## **УТВЕРЖДАЮ**

Проректор по научной работе ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет»,

доктор технических наук, доцент

В. Брованов

(03) 02 2020 T

#### ОТЗЫВ

ведущей организации — Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» на диссертационную работу Поползина Ивана Юрьевича «Автоматизированная система управления электроприводом переменного тока шахтной подъемной установки на основе машины двойного питания», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 — «Электротехнические комплексы и системы»

# 1. Структура и объем диссертационной работы

Диссертационная работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский государственный индустриальный университет» (СибГИУ). Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы из 155 источников и приложений. Работа изложена на 143 страницах основного текста, который поясняется 53 рисунками.

# 2. Анализ содержания диссертационной работы

**Во введении** обосновывается актуальность выбранной темы диссертационного исследования, характеризуется степень ее проработанности предшественниками, определяются цели и задачи исследования, описывается теоретическая и практическая значимость исследования и научные положения, выносимые на защиту.

В первой главе выполнен анализ современного состояния электропривода шахтных подъемных установок (ШПУ) с выделением основных особенностей асинхронного электропривода с фазным ротором для ШПУ, проблем его эксплуатации и модернизации; выполнены анализ путей модернизации асинхронного электропривода с фазным ротором для ШПУ и обоснование использования машины двойного питания (МДП) в электроприводе ШПУ; проведен анализ существующей научно-технической литературы и публикаций, отмечено, что вопрос применения МДП в электроприводе с широким диапазоном регулирования скорости разработан недостаточно.

Во второй главе выполнен выбор математической модели МДП, исследованы процессы электромеханического преобразования энергии в ней и определены способы расширения диапазона регулирования скорости МДП: выделены специфические для МДП режимы работы; представлены полученные уравнения электромеханического преобразования энергии; построена структурная схема МДП во вращающейся самоориентирующейся системе координат, связанной с обобщенным вектором тока статора машины; получена эквивалентная структурная схема МДП для применения в системах управления; проанализированы статические и динамические характеристики МДП при изменении параметров добавочного напряжения на роторе; сделан вывод о необходимости чередования режимов работы и алгоритмов управления МДП для расширения диапазона регулирования скорости электропривода.

В третьей главе выполнены разработка алгоритма управления и синтез системы управления электроприводом на основе МДП с сочетанием различных режимов ее работы: для реализации режима растормаживания и движения на малой скорости, а также для повышения надежности привода предложено использование управляемого преобразователя тока в цепи ротора; был получен закон изменения фазы добавочного напряжения в зависимости от скорости для максимизации асинхронной составляющей момента; получено выражение для оптимального значения приращения частоты при частотной коррекции; показано, что диапазон регулирования скорости МДП при комбинации асинхронного режима, режима частотной коррекции и параметрического регулирования при помощи преобразователя тока может быть оценен как 30:1-40:1; разработан алгоритм управления электроприводом шахтной подъемной установки на основе МДП для реализации указанной комбинации режимов; предложена структурная схема системы автоматизированного управления приводом и рассчитаны регуляторы для нее.

В четвертой главе приводятся предлагаемые схемы электропривода шахтной подъемной установки на основе МДП, 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 МДП в реальном электроприводе на примере подъемной установки Ц3,5х2,4 Абаканского филиала ОАО «Евразруда».

**В заключении** сформулированы основные научные и практические результаты работы, а также перспективы их дальнейшего развития.

# 3. Актуальность темы диссертационной работы

Актуальность работы обусловлена необходимостью модернизации существующих асинхронных электроприводов ШПУ. Очевидно, что качество работы подъемных установок в значительной мере определяет производитель-

ность горнодобывающих предприятий. Кроме того, электроприводы подъемных установок являются одними из наиболее мощных потребителей электрической энергии на предприятиях, а диапазон регулирования их скорости может достигать 30-60:1.

На большинстве подобных установок (особенно актуально для Кемеровской области) используются схемы управления скоростью движения сосудов на основе асинхронного двигателя с фазным ротором (АДФР) и роторной станцией, для которых характерны значительные потери энергии на нагрев добавочных сопротивлениях станции. Это приводит к непроизводительным расходам электрической энергии и существенному снижению энергоэффективности горнодобывающего производства, особенно в тормозных режимах, характерных для приводов шахтного и рудничного подъема. Кроме того, мгновенные изменения тока ротора и электромагнитного момента при переключении ступеней роторной станции приводят к снижению срока службы механической части привода подъемной установки вследствие возникновения рывков на подъемных канатах и ударов в зубчатых передачах редукторов, что также влечет за собой поломки и простой технологического оборудования.

Указанные недостатки электропривода с роторной станцией обычно устраняются использованием частотного управления асинхронным двигателем, однако, для мощных АДФР применение преобразователей частоты либо неоправданно сложно с точки зрения их технической реализации, либо экономически нецелесообразно. Замена приводных двигателей на двигатели с короткозамкнутой обмоткой ротора требует, с одной стороны остановки подъемных машин на длительный срок, с другой – вновь значительных капиталовложений.

Одним из перспективных способов повышения энергоэффективности электроприводов на основе АДФР, а также устранения недостатков существующих способов управления, является использование схемы асинхронно-вентильного каскада или ее разновидности — схемы машины двойного питания. В то же время, в существующей литературе вопрос применения МДП в

электроприводе с широким диапазоном регулирования скорости разработан недостаточно.

В связи с вышесказанным, разработка автоматизированной системы управления электроприводом переменного тока ШПУ на основе МДП является актуальной научной и практической задачей. Актуальность работы также подтверждается «Долгосрочной программой развития угольной промышленности на период до 2030 года», утвержденной распоряжением Правительства РФ от 21.06.2014 №1099-р., которая предусматривает повышение энергоэффективности оборудования горнодобывающих предприятий.

## 4. Реализация и внедрение результатов работы

Разработанные в ходе выполнения диссертационной работы подходы к построению и алгоритмы управления электроприводом ШПУ на основе МДП используются на предприятии ООО «НИИ АЭМ СибГИУ» при проектировании систем управления электроприводами для горнодобывающих производств, что позволяет повысить эффективность работы технологического оборудования подъемных установок.

Результаты исследований, отраженные в диссертации, используются при подготовке студентов по направлениям бакалавриата и магистратуры 13.03.02 — «Электроэнергетика и электротехника», 13.04.02— «Электроэнергетика и электротехника», 11.03.04 — «Электроника и наноэлектроника», 11.04.04 — «Электроника и наноэлектроника».

#### 5. Методы исследований

Исследование алгоритмов управления ШПУ на основе МДП проводилась с применением методов: математического анализа, теории электропривода, теории автоматического управления, теоретических основ электротехники, математического и компьютерного моделирования, экспериментального ис-

# 6. Научная новизна работы и достоверность выполненных исследований

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

- 1. Получена и исследована математическая модель МДП при изменении параметров добавочного напряжения на роторе, в виде уравнений электромеханического преобразования энергии и соответствующих им структурных схем. Получена эквивалентная модель МДП для применения в системах управления электроприводом.
- 2. Обоснована необходимость комбинации режимов работы МДП для расширения диапазона регулирования скорости машины.
- 3. Получен закон, в соответствии с которым должен изменяться фазовый сдвиг напряжения на роторе для обеспечения максимальной жесткости механических характеристик МДП и максимизации ее момента. Предложен способ увеличения жесткости механических характеристик МДП за счет изменения частоты добавочного напряжения на роторе.
- 4. Разработан алгоритм работы системы логического управления электроприводом подъемной установки на основе МДП, обеспечивающий регулирование скорости в диапазоне не менее 30:1 с сохранением перегрузочной способности двигателя 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.

Результаты имитационного моделирования показали, что разработанные автором диссертационной работы система автоматизированного управления

электроприводом и алгоритм работы системы логического управления позволяют реализовать в асинхронном электроприводе на основе МДП все режимы работы, характерные для шахтного подъема, при исключении недостатков системы с роторной станцией.

Достоверность результатов подтверждается корректным применением математического аппарата, качественным совпадением результатов компьютерных исследований и теоретического анализа; апробацией результатов диссертационной работы на Всероссийских и Международных научно-технических конференциях.

## 7. Практическая значимость исследований

Практическая значимость работы состоит в разработке системы автоматического управления электроприводом ШПУ на основе МДП и алгоритма работы системы логического управления для нее.

Разработанная система управления может быть использована при модернизации существующих асинхронных электроприводов с фазным ротором и роторной станцией, как в горнодобывающем производстве, так и в иных сферах промышленности.

Разработанная система электропривода позволяет осуществлять рекуперацию энергии из роторной цепи в питающую сеть, и может быть использована для повышения энергоэффективности подъемных установок угольных шахт.

Дополнительно практическая значимость работы подтверждается тем, что полученные результаты нашли применение в работе ООО «НИИ АЭМ Сиб-ГИУ», а также тем, что разработки, основанные на материале диссертации, трижды получали награды крупной международной профильной выставки «Уголь России и майнинг».

## 8. Публикации и апробация результатов диссертационной работы

Основные результаты выполненного исследования полностью изложены в 29 научных работах, из них 4 в периодических издания, рекомендованных ВАК РФ, 6 работ в изданиях, входящих в международную систему цитирования Scopus, 12 докладов на Всероссийских и Международных конференциях, 7 публикаций в прочих научных изданиях.

Материалы работы докладывались и обсуждались на:

- 1. Всероссийской научно-практической конференции «Автоматизированный электропривод и промышленная электроника» (г. Новокузнецк, 2016 г.);
- 2. Всероссийской научно-практической конференции «Энергетика и энергосбережение: теория и практика» (г. Кемерово, 2015 г.);
- 3. Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Системы автоматизации в образовании, науке и производстве» (г. Новокузнецк, 2017 г.);
- 4. Международной научно-практической конференции «Новая наука: теоретический и практический взгляд» (г. Владивосток, 2017 г.).
- 5. Международной научно-практической конференции «Инновационное развитие науки и образования» (г. Пенза, 2018 г.).
- 6. Международной научно-практической конференции «Наука и инновации» (г. Оренбург, 2018 г.).

# 9. Значимость полученных автором диссертации результатов для науки и производства

Значимость результатов исследований для науки заключается в том, что теоретические выводы развивают идеи подходов к проектированию алгоритмов автоматического управления подъемно-транспортными механизмами и позволяют разрабатывать новые энергоэффективные способы регулирования электроприводов переменного тока.

<u>Практическая значимость</u> состоит в создании теоретических предпосылок и научно обоснованных технических решений, для проектирования современных отечественных автоматизированных электроприводов шахтных подъемных установок, а также основных узлов и элементов входящих в структуру электропривода.

# 10. Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертационной работы

Результаты диссертационной работы рекомендуется использовать для дальнейших исследований в области применения МДП в электроприводах с широким диапазоном регулирования скорости. Результаты работы могут быть применимы при анализе и синтезе систем управления электроприводами переменного тока, а также для дальнейшего изучения свойств МДП. Результаты и выводы работы могут также использоваться при модернизации асинхронных электроприводов существующих подъемных установок и проектировании новых.

Для практического применения, особый интерес представляет комбинация асинхронно-вентильного каскада и регулируемого источника тока для питания обмоток ротора МДП, что, несомненно, приведет к значительному экономическому эффекту при модернизации существующих (вновь проектируемых) электроприводов ШПУ совместно с улучшением качества регулирования технологического процесса.

## 11. Общие замечания по диссертации и автореферату

1. В работе не достаточно обоснованно, чем предложенная силовая схема электропривода ШПУ (например, изображенная на рисунке 4.2), выгодно отличается от применения системы асинхронизированной синхронной машины (схемы включения АДФР) с транзисторным преобразователем и векторным

управлением по цепям ротора. Схема асинхронизированной синхронной машины позволяет получить сколь угодно низкую частоту вращения вала АДФР, а наличие ПИ-регулятора скорости – абсолютную жесткость скоростных и механических характеристик электропривода

- 2. В работе не рассмотрены вопросы управления реактивной мощностью МДП и возможность снижения потребления реактивной мощности из питающей сети.
- 3. В диссертации не исследован вопрос применимости синхронного режима работы МДП для режимов движения подъемного сосуда с постоянной скоростью и вопрос о рекуперации энергии в питающую сеть для этого случая.
- 4. При вычислении электромагнитного момента в системе управления тиристорным преобразователем напряжения цепи обмотки ротора (структура, изображенная на рисунке 3.15) не учитывается, естественным образом присутствующая, трансформаторная связь токов статора и ротора.
- 5. В разделе 3.4, на стр. 118 автор делает вывод о целесообразности применения П-регулятора скорости и утверждает, что полная компенсация электромеханической постоянной времени объекта управления нецелесообразна. Данные утверждения и выводы требуют дополнительных пояснений.
- 6. В разделе 4.1 при описании алгоритма функционирования разработанного электропривода ШПУ, предлагается процедуру растормаживания электрической машины начинать тогда, когда электромагнитный момент машины сравнятся со статическим моментом на валу. Как предполагается оценивать момент сопротивления нагрузки, пока ротор приводного двигателя заторможен?

#### 12. Заключение

Диссертация представляет собой завершенную научно-квалификационную работу на актуальную тему, в которой содержится решение научной задачи повышения качества процессов регулирования коорди-

нат ШПУ. Новые научные результаты, полученные автором, имеют существенное теоретическое и практическое значение для развития горнодобывающей промышленности России. Выводы и рекомендации достаточно обоснованы.

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

По своей актуальности, объему выполненных исследований, научному содержанию, новизне и практической значимости диссертационная работа «Автоматизированная система управления электроприводом переменного тока шахтной подъемной установки на основе машины двойного питания» отвечает требованиям пп. 9-14 Положения о присуждении ученых степеней ВАК Министерства науки и высшего образования РФ, а ее автор Поползин Иван Юрьевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы».

Отзыв составил заведующий кафедрой «Электропривода и автоматизации промышленных установок» ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет», к. т. н., доцент Д.А. Котин.

Отзыв на диссертацию и автореферат обсужден и принят на заседании кафедры «Электропривода и автоматизации промышленных установок» ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет» 20 июля 2020 года, протокол № 7.

Заведующий кафедрой «Электропривода и автоматизации промышленных установок» ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет»,

Денис Алексеевич Котин

кандидат технических наук, доцент

тел. (383) 346-15-68,

Адрес: 630073, г. Новосибирск,

пр-т К. Маркса, 20, корпус № 2,

аудитория 2-223б

E-mail: d.kotin@corp.nstu.ru

Секретарь заседания, доцент

Кафедры «Электропривода и

Автоматизации промышленных установок»

ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный

технический университет»,

кандидат технических наук

тел. (383) 346-15-68,

Адрес: 630073, г. Новосибирск,

пр-т К. Маркса, 20, корпус № 2,

аудитория 2-122

E-mail: pankracz@corp.nstu.ru

Панкрац Юрий Витальевич

