

На правах рукописи



Нусратов Пайрав Рухониidinovich

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕГО
ЭЛЕКТРОПРИВОДА ШАХТНЫХ ПОДЪЕМНЫХ МАШИН**

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новокузнецк – 2016

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

Научные руководители: доктор технических наук, профессор **Пугачёв Емельян Васильевич**
кандидат технических наук, и.о. заведующего кафедрой электромеханики ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный индустриальный университет»
Иванов Александр Сергеевич

Официальные оппоненты:

Козярук Анатолий Евтихиевич – доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет», заведующий кафедрой электроэнергетики и электромеханики

Котин Денис Алексеевич – кандидат технических наук, ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет», заведующий кафедрой электропривода и автоматизации промышленных установок

Ведущая организация: – ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет» (г. Тула)

Защита состоится: «22» сентября 2016 г. в 13⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.102.01 на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева» по адресу: 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28, факс (3842) 36-16-87, e-mail: siyu.eav@kuzstu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева» на сайте <http://science.kuzstu.ru/activities/gos-attestation/soresearchers/>

Автореферат разослан «19» августа 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Семькина Ирина Юрьевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В соответствии с энергетической стратегией России на период до 2030 года снижение энергоемкости, повышение эффективности использования энергоносителей и энергосбережение в промышленности являются важнейшими стратегическими направлениями. В то же время распространена практика использования электропривода подъемно – транспортных механизмов, когда электроэнергия, генерируемая электродвигателем при спуске груза или при торможении, рассеивается в виде тепла на блоках тормозных сопротивлений. Так, по данным ЗАО «ЭРАСИБ», суммарные годовые непроизводительные потери электроэнергии в действующем электроприводе шахтной подъемной машины (ШПМ) 2Ц-5*2,3 шахты «Осинниковская» составляют около 3000000 кВт·часов (подъемная машина оснащена асинхронными электродвигателями с фазным ротором).

Одним из основных путей повышения энергоэффективности ШПМ является внедрение преобразователя частоты и системы управления электроприводом ШПМ, которые в совокупности позволяют рекуперировать электроэнергию в питающую сеть в режиме генераторного торможения.

В настоящее время существует ряд таких систем электропривода ШПМ, обеспечивающих рекуперацию электрической энергии в питающую сеть. При этом эффективность работы электропривода ШПМ в таком режиме определяется функциональными возможностями частотного преобразователя, алгоритмом его управления, системой управления скоростью сосудов ШПМ и точностью настройки регуляторов системы управления.

Таким образом, задача разработки и исследования энергосберегающего электропривода ШПМ, работающего в режиме генераторного торможения с возможностью рекуперации электроэнергии, являются актуальной.

Степень разработанности. Исследованиями и разработкой систем управления электроприводами переменного тока занимались отечественные и зарубежные ученые О.И. Осипов, Г.Г. Соколовский, А.А. Ефимов, Н.Ф. Ильинский, Р.Т. Шрейнер, М.В. Гельман, В.К. Vose, М. Venturini, W. Kollar и др. Применительно к горным машинам исследования проводились В.Г. Каширских, Е.К. Ещиным, В.И. Островлянчиком, Е.В. Пугачевым, В.М. Завьяловым и др. Мировые концерны в области электротехники, такие как *ABB* и *Siemens*, также ведут исследования в данном направлении. Наиболее проработанным является проект немецкого концерна *Siemens*, посвященный разработке и созданию энергосберегающего электропривода на основе двухзвенного преобразователя частоты с модулем рекуперации «*Active Infeed*».

Однако, несмотря на большой объем исследований, задача разработки автоматизированного электропривода ШПМ, работающего в режиме генераторного торможения с возможностью рекуперации электроэнергии, до конца не решена.

Цель работы заключается в разработке и исследовании автоматизированного электропривода переменного тока ШПМ на основе преобразователя

частоты и системы управления скоростью сосудов, которые обеспечивают в совокупности повышенную отдачу энергии торможения в питающую сеть.

Идея работы заключается в применении двухзвенного преобразователя частоты с усовершенствованной структурой и системы управления электроприводом ШПМ, которые обеспечивают в совокупности повышенную отдачу энергии торможения в питающую сеть.

Поставленная цель определяет следующие основные **задачи работы**:

1. Провести критический анализ режимов работы электропривода ШПМ с точки зрения возможности рекуперации электроэнергии в питающую сеть.

2. Исследовать силовой канал системы электропривода ШПМ в режиме рекуперативного торможения, включающий двухзвенный преобразователь частоты с усовершенствованной структурой и асинхронный электродвигатель.

3. Разработать математическую модель системы электропривода ШПМ, учитывающую в режиме рекуперативного торможения изменение величины конечной нагрузки ШПМ, переменную жесткость канатов и процессы, протекающие в преобразователе частоты с усовершенствованной структурой.

4. Создать модифицированную систему управления скоростью сосудов ШПМ, компенсирующую в режиме рекуперативного торможения влияние конечной нагрузки.

5. Разработать методику настройки регуляторов модифицированной системы управления скоростью сосудов ШПМ.

6. Произвести оценку эффективности разработанной системы управления скоростью сосудов ШПМ в режиме рекуперативного торможения на имитационной модели и экспериментальной лабораторной установке.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Разработан алгоритм управления двухзвенным преобразователем частоты с усовершенствованной структурой, отличающейся тем, что позволяет увеличить ток, рекуперированный в питающую сеть при торможении асинхронного электродвигателя.

2. Разработана математическая модель системы электропривода ШПМ, отличающаяся тем, что учитывает в режиме рекуперативного торможения изменение величины конечной нагрузки ШПМ, переменную жесткость канатов и процессы, протекающие в преобразователе частоты с усовершенствованной структурой.

3. Создана модифицированная система управления скоростью сосудов ШПМ, отличающаяся тем, что компенсирует в режиме рекуперативного торможения влияние конечной нагрузки.

4. Разработана методика настройки регуляторов модифицированной системы управления скоростью сосудов ШПМ, отличающаяся тем, что настройка регуляторов осуществляется в три этапа и учитывает влияние внутренней обратной связи по моменту сил упругости.

Теоретическая и практическая значимость работы.

1. Разработанный двухзвенный преобразователь частоты с усовершенствованной структурой обладает лучшими энергетическими и функциональными

показателями по сравнению с существующим преобразователем частоты на основе активного выпрямителя напряжения (защищено патентом на изобретение).

2. Разработанная математическая модель системы электропривода ШПМ может быть использована при исследовании динамических процессов, протекающих в трехмассовой упругой системе подъемной установки в режиме рекуперативного торможения, а также в учебном процессе для обучения студентов по специальности 130400 – Горное дело (специализация «Электрификация и автоматизация горного производства») и повышения квалификации специалистов в области шахтного подъема.

3. Разработанная методика настройки регуляторов системы управления электроприводом ШПМ, отличающаяся поэтапным синтезом контуров регулирования, обеспечивает минимальные колебания в упругих элементах кинематической цепи подъемной установки по сравнению с существующими методами настройки системы управления электроприводом в режиме рекуперативного торможения.

Методология и методы исследования. Проведенные исследования основывались на общих положениях теорий электропривода, электрических машин, автоматического управления, численном моделировании, натурном эксперименте. Компьютерное моделирование и экспериментальные исследования осуществлялись с использованием комплекса программ *PSIM/SimView* и *Matlab/Simulink*.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Алгоритм управления двухзвенным преобразователем частоты с усовершенствованной структурой позволяет увеличить ток, рекуперированный в питающую сеть при торможении асинхронного электродвигателя, на 8%.

2. Разработанная математическая модель системы электропривода ШПМ, учитывающая в режиме рекуперативного торможения изменение величины конечной нагрузки ШПМ, переменную жесткость канатов и процессы, протекающие в преобразователе частоты с усовершенствованной структурой, позволяет осуществлять анализ и синтез систем управления скоростью сосудов ШПМ с погрешностью, не превышающей 10%.

3. Предложенная модифицированная система управления скоростью сосудов ШПМ позволяет компенсировать в режиме рекуперативного торможения влияние конечной нагрузки.

4. Разработанная методика настройки регуляторов модифицированной системы управления скоростью сосудов ШПМ позволяет уменьшить пульсации электромагнитного момента на 10%.

Достоверность и обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждаются корректным применением математических методов теории автоматического управления, теории электропривода, методов компьютерного моделирования, сравнением имитационного моделирования с результатами известных экспериментов, а также достаточной сходимостью результатов с экспериментальными исследованиями на лабораторной установке (расхождение в пределах 10%).

Личный вклад автора заключается в выполнении основного объема исследований, изложенных в диссертационной работе, анализе, обобщении полученных результатов и формулировке выводов, а также в личном участии в апробации результатов работы и подготовке основных публикаций по выполненной работе.

Реализация результатов работы. Результаты работы внедрены в опытно-конструкторские разработки предприятия ООО «Научно-производственная фирма «ИНТЕХСИБ» при проектировании опытно-промышленного образца энергосберегающего электропривода переменного тока на основе двухзвенного преобразователя частоты со звеном рекуперации электроэнергии.

Апробация работы. Основное содержание работы, ее отдельные положения и результаты докладывались и получили одобрение на следующих конференциях: международная научно - практическая конференция «Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов», проводимая в рамках выставки - ярмарки «Уголь России и Майнинг» (Новокузнецк, 2014 - 2015 гг.); XIII Международная научно-техническая конференция молодых специалистов. «ЕВРАЗ» (Новокузнецк, 2015 г.); VI Всероссийская научно-практическая конференция (Новокузнецк 2014 г.); Международная научно-практическая конференция «Проблемы и перспективы развития науки в России и мире» (Казань 8 октября 2015 г.); IX Всероссийская научная конференция молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации» (Новосибирск 1-5 декабря 2015 г.); на семинарах кафедры Электромеханики СибГИУ.

Публикации. Результаты выполненных исследований отражены в 12 работах, в том числе в трех статьях, опубликованных в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 1 патент РФ на изобретение.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, 4-х глав, заключения, выводов, списка литературы и приложений. Работа изложена на 139 страницах, иллюстрирована 9 таблицами и 71 рисунками. Библиографический указатель включает 110 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цели и задачи научной работы, методы исследования, научная новизна, практическая значимость, предмет защиты и личный вклад автора, апробация и структура диссертации.

В первой главе диссертационной работы произведен анализ современного состояния и направлений развития электроприводов шахтного подъема в режиме рекуперативного торможения, исследован силовой канал системы усовершенствованной структуры на основе преобразователя частоты с возможностью рекуперации электрической энергии.

Рассмотрены современные структуры электроприводов ШПМ с преобразователем частоты с системой управления скоростью. Показано, что для электропривода шахтного подъема целесообразно применять двухзвенный преобразователь частоты со звеном рекуперации электроэнергии, позволяющий воз-

вращать энергию торможения в питающую сеть. Для таких систем выходит на первый план вопрос реализации звена рекуперации электроэнергии (ЗРЭ), от структуры которой зависит эффективность системы электропривода. Проанализировав идеи и наработки, встречающиеся в научной литературе, выбран асинхронный электропривод с двухзвенным преобразователем частоты на основе активного выпрямителя напряжения, отличающийся наилучшими характеристиками и проработанностью. Исследования показали, что указанный электропривод имеет существенный недостаток в режиме рекуперативного торможения, который заключается в ограничении рекуперированной электроэнергии из-за структуры ЗРЭ.

Показано, что одним из эффективных путей решения данной задачи является совершенствование структуры ЗРЭ (рисунок 1).

В соответствии с разработанной усовершенствованной структурой двухзвенного преобразователя частоты со ЗРЭ предложен алгоритм управления силовыми ключами ЗРЭ (таблица 1), позволяющий в режиме рекуперативного торможения расширить диапазон рекуперированной в питающую сеть электроэнергии. При этом алгоритм управления ключами инверторного звена преобразователя не отличается от известных алгоритмов.

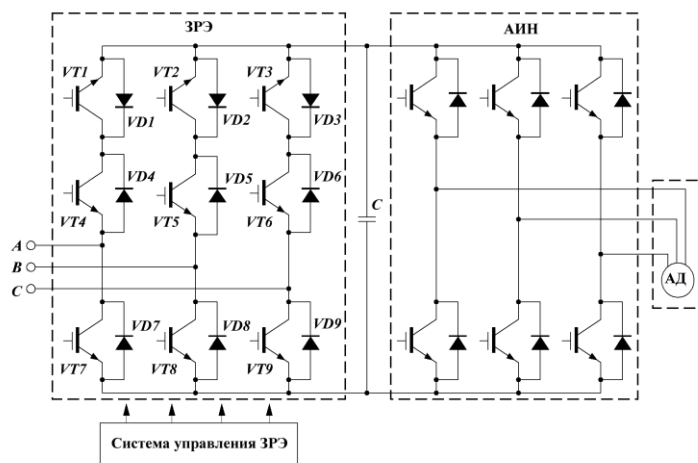


Рисунок 1 – Электропривод с усовершенствованной структурой ЗРЭ

Таблица 1 – Алгоритм управления силовыми ключами ЗРЭ

	VT1/VD1	VT2/VD2	VT3/VD3	VT4/VD4	VT5/VD5	VT6/VD6	VT7/VD7	VT8/VD8	VT9/VD9
<i>Угол управления α</i>	<i>Двигательный режим</i>								
Постоянный угол управления	+/-	+/-	+/-	-/+	-/+	-/+	-/+	-/+	-/+
<i>Угол управления α</i>	<i>Режим рекуперативного торможения</i>								
Постоянный угол управления	-/+	-/+	-/+						
Регулируемый угол управления				+/-	+/-	+/-	+/-	+/-	+/-

Знаки «+» и «-» в таблице 1 характеризуют состояния проводимости IGBT – модулей.

Приводится анализ электромеханического взаимодействия процессов в электроприводе шахтного подъема в режиме рекуперативного торможения. Установлено, что работа ШПМ в упругих механических элементах, в качестве которых выступают канаты, сопровождается различными видами колебаний,

которые в значительной степени негативно влияют на быстродействие системы электропривода в режиме рекуперативного торможения. Также на качество переходных процессов влияет изменение величины концевой нагрузки, вследствие навивки каната на барабан ШПМ.

Ввиду вышесказанного, возникает необходимость разработки структуры системы электропривода ШПМ в режиме рекуперативного торможения с учетом усовершенствованной структуры двухзвенного преобразователя частоты, переменности концевой нагрузки и влияния жесткости канатов подъемной установки.

Вторая глава посвящена разработке математической модели системы электропривода ШПМ в режиме рекуперативного торможения с учетом усовершенствованной структуры двухзвенного преобразователя частоты, переменности концевой нагрузки и влияния жесткости канатов подъемной установки.

Структура полученной модели системы электропривода ШПМ в режиме рекуперативного торможения представлена как совокупность следующих локальных моделей: двухзвенного преобразователя частоты с усовершенствованной структурой, асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, механической системы подъемной установки состоящей из узлов концевой нагрузки и противовеса, описываемых системой уравнений (1), в которой приняты следующие обозначения: $e_a, e_b, e_c, i_a, i_b, i_c$ – соответственно линейные напряжения и токи трехфазной системы; $R_a, R_b, R_c, L_a, L_b, L_c$ – соответственно активные и индуктивные сопротивления входного фильтра двухзвенного преобразователя частоты; u_{dc}, i_{dc} – соответственно напряжение и ток звена постоянного тока двухзвенного преобразователя частоты; C – емкость конденсатора ЗРЭ; S_{a1}, S_{b1}, S_{c1} – ключевые состояния IGBT – транзисторов ЗРЭ (1 – включен, 0 – отключен); S_{a2}, S_{b2}, S_{c2} – коммутационные функции фазы a, b и c на выходе таблицы переключений IGBT – транзисторов инвертора напряжения; U_a, U_b, U_c – фазные напряжения, подводимые к обмоткам статора АД; U_{ka}, U_{kb}, U_{kc} – падение напряжения на IGBT – транзисторах преобразователя частоты; U_0 – напряжение нулевой последовательности; $i_{1\alpha}, i_{1\beta}, i_{2\alpha}, i_{2\beta}$ – составляющие векторов тока статора и ротора в осях $(\alpha-\beta)$; $\Psi_{1\alpha}, \Psi_{1\beta}, \Psi_{2\alpha}, \Psi_{2\beta}$ – составляющие векторов потокосцепления статора и ротора в осях $(\alpha-\beta)$; L_m – взаимная индуктивность обмоток статора и ротора АД; L_1, L_2 – соответственно индуктивности обмоток статора и ротора; p_n – число пар полюсов АД; M_d – электромагнитный момент; ω_1 – скорость ротора; $\frac{d\omega_1}{dt}, \frac{d\omega_2}{dt}, \frac{d\omega_3}{dt}$ – соответственно составляющие скоростей трехмассовой упругой системы (первая масса – ротор АД, вторая масса – сосуд с концевой нагрузкой, третья масса – противовес); J_1, J_2, J_3 – приведенные моменты инерции первой, второй и третьей массы; $C_{\varphi 12}$ – приведенная жесткость струн каната между органом навивки и второй массой; $C_{\varphi 13}$ – приведенная жесткость струн каната между органом навивки и третьей массой; b_{12}, b_{13} – коэффициенты внутреннего вязкого трения (демпфирования) при вращательном движении; M_{12}, M_{13} – соответственно приведенные упругие мо-

менты второй и третьей массы относительно органа навивки; M_{c2}, M_{c3} – соответственно моменты статических сопротивлений со стороны второй и третьей массы; $F_{кн}, F_{пр}, F_{кан}$ – соответственно действующие усилия со стороны концевой нагрузки, противовеса и канатов; h_1, h_2 – соответственно высота нахождения первого и второго сосудов; h_0 – общая высота спуска, включая высоту от надшахтной поверхности до органов навивки; $R_{бар}$ – радиус барабана подъемной установки.

$$\left. \begin{aligned}
 L_a \frac{di_a}{dt} &= e_a - u_{dc} \frac{2S_{a1} - (S_{b1} + S_{c1})}{3} - R_a i_a; \\
 L_b \frac{di_b}{dt} &= e_b - u_{dc} \frac{2S_{b1} - (S_{a1} + S_{c1})}{3} - R_b i_b; \\
 L_c \frac{di_c}{dt} &= e_c - u_{dc} \frac{2S_{c1} - (S_{a1} + S_{b1})}{3} - R_c i_c; \\
 C \frac{du_{dc}}{dt} &= S_{a1} i_a + S_{b1} i_b + S_{c1} i_c + i_{dc}; \\
 i_{dc} &= S_{a2} i_A + S_{b2} i_B + S_{c2} i_C; \\
 U_{1\alpha} &= u_{dc} \left[S_{a2} - \frac{1}{2} (S_{b2} - S_{c2}) \right]; \\
 U_{1\beta} &= \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot u_{dc} (S_{b2} - S_{c2}); \\
 \frac{d\Psi_{1\alpha}}{dt} &= U_a - U_{ka} - U_0 - i_{1\alpha} R_1; \\
 \frac{d\Psi_{1\beta}}{dt} &= \frac{1}{\sqrt{3}} (U_b - U_{kb} - U_c + U_{kc}) - i_{1\beta} R_1; \\
 \frac{d\Psi_{2\alpha}}{dt} &= -i_{2\alpha} R_2 - p_{п} \omega_1 \Psi_{2\beta}; \\
 \frac{d\Psi_{2\beta}}{dt} &= -i_{2\beta} R_2 + p_{п} \omega_1 \Psi_{2\alpha}; \\
 U_0 &= (U_a + U_b + U_c - U_{ka} - U_{kb} - U_{kc}); \\
 M_{д} &= \frac{3}{2} p_{п} \frac{L_m}{L_1 L_2 - L_m^2} (\Psi_{1\beta} \Psi_{2\alpha} - \Psi_{1\alpha} \Psi_{2\beta}); \\
 J_1 \frac{d\omega_1}{dt} &= M_{д} + M_{12} - M_{13}; \\
 J_2 \frac{d\omega_2}{dt} &= M_{12} - M_{c2}; \\
 J_3 \frac{d\omega_3}{dt} &= M_{13} - M_{c3}; \\
 M_{12} &= c_{\varphi 12} (\varphi_1 - \varphi_2) + b_{12} (\omega_1 - \omega_2); \\
 M_{13} &= c_{\varphi 13} (\varphi_1 - \varphi_3) + b_{13} (\omega_1 - \omega_3); \\
 M_{c2} &= (F_{кн} + (F_{кан} \cdot h_1)) \cdot R_{бар}; \\
 M_{c3} &= (F_{пр} + F_{кан} (h_0 - h_2)) \cdot R_{бар}; \\
 \frac{dh}{dt} &= \omega_1 R_{бар}.
 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Действующие усилия определим следующим образом:

$$\begin{cases} F_{\text{кн}} = (m_{\text{кл}} + m_{\text{гр}})g; \\ F_{\text{пр}} = m_{\text{пр}}g; \\ F_{\text{кан}} = kg, \end{cases} \quad (2)$$

где $m_{\text{кл}}$, $m_{\text{гр}}$, $m_{\text{пр}}$ – соответственно массы: пустого сосуда (клетки), груза в сосуде и противовеса; k – соответствующая масса на 1 м длины каната; g – ускорение свободного падения, равное $9,81\text{ м/с}^2$.

Математическая модель системы электропривода ШПМ представлена в виде структурной схемы на рисунке 2. На рисунке 2 введены следующие обозначения: ДПЧ – двухзвенный преобразователь частоты; ЗРЭ – звено рекуперации электроэнергии; ЗПТ – звено постоянного тока; АИН – автономный инвертор напряжения; $L^* = \frac{L_m}{L_1 L_2 - L_m^2}$ – относительная индуктивность АД; $\Psi^* = \Psi_{1\beta} \Psi_{2\alpha} - \Psi_{1\alpha} \Psi_{2\beta}$ – относительное потокоцепление АД в осях (α - β), R_6 – радиус барабана подъемной установки.

Проведенное компьютерное моделирование существующего электропривода ШПМ со стандартными настройками регуляторов системы управления в режиме рекуперативного торможения в программном продукте *PSIM/SimView* показало, что спуск концевой нагрузки способствует появлению пульсаций и перерегулирования по каналам электромагнитного момента и скорости сосудов ШПМ. Как следствие это приводит к снижению точности управления, повышению электропотребления и снижению быстродействия системы электропривода ШПМ.

Третья глава посвящена разработке системы управления электроприводом ШПМ в режиме рекуперативного торможения и методике настройки регуляторов в системе подчиненного регулирования координат.

Задача синтеза структуры и алгоритмов работы регуляторов в системе управления электроприводом ШПМ в режиме рекуперативного торможения представлена следующим образом. Исходные данные: известная структура системы управления электропривода ШПМ (А.В. Ляхомский, В.Н. Фащиленко, С.Н. Решетняк); известные методы синтеза регуляторов системы управления электропривода с алгоритмом прямого управления моментом (ПУМ) в системе подчиненного регулирования координат (С.А. Ковчин, Е.А. Волкова, Е.М. Овсянников). **Требуется** 1) модифицировать структуру системы управления скоростью сосудов ШПМ с целью компенсации в режиме рекуперативного торможения влияние концевой нагрузки; 2) синтезировать регуляторы системы управления электропривода ШПМ; 3) разработать структуры регуляторов системы управления электропривода ШПМ, позволяющих улучшить динамические свойства электропривода в режиме рекуперативного торможения; 4) оценить работоспособность синтезируемых регуляторов системы управления электропривода ШПМ в режиме рекуперативного торможения; 5) оценить эффективность разработанной системы управления электропривода ШПМ в режиме рекуперативного торможения.

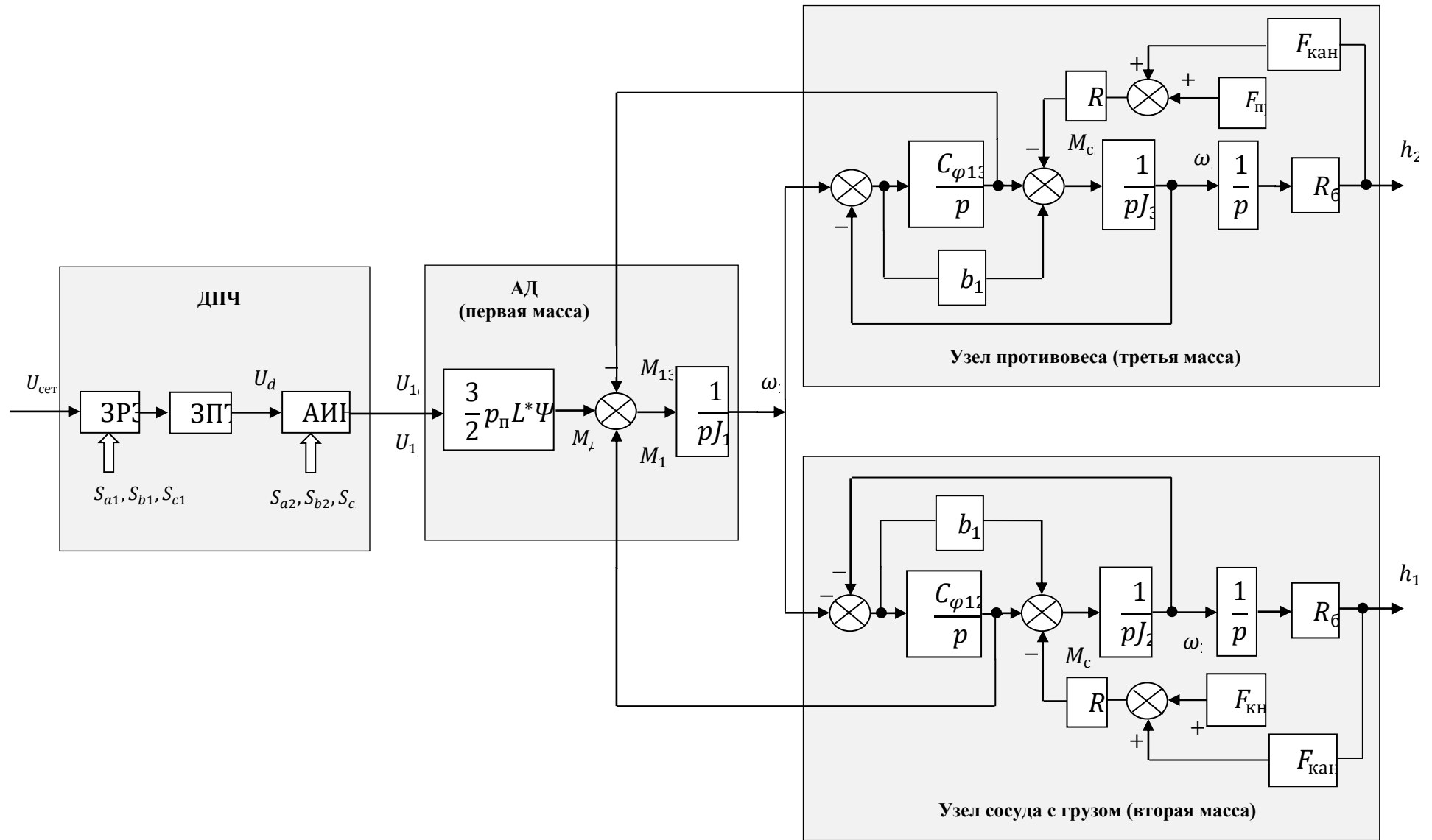


Рисунок 2 – Структурная схема трехмассовой ЭМС подъемной установки

Разработка модифицированной структуры системы управления скоростью сосудов ШПМ. Структурная схема модифицированной системы управления скоростью сосудов ШПМ представлена на рисунке 3. Модификация известной структуры системы управления электропривода ШПМ осуществлялась посредством добавления блока формирователя упругого момента (ФУМ), состоящего из блока сравнения положения сосуда с заданным значением (БС), блока памяти значения упругого момента на равномерном участке движения сосудов, ключей коммутации. В зависимости от положений ключей коммутации предусмотрено два режима работы электропривода ШПМ: работа электропривода в режиме стабилизации скорости сосудов (положения ключей К1.1 и К1.2 изображены на рисунке 3); работа в режиме замедления (происходит переключение ключей К1.1 и К1.2). При таком варианте организации системы управления исключаются колебания скорости подъема сосудов и момента двигателя в режиме замедления.

Методика решения задачи синтеза регуляторов системы управления электропривода ШПМ. Метод синтеза регуляторов в системе управления электроприводом ШПМ с алгоритмом работы ПУМ представлен в следующем виде. Оптимизация контуров регулирования системы управления электроприводом проводилась в три этапа.

На первом этапе проведен синтез регуляторов внутреннего контура системы управления электроприводом ШПМ с алгоритмом работы ПУМ без учета влияния внутренней обратной связи по упругому моменту нагрузки в соответствии со стандартной настройкой на технический оптимум. При этом управление каналами регулирования момента и потокосцепления ротора осуществлялось отдельно с применением линейных регуляторов вместо существующих релейных, что позволило уменьшить пульсации электромагнитного момента АД.

В результате, структуры регуляторов момента (PM) и потокосцепления ротора (PP) получены пропорционально – интегрального вида ($ПИ$ – регулятор):

$$W_{pm}(p) = k_{pm} + \frac{k_{им}}{p}, \quad (3)$$

$$W_{pp}(p) = k_{pp} + \frac{k_{ип}}{p}, \quad (4)$$

где $k_{pm} = \frac{1}{T_\mu k_m k_{ом}}$, $k_{pp} = \frac{T_2}{8T_\mu k_\pi}$ – соответственно пропорциональные составляющие PM и PP ; $k_{им} = \frac{k_{pm}}{T_0}$, $k_{ип} = 2k_{pp}$ – соответственно интегральные составляющие PM и PP ; T_μ – чистое время запаздывания преобразователя частоты, равное периоду ШИМ; $T_0 = (\frac{1}{\tau_1} + \frac{1}{\tau_2})^{-1}$; $k_m = \frac{1.5p_\pi L_m}{L_2 L_\sigma}$; $k_\pi = \frac{2L_2}{3p_\pi}$; $k_{ом}$ – коэффициент обратной связи по моменту; $T_r = L_2/R_2$ – постоянная времени роторной цепи.

На втором этапе проведен синтез контура момента с учетом внутренней обратной связи по упругому моменту нагрузки.

Передачная функция компенсирующей положительной обратной связи по упругому моменту, заводимая на PM , получена в следующем виде:

$$W_{\text{упр}}(p) = \frac{(T_0 p + 1)k_{\text{ом}}}{k_{\text{м}}T_0} (T_{\mu}^2 p^2 + 2T_{\mu} p + 1). \quad (5)$$

На третьем этапе проведен синтез внешнего контура с регулятором скорости (PC). Контур скорости настроен на симметричный оптимум. При этом в процессе настройки внешнего контура не учтено влияние внутренней обратной связи по упругому моменту нагрузки.

В результате, структура PC получена пропорционально – интегрального вида (ПИ – регулятор):

$$k_{\text{pc}} = \frac{J\epsilon k_{\text{ом}}}{4T_{\mu}k_{\text{ос}}}, \quad (6)$$

$$k_{\text{ис}} = \frac{J\epsilon k_{\text{ом}}}{16T_{\mu}^2 k_{\text{ос}}}, \quad (7)$$

где $k_{\text{pc}}, k_{\text{ис}}$ – соответственно пропорциональная и интегральная составляющие PC ; $k_{\text{ос}}$ – коэффициент обратной связи по скорости. Параметры регуляторов выбраны из соображения обеспечения желаемого быстродействия системы управления электропривода ШПМ в режиме рекуперативного торможения.

На рисунке 3 представлена структурная схема модифицированной системы управления электропривода ШПМ, в которой введены следующие обозначения: УСН – узел сосуда с концевой нагрузкой; УПР – узел противовеса; ВНК – вычислитель ненаблюдаемых координат; БОЗН – блок определения задающего напряжения; ШИМ – широтно-импульсный модулятор; $\omega^{\text{зад}}, \psi^{\text{зад}}, M_{\text{упр}}^{\text{зад}}$ – сигналы задания скорости, потокосцепления ротора АД и упругого момента нагрузки ШПМ, $\psi^{\text{факт}}, M_{\text{упр}}^{\text{факт}}$ – фактические сигналы потокосцепления и упругого момента нагрузки, заводимые через обратные связи; $k_{\text{ос}}, k_{\text{оп}}, k_{\text{ом}}, k_{\text{оум}}$ – соответственно коэффициенты обратных связей по скорости, потокосцеплению ротора, электромагнитному моменту и упругому моменту нагрузки; S_1 – сокращенно от S_{a1}, S_{b1}, S_{c1} ; S_2 – сокращенно от S_{a2}, S_{b2}, S_{c2} ; ФУМ – формирователь упругого момента нагрузки; БС – блок сравнения; БП – блок памяти; $h_{\text{замед}}$ – высота участка замедления.

Ядро ПУМ образуют блоки БОЗН и ШИМ. Задающие напряжения $u_{1\alpha}^{\text{зад}}, u_{1\beta}^{\text{зад}}$ для инвертора (АИН) формируются в блоке БОЗН, на вход которого поступают сигналы $U^{\text{зад}}, V^{\text{зад}}$ с выхода блока регуляторов (момента и потокосцепления ротора АД);

Оценка работоспособности синтезируемых регуляторов системы управления электроприводом ШПМ производилась на разработанной компьютерной модели в среде Power Simulation.

На рисунке 4 представлены результаты компьютерного моделирования системы электропривода ШПМ при настройке системы управления по традиционной методике без учета влияния внутренней обратной связи по упругому моменту нагрузки, и предложенной методике настройки с учетом влияния внутренней обратной связи по упругому моменту нагрузки.

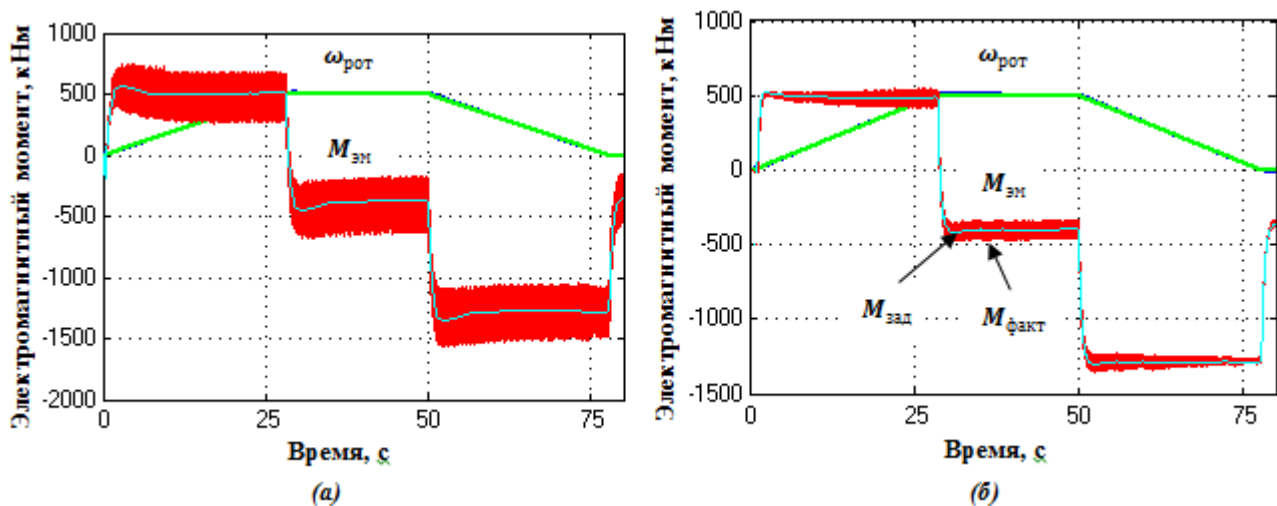


Рисунок 4 – Переходный процесс в системе с ограничением момента при стандартной настройке (а), при оптимизированной структуре (б)

Рисунок 4 а, характеризующийся большими пульсациями момента и перерегулированием, соответствует стандартным настройкам регуляторов системы управления электроприводом ШПМ. Рисунок 4 б иллюстрирует монотонный характер изменения электромагнитного момента в системе с оптимизированной структурой и практически отсутствием перерегулирования в моментах пуска, сброса нагрузки и перехода в режим замедления ШПМ.

Принцип раздельного управления каналами электромагнитного момента и потокосцеплением ротора АД позволил уменьшить пульсации электромагнитного момента АД в режиме рекуперативного торможения на 10 %.

Оценка эффективности разработанной структуры системы управления электроприводом ШПМ осуществлялась в сравнении с альтернативными системами ПУМ на основе классических П и ПИ – регуляторов скорости в режиме рекуперативного торможения.

В результате, настройка с использованием предложенной структуры и методики позволила сократить пульсации электромагнитного момента на 10 %, величина перерегулирования по каналу скорости уменьшалась с 3% до 1%, а величина перерегулирования по моменту уменьшалась с 43 % (П – регулятор), 7 % (ПИ– регулятор) до 3 %.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что влияние концевой нагрузки на динамику электропривода ШПМ в режиме рекуперативного торможения может быть минимизировано оптимизацией системы управления электропривода, выбором методики, учитывающей как настройку контуров регулирования, так и компенсирующую особенность канала упругого момента нагрузки.

Четвертая глава посвящена компьютерному моделированию в среде *PSIM/SimView* с целью проверки работоспособности предлагаемой системы управления электроприводом ШПМ в режиме рекуперативного торможения, а также экспериментальным исследованиям в инструментальном программном обеспечении *Matlab/Simulink*. Приводится краткое описание системы управле-

ния электропривода ШПМ на основе микроконтроллера *dspic30f4011*. Выбор инструментального программного обеспечения *Matlab/Simulink* обусловлен наличием обширной библиотеки, включающей электротехнические компоненты, компьютерные модели которых максимально соответствуют поведению реальных технических устройств.

Полученная осциллограмма сетевых токов системы электропривода с оптимизированной системой управления в случае рекуперации на протяжении цикла работы ШПМ представлена на рисунке 5. Также средствами моделирования получены осциллограммы сетевых токов системы электропривода в случае рекуперации на участке замедления ШПМ, тока статора, напряжения звена постоянного тока, скорости сосуда с концевой нагрузкой и действующих усилий в режиме рекуперативного торможения.

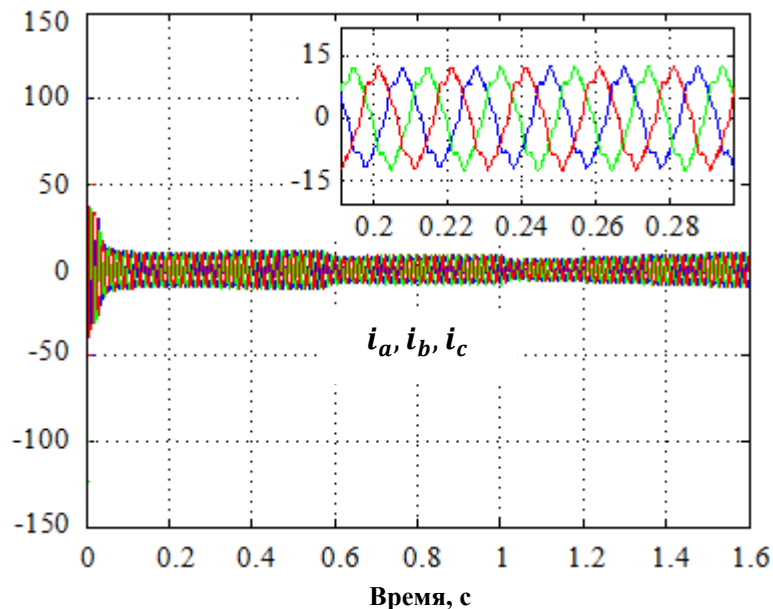


Рисунок 5 – Переходный процесс тока рекуперации при оптимизированной структуре системы управления электроприводом ШПМ

Для подтверждения адекватности результатов компьютерного моделирования и работоспособности оптимизированной структуры системы электропривода ШПМ в режиме рекуперативного торможения проведены экспериментальные исследования на лабораторной установке.

Общий вид экспериментальной установки, а также макет двухзвенного преобразователя частоты со звеном рекуперации электроэнергии представлены на рисунке 6а и 6б соответственно. Основные узлы лабораторной установки: 1 – усовершенствованное звено рекуперации электроэнергии; 2 – IGBT-модуль, состоящий из шести пар IGBT-транзисторов с обратными диодами; 3 – микроконтроллер серии *dspic30f4011*; 4 – программатор серии ICD 3 (*Microchip*); 5 – персональный компьютер; 6 – нагрузочная часть лабораторной установки; 7 – панель управления нагрузочной частью; 8 – осциллограф.

В качестве нагрузочного механизма имитирующего работу ШПМ, на общем валу с асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором задействован двигатель постоянного тока с независимой обмоткой возбуждения.

Экспериментальная часть исследования представлена в следующем виде. Вначале строится компьютерная модель экспериментальной установки в программном обеспечении *Matlab/Simulink*. На следующем этапе генерируется управляющий код (*C – code*) модели электропривода на базе микроконтроллера

dspic30f4011. На последнем этапе сгенерированный управляющий код прошивается в память микроконтроллера.

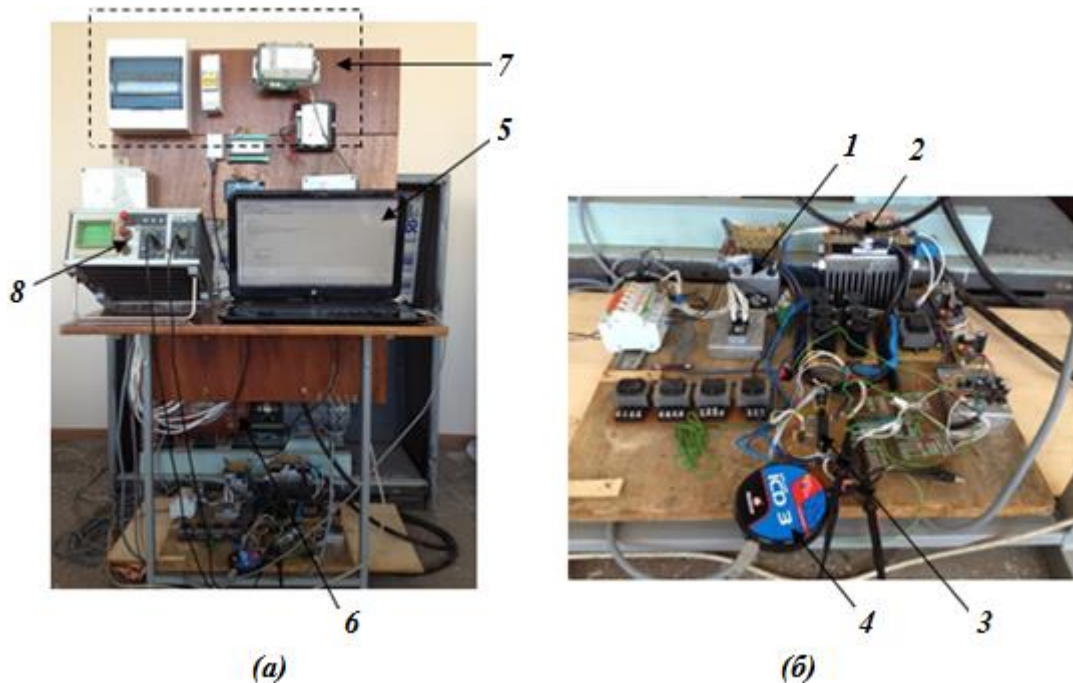


Рисунок 6 – Экспериментальная установка системы электропривода:
 а) общий вид лабораторной установки; б) звено рекуперации электроэнергии

Моделирование проведено для тех же параметров, что и в системе *Power Simulation* с наложением экспериментальных переходных процессов.

Экспериментальным путем получены осциллограммы сетевых токов системы электропривода ШПМ в режиме рекуперативного торможения в случаях рекуперации на протяжении цикла работы (рисунок 7), а также на участке замедления ШПМ. Характеристики, полученные в ходе эксперимента, в достаточной степени соответствуют тем же характеристикам, полученным в ходе компьютерного моделирования. При этом расхождения между результатами эксперимента и моделирования не превышает 10%, чем подтверждается адекватность разработанной модели и работоспособность модифицированной структуры системы управления электроприводом ШПМ в режиме рекуперативного торможения.



Рисунок 7 – Осциллограммы сетевых токов системы электропривода в режиме рекуперативного торможения

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе содержится решение актуальной задачи разработки энергосберегающего электропривода переменного тока ШПМ, имеющей важное научно-практическое значение для повышения энергоэффективности подъемно-транспортного комплекса горного производства.

Основные результаты выполненного исследования:

1. Проведенный анализ современного состояния и направлений развития электроприводов ШПМ в режиме рекуперативного торможения показал, что электропривода на основе матричных и двухзвенных преобразователей частоты более приемлемы с точки зрения энергоэффективности по сравнению с существующими электроприводами, реализованными с использованием преобразователей частоты с выпрямительной частью на основе диодных и тиристорных выпрямителей.

2. Исследован силовой канал системы электропривода ШПМ с усовершенствованной структурой двухзвенного преобразователя частоты. Показано, что для электропривода шахтного подъема целесообразно применять двухзвенный преобразователь частоты со звеном рекуперации электроэнергии, позволяющий в режиме генераторного торможения возвращать энергию торможения в питающую сеть. Предложенный алгоритм управления двухзвенным преобразователем частоты с усовершенствованной структурой, позволяет увеличить ток, рекуперированный в питающую сеть при торможении асинхронного электродвигателя, на 8%.

3. Разработана математическая модель системы электропривода ШПМ в режиме рекуперативного торможения, структура которой содержит локальные модели – «двухзвенный преобразователь частоты с усовершенствованной структурой», «асинхронный двигатель с алгоритмом ПУМ», «механическая система подъемной установки», состоящая из узлов концевой нагрузки и противовеса». Доказано, что применение разработанной модели позволяет эффективно решать задачи анализа и синтеза систем управления скоростью сосудов ШПМ, за счет того, что модель учитывает в режиме рекуперативного торможения особенности электрической и механической частей системы электропривода ШПМ, жесткость канатов и изменение величины концевой нагрузки.

4. Разработана модифицированная система управления скоростью сосудов ШПМ, компенсирующая в режиме рекуперативного торможения влияние концевой нагрузки. Установлено, что в режиме рекуперативного торможения концевая нагрузка негативно влияет на электропривод ШПМ и способствует возникновению перерегулирования по каналам электромагнитного момента и скорости сосудов. Показано, что минимизировать влияние концевой нагрузки и улучшить быстродействие системы электропривода по каналам момента и скорости целесообразно использованием компенсирующей внутренней обратной связи по упругому моменту нагрузки.

5. Поставлена и решена задача разработки методики синтеза регуляторов модифицированной системы управления скоростью сосудов ШПМ в режиме рекуперативного торможения. Синтез контуров регулирования системы

управления ШПМ в режиме рекуперативного торможения следует проводить поэтапно для оценки влияния внешнего возмущающего воздействия, в роли которого выступает упругий момент нагрузки. Применение предложенной методики настройки контуров регулирования системы управления электроприводом ШПМ позволяет получать апериодические переходные процессы момента и скорости с наименьшим перерегулированием, не превышающим 1%.

б. Установлено, что погрешность результатов компьютерного моделирования в средах *PSIM/SimView* и *Matlab/Simulink* относительно экспериментальных данных, полученных на лабораторной установке не превышает 10 %. Количественная оценка работоспособности системы управления электроприводом ШПМ с модифицированной структурой проявляется в формировании апериодических переходных процессов с перерегулированием по моменту в 14.3 и 2.33 раза меньшим, по сравнению с широко применяемыми классическими ПИ и ПИ – регуляторами скорости соответственно, уменьшением перерегулирования по каналу скорости с 3% до 1%, а также сокращением пульсации электромагнитного момента на 10 % .

При этом перспективным направлением дальнейших исследований является развитие теории энергосбережения в электроприводах переменного тока ШПМ на основе интеллектуальной технологии Smart Grid.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК

1. Пугачёв, Е.В. Спектральный анализ тока и напряжения электропривода переменного тока с двухзвенным преобразователем частоты / Е. В. Пугачёв, А. С. Иванов, П.Р. Нусратов, В. С. Иванов // Вестник таджикского национального университета. 2014. – № 1 (126). – С. 95-100.

2. Pugachev, P.R. Simulation and analysis of the behavior of two – level back – to – back converter in regenerative operating mode / E.V. Pugachev, P.R. Nusratov, A.S. Ivanov, V.S. Ivanov // Вестник таджикского национального университета. 2015. – № 1 (156). – С.27-31.

3. Пугачёв, Е.В. Энергосберегающий асинхронный электропривод / Е.В. Пугачёв, А.С. Иванов, П.Р. Нусратов, В.С. Иванов, В.А. Корнеев // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2015. – №5 (111). – С. 111-116.

Работы в сборниках всероссийских и международных конференций

4. Пугачёв, Е.В. Обзор рынка частотно – регулируемых электроприводов со звеном рекуперации электроэнергии в питающую сеть / Е.В. Пугачёв, П.Р. Нусратов, В.С. Иванов // Научно-технологические разработки и использования минеральных ресурсов. Сборник научных статей Международной научно-практической конференции. – Новокузнецк: Изд. СибГИУ, 2014. – №1. – С. 188-193.

5. Нусратов, П.Р. Матричный преобразователь частоты с улучшенной коммутацией / П.Р. Нусратов, Е.В. Пугачёв, В.С. Иванов // Автоматизированный электропривод и промышленная электроника: Труды шестой Всероссийской

научно – практической конференции / Под общей редакцией В.Ю. Островлянича. – Новокузнецк: изд-во СибГИУ, 2014 г. – С. 289-294.

6. Пугачёв, Е.В. Исследование тормозных режимов работы асинхронного электропривода / Е.В. Пугачёв, П.Р. Нусратов, А.С. Иванов, В.С. Иванов // Научно-технические технологии разработки и использования минеральных ресурсов. Сборник научных статей Международной научно-практической конференции. – Новокузнецк: Изд. СибГИУ, 2015. – №2. – С. 228-231.

7. Пугачёв, Е.В. Защита матричного преобразователя частоты в аварийных режимах / Е.В. Пугачёв, А.С. Иванов, П.Р. Нусратов, В.С. Иванов // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2015. – №2 (12). С. – 49-52.

8. Пугачёв, Е.В. Исследование функциональных возможностей асинхронного электропривода с двухзвенным преобразователем частоты / Е.В. Пугачёв, А.С. Иванов, П.Р. Нусратов // Проблемы и перспективы развития науки в России и мире. Сборник статей Международной научно-практической конференции. – Уфа: Омега Сайнс, 2015. – С. 59-62.

9. Нусратов, П.Р. Анализ эффективности асинхронного электропривода с двухзвенным преобразователем частоты / П.Р. Нусратов // IX Всероссийская научная конференция молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации»: Сборник научных трудов по материалам конференции. Часть V. – Новосибирск, НГТУ, 2015. – С. 100-102.

10. Нусратов, П.Р. Сравнительный анализ преобразователей частоты в режиме генераторного торможения с рекуперацией энергии в питающую сеть / П.Р. Нусратов // Наука и образование в XXI веке: Сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции 30 января 2015 г.: в 5 частях. Часть III. М.: «АР-Консалт», 2015 г. – С. 33-36.

11. Нусратов, П.Р. Рекуперативное торможение асинхронного электропривода / П.Р. Нусратов // Наука, образование, общество: актуальные вопросы и перспективы развития: Сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции 30 мая 2015 г.: в 3 частях. Часть I. М.: «АР-Консалт», 2015 г. – С. 51-52.

12. Нусратов, П.Р. Автоматизация крановых механизмов / П.Р. Нусратов // Тезисы XIII Международной научно – технической конференции молодых специалистов: ЕВРАЗ. – Новокузнецк, 2015 г. – С. 78-80.

Объекты интеллектуальной собственности

13. Патент 2584002 РФ, H02P3/18. Рекуперирующий электропривод переменного тока с двухзвенным преобразователем частоты / В.С. Иванов, П.Н. Кунин, Е.В. Пугачев, П.Р. Нусратов, А.С. Иванов. – № 2014150748/07; заявл. 15.12.2014; опубл. 20.05.2016. – 12 с. : ил.

Личный вклад автора в работах, опубликованных в соавторстве, заключается в следующем: [1], [2] – построение моделей, обработка полученных результатов; [3] – выработка идеи публикации, разработка основных теоретических положений; [4], [6], [7], [8] – проведение аналитического обзора, формулировка выводов.

Подписано в печать 14.06.2016 г.
Бумага офисная. Печать: цифровая.
Усл. печ. л. 1,16

Формат 60x84 1/16
Тираж 120 экз.
Заказ № 485

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего профессионального образования

«Сибирский государственный индустриальный университет»
654007, г. Новокузнецк, ул. Кирова 42
Издательский центр СибГИУ