Delta\omega = \frac{M_n s_{KPe} \omega_0 - 0,5(\omega_0 - \omega) M_{KPe}}{2M_{KPe}}. \quad (8)$$

На основе анализа механических характеристик МДП в асинхронном режиме и режиме частотной коррекции был сделан вывод о том, что в зависимости от пределов регулирования частоты добавочного напряжения на роторе и ее

приращения, диапазон регулирования скорости МДП при комбинации асинхронного режима, режима частотной коррекции и с параметрическим регулированием скоростью с помощью УПТ, может быть оценен как 30:1-40:1.

Сочетание режимов работы МДП для электропривода ШПУ целесообразно организовать следующим образом:

1. Для достижения большого диапазона регулирования скорости в электроприводе ШПУ следует комбинировать асинхронный режим и режим частотной коррекции с режимом работы от УПТ.

2. Для работы машины в диапазоне $0 \leq \omega \leq 0,1\omega_0$ целесообразно применение управляемого преобразователя тока в цепи ротора, поскольку он обеспечивает режим растормаживания и возможность работы с постоянными производными скорости и момента.

При использовании предлагаемого способа управления рабочие зоны механических характеристик имеют вид, приведенный на рисунке 7.

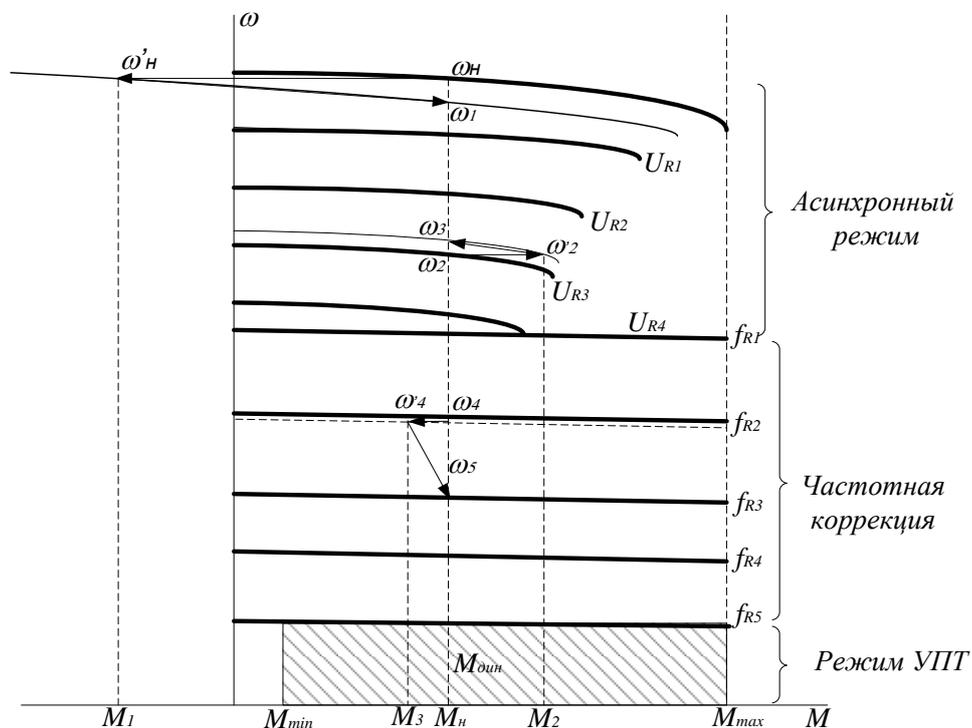


Рисунок 7 – Рабочие зоны механических характеристик МДП при сочетании режимов работы

На рисунке 7 также показаны переходы между механическими характеристиками, соответствующими разным скоростям привода. При торможении увеличением амплитуды добавочного напряжения на роторе в асинхронном режиме текущая скорость оказывается выше скорости идеального холостого хода на новой характеристике. При этом рабочая точка ω_n смещается во второй квадрант (точка ω'_n), и привод развивает тормозной момент, находясь в режиме рекуперации. Под действием этого момента скорость машины уменьшается до заданной скорости ω_l . Разгон машины в асинхронном режиме осуществляется аналогично. В режиме частотной коррекции при увеличении частоты и амплитуды добавочного напряжения уменьшается момент привода, и происходит торможение машины до заданной скорости по траектории $\omega_4 - \omega'_4 - \omega_5$.

Структурная схема электропривода ШПУ на основе машины двойного питания приведена на рисунке 8. При этом режимы работы МДП определяются следующими выражениями:

$$\begin{cases} K = 0 - \text{ ротор подключен к источнику напряжения,} \\ K = 1 - \text{ ротор подключен к УПТ.} \end{cases} \quad (9)$$

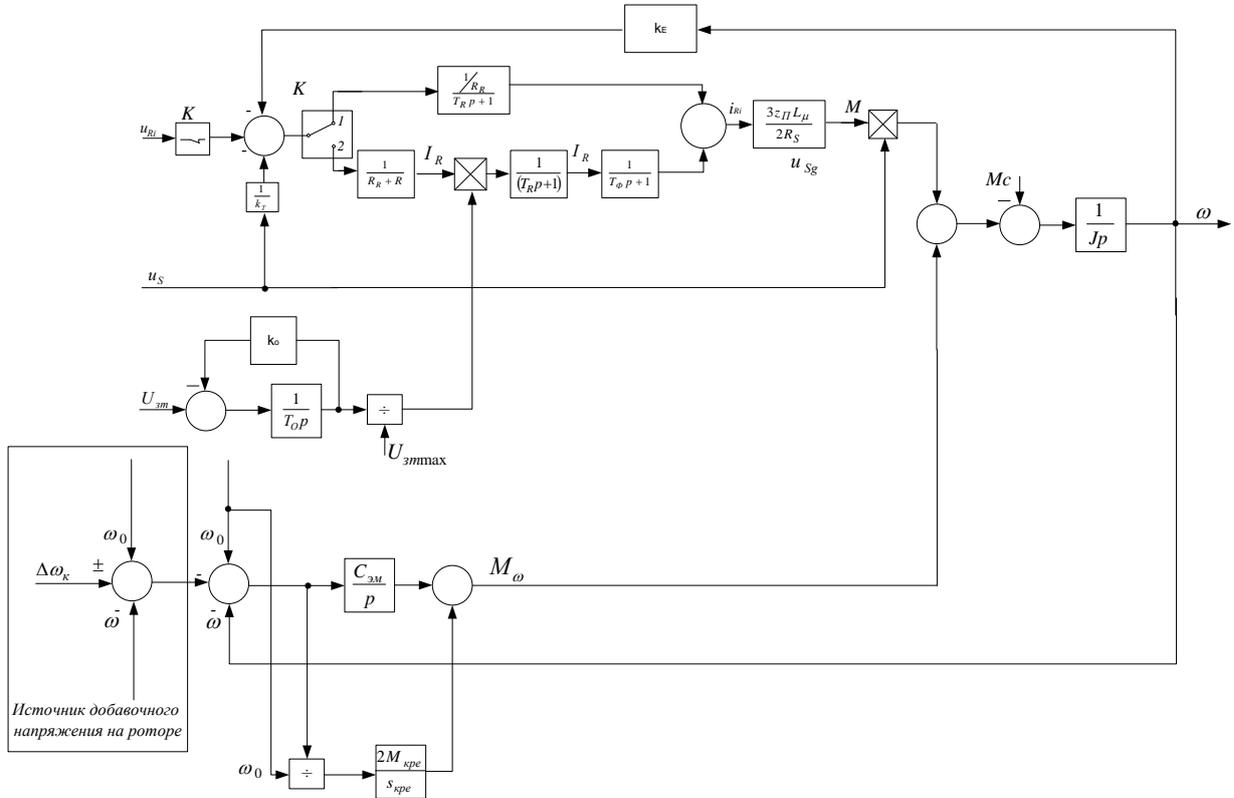


Рисунок 8 – Структурная схема электропривода ШПУ с переменной структурой на основе машины двойного питания

На основании предложенного способа управления и структуры, приведенной на рисунке 8, был разработан алгоритм функционирования системы логического управления приводом, граф-схема которого приведена на рисунке 9.

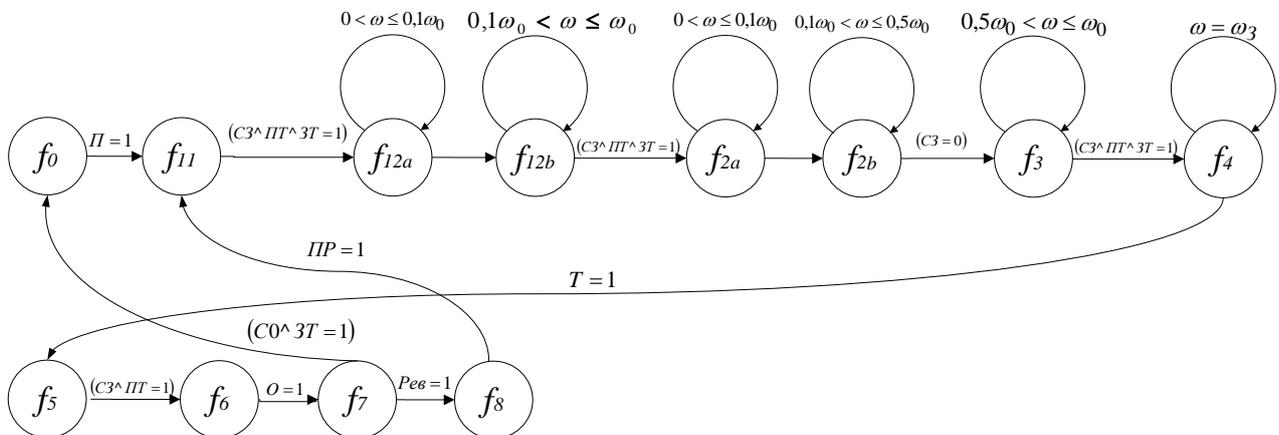


Рисунок 9 – Граф-схема алгоритма работы системы логического управления (СЛУ) предлагаемой системы электропривода

Каждой вершине граф-схемы алгоритма соответствует выражение, включающее в себя закон формирования параметров добавочного напряжения на роторе и логические условия, описанные в тексте работы и не включенные в автореферат по причине значительного объема.

Для описания дополнительно были введены логические переменные:

$f(K)$ – переменная замыкания ключа в цепи ротора, описанная в п. 2.1 настоящей работы; Π – переменная, принимающая значение 1 при наличии сигнала пуска привода из остановленного состояния и значение 0 при отсутствии этого сигнала; T – переменная, принимающая значение 1 при наличии сигнала торможения привода и значение 0 при отсутствии этого сигнала; O – переменная, принимающая значение 1 при наличии сигнала останова привода и значение 0 при отсутствии этого сигнала; $Рев$ – переменная, принимающая значение 1 при наличии сигнала реверса привода и значение 0 при отсутствии этого сигнала; ΠP – переменная, принимающая значение 1 при переключении реверсора; $C3$ – переменная, определяющая достижение машиной заданной скорости вращения ротора; ΠT – переменная, определяющая равенство 0 производной по времени активной составляющей тока ротора; $3T$ – переменная, определяющая знак активной составляющей тока ротора; CK – переменная, определяющая достижение машиной критической скорости вращения ротора; $C0$ – переменная, определяющая достижение машиной нулевой скорости вращения ротора; TM – переменная, определяющая, снят или наложен механический тормоз; ω_n – номинальная скорость машины на естественной характеристике; ω_3 – заданная системой управления скорость машины; $\omega_{кр} = 0,5\omega_0$ – скорость, соответствующая переходу из асинхронного в синхронный режим; A – максимальный темп изменения амплитуды добавочного напряжения на роторе, В/с; B – максимальный темп изменения частоты добавочного напряжения на роторе, с⁻².

Помимо предложенного алгоритма управления, были синтезированы регуляторы для системы управления электропривода, позволяющие скорректировать качество переходных процессов. Уравнения, связывающие вход и выход синтезированного регулятора тока ротора, имеют вид:

$$\begin{cases} U_{3U} = U_{3M} \frac{2R_S R_R (T_R p + 1)}{6U_S z_{\Pi} L_{\mu} k_{\Pi} k_M p}, 0,1\omega_0 < \omega \leq \omega_0; \\ U_{3i} = k_M U_{3M}, 0_0 \leq \omega \leq 0,1\omega_0. \end{cases} \quad (10)$$

Регулятор тока имеет переменную структуру и переменные параметры. Первое уравнение (10) описывает регулятор момента в режиме МДП, второе – в режиме УПТ. Уравнения получены на основе установленной работе функциональной связи тока ротора машины и развиваемого ей момента.

Передачная функция регулятора скорости имеет вид:

$$W_{PC} = k_{PC} = \frac{Jk_M}{12T_{\Pi}k_{\omega}} \quad (11)$$

Регулятор скорости имеет переменный коэффициент передачи в зависимости от режима работы машины и приведенного момента инерции на валу машины.

В четвертой главе диссертации приводятся предлагаемые схемы электропривода шахтной подъемной установки на основе машины двойного питания, составляется компьютерная модель электропривода ШПУ и системы его управления в соответствии с предложенными схемами и алгоритмом управления, а также проводятся экспериментальные исследования и приводится технико-экономическое обоснование применения машины двойного питания в электроприводе на примере подъемной установки ЦЗ,5х2,4 Абаканского филиала ОАО «Евразруда». Также обосновывается возможность и необходимость интеграции предлагаемого электропривода ШПУ на основе МДП в управляюще-вычислительный комплекс подъемной установки, разработанный в ООО «НИИ АЭМ СибГИУ».

Упрощенная схема предлагаемого электропривода подъемной установки приведена на рисунке 10.

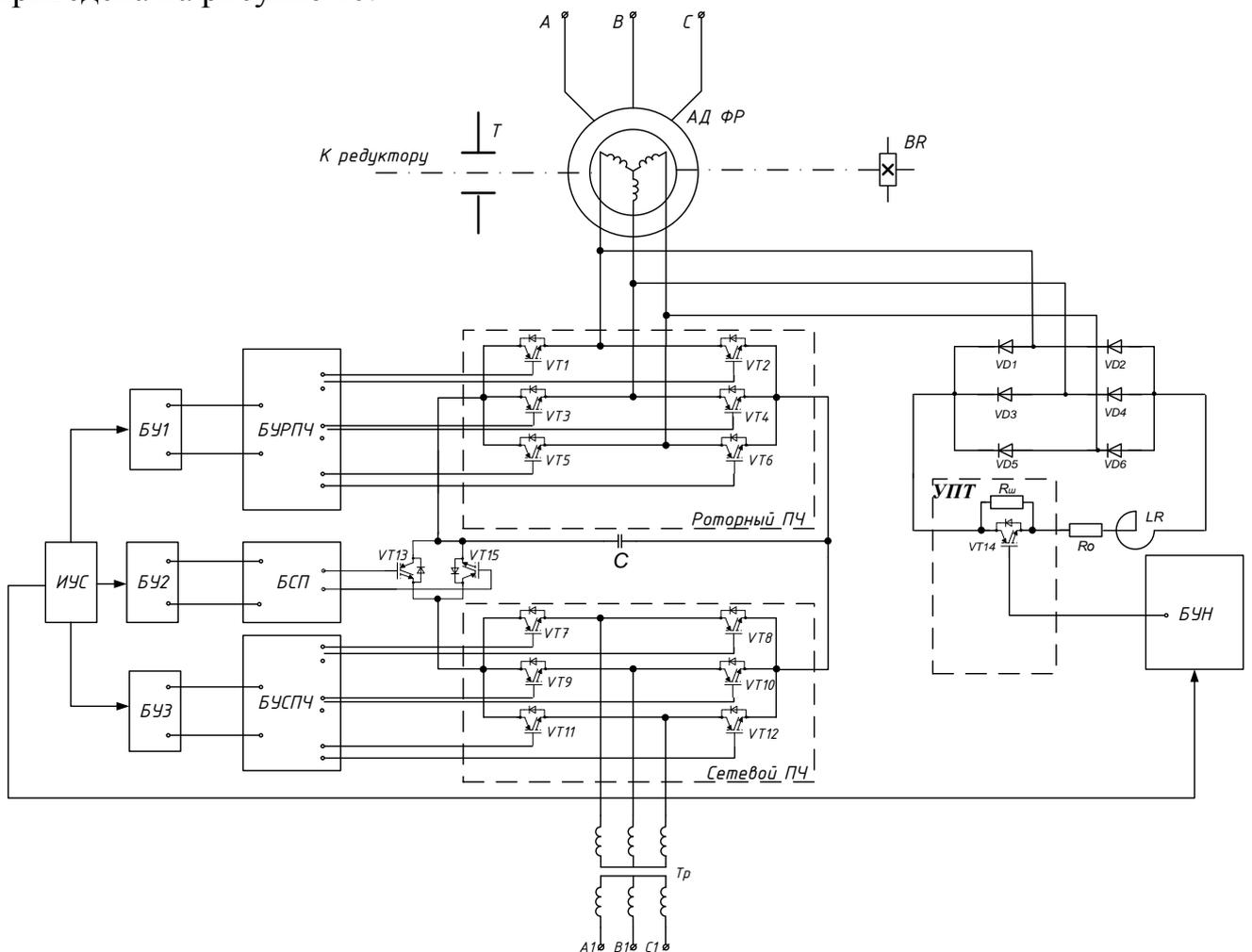


Рисунок 10 – Упрощенная схема предлагаемого электропривода ШПУ на основе МДП

На рисунке 10 приняты следующие обозначения: ИУС – информационно-управляющая система, БУ1-БУ3 – блоки управления, БУРПЧ, БУСПЧ – блоки управления роторным и сетевым преобразователями частоты соответственно,

БУН – блок управления нагрузкой, Т – механический тормоз. Результаты экспериментальных исследований привода приведены на рисунке 11.

На рисунке 11 представлено сравнение переходных процессов модели с переходными процессами реального привода установки ЦРЗ,5х2,4. По результатам моделирования, приведенным на рисунке 11, видно, что СЛУ и САРС осуществляют управление электроприводом на основе МДП с соблюдением требований к ЭП ШПУ.

На графиках, приведенных на рисунке 11, выделяются следующие участки работы подъемной машины:

1. Режим растормаживания. Видно, что существующий привод с роторной станцией и предлагаемый привод с машиной двойного питания обеспечивают режим растормаживания, удерживая подъемный сосуд при нулевой скорости за счет формируемого электромагнитного момента.
2. Начало движения, разгон и движение на минимальной скорости. Предлагаемый привод на основе МДП обеспечивает равномерный разгон и движение сосуда на малой скорости, в то время как существующий привод с ручным управлением не обеспечивает равномерного ускорения и постоянства малой скорости на этом участке (на графике виден «провал» скорости с одновременными колебаниями момента привода).
3. Разгон до максимальной скорости. Видно, что и существующий, и предлагаемый привод обеспечивают равномерный разгон машины с требуемым ускорением.
4. Движение на установившейся скорости. Предлагаемый привод поддерживает максимальную установившуюся скорость постоянной; в существующем приводе скорость также поддерживается постоянной с незначительными колебаниями. При этом на осциллограмме присутствуют колебания тока ротора (момента).
5. Торможение до малой скорости. Предлагаемый привод обеспечивает равномерное замедление подъемного сосуда, в то время, как в существующем из-за переключения ступеней роторной станции возникают значительные колебания момента, а скорость изменяется неравномерно, с участками с различным по модулю и знаку ускорениями.
6. Движение на малой скорости и останов. Режим аналогичен участку 2 с теми же замечаниями к реальному приводу

Режим удержания сосуда до наложения механического тормоза. Предлагаемый привод обеспечивает сохранение нулевой скорости сосуда за счет развиваемого момента. В реальном приводе, по видимому, из-за недостаточно точного останова сосуда скорость несколько раз менялась с колебаниями, в осциллограмме момента также присутствуют значительные колебания. После окончания движения привод удерживал сосуд до наложения тормоза.

Таким образом, проведенное моделирование показало реализуемость предложенного в главе 3 алгоритма функционирования привода и возможность управления МДП в функции скорости с переключением асинхронного и синхронного режимов работы. По приведенным на рисунке 11 графикам видно, что осуществляется глубокое регулирование скорости машины с сохранением перегрузочной способности машины и обеспечением необходимого по технологическим условиям динамического момента привода.



Рисунок 11 – Сравнение переходных процессов модели с переходными процессами реального привода установки ЦР3,5х2,4

Из изложенного в следует, что алгоритм управления МДП, предложенный в главе 3 настоящей работы, обеспечивает регулирование скорости машины в диапазоне не менее 30:1 с сохранением перегрузочной способности машины. При этом переключения структуры САРС, соответствующие переходам между режимами работы машины, не вызывают колебаний скорости и момента машины. Таким образом, доказана работоспособность предложенного алгоритма управления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные в диссертационной работе теоретические и экспериментальные исследования позволили сформулировать следующие результаты, имеющие значение для теории электропривода и горнодобывающей промышленности России:

1. Предложена методика построения математической модели машины двойного питания; получена эквивалентная модель машины с компенсацией ЭДС.
2. Получено условие максимизации момента машины двойного питания по фазе добавочного напряжения на роторе.
3. Сформирован алгоритм работы системы логического управления электропривода подъемной установки, предназначенный для переключения режимов машины двойного питания и обеспечивающий диапазон регулирования скорости не менее 30:1 с сохранением перегрузочной способности машины двойного питания на всем диапазоне регулирования скорости за счет переключения между асинхронным и синхронным режимами работы машины, а также режимом прямого управления активной составляющей тока ротора.
4. Разработана система автоматического регулирования скорости для электропривода подъемной установки на основе машины двойного питания, обеспечивающая введение корректирующей синхронной составляющей момента, коррекцию фазового сдвига добавочного напряжения на роторе при изменении скорости, а также прямое управления активной составляющей тока ротора.
5. Проведена модельная и экспериментальная проверка работоспособности и эффективности полученной структуры и алгоритмов функционирования САРС. Были получены следующие результаты, имеющие теоретическую и практическую значимость: полученная математическая модель машины двойного питания с управляемыми преобразователями напряжения и тока в цепи ротора может быть использована для описания процессов электромеханического преобразования энергии в машине двойного питания во всех режимах работы. Полученные законы изменения фазы, амплитуды и частоты добавочного напряжения для максимизации момента машины могут быть использованы для управления электроприводами на основе машины двойного питания.

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы:

Дальнейшие исследования электроприводов на основе машины двойного питания могут проводиться в направлении реализации управления реактивной мощностью машины, изучения рекуперации энергии в цепях статора и ротора машины и управления этим процессом.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендуемых ВАК Министерства науки и высшего образования Российской Федерации:

1. Островлянчик В.Ю. Измерение координат асинхронного двигателя в цифровых информационно–управляющих системах / В. Ю. Островлянчик, **И. Ю. Поползин** // Вестник НГТУ. – 2015. – №4(61). – с. 7–20. DOI: 10.17212/1814–1196–2015–4–7–20
2. Островлянчик В.Ю. Модель асинхронного двигателя для бездатчиковых информационно–управляющих систем автоматизированного электропривода / В. Ю. Островлянчик, **И. Ю. Поползин** // Вестник КузГТУ. – 2016. – №1(113). – с. 110–119.
3. Островлянчик В.Ю. Исследование магнитной системы асинхронного двигателя при частотном управлении / В. Ю. Островлянчик, **И. Ю. Поползин** // Вестник КузГТУ. – 2016. – №2(114). – с. 75–84.
4. Управляемый преобразователь тока для электропривода шахтной подъемной установки на основе машины двойного питания / В.Ю. Островлянчик, **И.Ю. Поползин**, Д.А. Маршев, А.В. Толстых, А.В. Дроздова // Горное оборудование и электромеханика. – 2019. – №1. – С. 40–46.

Публикации в изданиях, индексируемых наукометрической базой SCOPUS:

5. Ostrovlyanchik, V.Yu. Mechanical characteristics of a double–fed machine in asynchronous mode and prospects of its application in the electric drive of mining machines / V.Yu. Ostrovlyanchik, **I. Yu. Popolzin**, V. A. Kubarev, D. A. Marshev // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2017 . – Vol. 84. – P. 1–9 (012030). DOI: 10.1088/1755–1315/84/1/012030.
6. Ostrovlyanchik, V.Yu Equivalent model of a dually–fed machine for electric drive control systems / V.Yu. Ostrovlyanchik, **I. Yu. Popolzin** // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018 . – Vol. 354.. – P. 1–7 (012017). DOI: 10.1088/1757–899X/354/1/012017.
7. Ostrovlyanchik, V.Yu. Operation algorithm of the hoist electric drive based on a doubly–fed machine with combined control / V.Yu. Ostrovlyanchik, **I. Yu. Popolzin**, V. A. Kubarev // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2018 . – Vol. 206. – P. 1–9 (012040). DOI: 10.1088/1755–1315/206/1/012040.
8. Ostrovlyanchik, V.Yu. Mechanical characteristics of the doubly–fed machine and its use in the hoist electric drive / V.Yu. Ostrovlyanchik, **I. Yu. Popolzin**, D. A. Marshev // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2018 . – Vol. 206. – P. 1–8 (012028). DOI: 10.1088/1755–1315/206/1/012028.
9. Ostrovlyanchik, V. Y. Algorithmic structure of control system of mine winder electric drive with a doubly–fed motor / V. Yu. Ostrovlyanchik, **I. Yu. Popolzin** // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2019. – Vol. 377. [012042, 8 p.]. – DOI: 10.1088/1755–1315/377/1/012042.
10. Ostrovlyanchik, V. Y. Equivalent structure of a double–fed induction motor with a change in frequency of additional voltage for electric drive systems of mine winders / V. Yu. Ostrovlyanchik, **I. Yu. Popolzin** // IOP Conference Series: Earth

Публикации в других изданиях:

11. Островляничик В. Ю. Сравнительный обзор способов управления асинхронным двигателем с фазным ротором / В. Ю. Островляничик, **И. Ю. Поползин** // Энергетика и энергосбережение: теория и практика : материалы II Всероссийской научно–практической конференции, 2–4 декабря 2015 г. – Кемерово, 2015.
12. Островляничик В. Ю. Асинхронный электропривод шахтной подъемной установки, построенный по схеме машины двойного питания с комбинированным управлением / В. Ю. Островляничик, **И. Ю. Поползин** // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов. – 2016. – № 2. с. 303–309.
13. Островляничик В. Ю. Математическая модель асинхронного двигателя для измерения электромагнитного момента / В. Ю. Островляничик, **И. Ю. Поползин** // Вестник Приамурского государственного университета им. Шолом-Алейхема. – 2016. – №4(25), с.66–72
14. Островляничик В. Ю. Механические характеристики машины двойного питания в асинхронном режиме и перспективы его применения в электроприводе рудничных машин / В. Ю. Островляничик, **И. Ю. Поползин**, В. А. Кубарев, Д. А. Маршев // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов. 2017. – №3. – с. 298–304.
15. Островляничик В. Ю. Алгоритм функционирования электропривода шахтной подъемной установки на основе машины двойного питания с комбинированным управлением / В. Ю. Островляничик, **И. Ю. Поползин**, В. А. Кубарев // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов. 2018. №4. – с. 347–352.
16. Островляничик В. Ю. Механические характеристики машины двойного питания и ее применение в электроприводе шахтных подъемных установок / В. Ю. Островляничик, **И. Ю. Поползин**, Д. А. Маршев // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов. – №4. 2018. – с. 255–261.
17. Островляничик В. Ю. Способы управления асинхронным электроприводом шахтных подъемных установок / В. Ю. Островляничик, **И. Ю. Поползин** // Автоматизированный электропривод и промышленная электроника : труды седьмой Всероссийской научно–практической конференции, 23–24 ноября 2016 г. – Новокузнецк : СибГИУ : Изд. центр СибГИУ, 2016. – С. 192–201
18. Островляничик В. Ю. Обобщенный алгоритм управления электроприводом шахтной подъемной установки с машиной двойного питания / В. Ю. Островляничик, **И. Ю. Поползин** // Автоматизированный электропривод и промышленная электроника : труды седьмой Всероссийской научно–практической конференции, 23–24 ноября 2016 г. – Новокузнецк : СибГИУ : Изд. центр СибГИУ, 2016. – С. 192–201.
19. Островляничик В. Ю. Исследование механических характеристик электропривода переменного тока на основе машины двойного питания в асинхронном режиме / В. Ю. Островляничик, **И. Ю. Поползин** //

- Автоматизированный электропривод и промышленная электроника : труды седьмой Всероссийской научно–практической конференции, 23–24 ноября 2016 г. – Новокузнецк : СибГИУ : Изд. центр СибГИУ, 2016. – С. 55–66.
20. Островлянчик В. Ю. Исследование механических характеристик машины двойного питания в синхронном режиме / В. Ю. Островлянчик, **И. Ю. Поползин**, Д. А. Маршев // Автоматизированный электропривод и промышленная электроника : труды седьмой Всероссийской научно–практической конференции, 23–24 ноября 2016 г. – Новокузнецк : Изд. центр СибГИУ, 2016. – С. 66–78.
 21. Островлянчик В. Ю. Математическая модель машины двойного питания в подвижной самоориентирующейся системе координат / В. Ю. Островлянчик, **И. Ю. Поползин** // Автоматизированный электропривод и промышленная электроника : труды седьмой Всероссийской научно–практической конференции, 23–24 ноября 2016 г. – Новокузнецк : СибГИУ : Изд. центр СибГИУ, 2016. – С. 79–87.
 22. Островлянчик В. Ю. Эквивалентная модель машины двойного питания для систем управления электроприводом / В. Ю. Островлянчик, **И. Ю. Поползин**. – Системы автоматизации в образовании, науке и производстве AS2017 : труды XI Всероссийской научно–практической конференции (с международным участием), 14–16 декабря 2017 г.. – Новокузнецк : Издательский центр СибГИУ, 2017. – С. 381–385
 23. Дроздова А. В. Математическая модель машины двойного питания во вращающейся системе координат, связанной с ротором / А. В. Дроздова, **И. Ю. Поползин** // Новая наука: теоретический и практический взгляд : сборник материалов Международной научно–практической конференции, 10 ноября 2017 г. – Владивосток, 2017. – С. 232–240.
 24. **Поползин И. Ю.** Обзор способов управления скоростью асинхронных двигателей и преимущества машины двойного питания / **И. Ю. Поползин**, А. В. Дроздова // Инновационное развитие науки и образования : сборник статей международной научно–практической конференции, 15 февраля 2018 г. – Пенза : МЦНС Наука и Просвещение. – Ч. 1. – С. 136–139.
 25. Дроздова А. В. Энергетические режимы машины двойного питания и асинхронно–вентильного каскада / А. В. Дроздова, **И. Ю. Поползин** // Наука и инновации в современных условиях : сборник статей по итогам Международной научно–практической конференции, Оренбург, 8 марта 2018 г. – Стерлитамак : АМИ, 2018. – Ч. 2. – С. 121–126.
 26. Островлянчик, В. Ю., **Поползин И. Ю.** Эквивалентная структура асинхронного двигателя с двойным питанием с изменением частоты добавочного напряжения для систем электропривода шахтных подъемных установок / В. Ю. Островлянчик, **И. Ю. Поползин** // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов : научный журнал. – 2019. – № 5. – С. 302–307.
 27. Островлянчик, В. Ю., **Поползин И. Ю.** Алгоритмическая структура системы управления электроприводом подъемной машины с двигателем двойного питания / В. Ю. Островлянчик, **И. Ю. Поползин** // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов : научный журнал. – 2019. – № 5. – С. 307–312.

Личный вклад автора в работах, выполненных в соавторстве: [1-8; 10; 14; 22; 23] – разработка и экспериментальные исследования модели электромеханического преобразования энергии в двигателе, уравнений и структурных схем; [7; 9; 15; 18; 27] – разработка алгоритма управления электроприводом; [9; 16; 26] – получение выражений для механических характеристик машины и их анализ; получение условия максимизации момента МДП по фазе добавочного напряжения на роторе; получение оптимального значения приращения частоты; [17; 20; 21] – получение выражений для механических характеристик машины и их анализ; [12] – разработка схемы электропривода с переменной структурой и принципа управления; [11; 17; 24] – сравнительный анализ способов управления асинхронным двигателем; [23] – получение дифференциальных уравнений преобразования энергии в машине; [25] – описание энергетических режимов машины двойного питания.

Подписано в печать 03.07.2020. Формат 60 x 84 1/16.
Бумага офсетная. Отпечатано на ризографе.
Печ. л. 1.14. Тираж 100 экз. Заказ № _____
СибГИУ, 654007, Новокузнецк, ул. Кирова, 42.

ООО «НИИ АЭМ СибГИУ», 654007, Новокузнецк, ул. Кирова, 42.