

На правах рукописи



Белоусов Евгений Викторович

**ЭЛЕКТРОПРИВОД МЕХАНИЗМА ПОДАЧИ СТАНА
ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ ТРУБ с СИНХРОННОЙ
РЕАКТИВНОЙ МАШИНОЙ НЕЗАВИСИМОГО
ВОЗБУЖДЕНИЯ**

Специальность 05.09.03 – “Электротехнические комплексы и системы”

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

0 4 СЕН 2014



005552197

Челябинск – 2014

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования “Южно-Уральский государственный университет” (национальный исследовательский университет) на кафедре электропривода и автоматизации промышленных установок.

Научный руководитель –
канд. техн. наук, доцент **Григорьев Максим Анатольевич**.

Официальные оппоненты:

Путов Виктор Владимирович, д-р техн. наук, проф., декан факультета электротехники и автоматики, проф. кафедры “Системы автоматического управления” Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета “ЛЭТИ” им. В.И. Ульянова (Ленина), г. Санкт-Петербург.

Сарапулов Федор Никитич, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой “Электротехника и электротехнологические системы” Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования “Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина”, г. Екатеринбург.

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования “Национальный исследовательский Томский политехнический университет”, г. Томск.

Защита состоится 03 октября 2014 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д212.298.05 при ФГБОУ ВПО “Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)”, г. Челябинск, пр-т Ленина, 76, ауд. 1001.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО “Южно-Уральский государственный университет” (национальный исследовательский университет) и на сайте ЮУрГУ по адресу: <http://www.susu.ac.ru:8001/ru/dissertation/d-21229805/belousov-evgeniy-viktorovich>

Автореферат разослан “28” августа 2014 г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим направлять по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, гл. корпус, Ученый совет ЮУрГУ, тел./факс: +7 (351) 267-91-23.

E-mail: grigorevma@susu.ac.ru.

Учёный секретарь
диссертационного совета Д212.298.05
д-р. техн. наук, проф.



Ю.С. Усынин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Актуальность работы. Производство тонкой и сверхтонкой трубы с минимальной разнотолщинностью востребовано в атомной, автомобильной промышленности и вертолетостроении. Получить трубы со сверхтонкой стенкой и высоким качеством поверхности можно на станах холодной прокатки труб (ХПТ), при этом сечение заготовки уменьшается на 75–85 %, а прочность трубы получается заметно выше по сравнению с продукцией, полученной при горячей прокатке. Дальнейшее повышение качества холодного проката позволит снизить процент отбраковки дорогостоящей трубы и даст экономический эффект.

Анализ работы станов холодной прокатки показал, что наиболее “слабым” звеном в технологическом процессе является механизм подачи, к которому предъявляются наиболее высокие требования по быстрдействию и точности позиционирования, перегрузкам по моменту и условиям эксплуатации.

Указанные требования могут быть достигнуты только при системном подходе, который заключается в учете совместной работы узлов электропривода: рабочего механизма, механического преобразователя, двигателя, электрического преобразователя и системы управления. Такой подход стал возможен не только за счет развития силовой полупроводниковой техники и микропроцессорных систем управления, но и обусловлен возможностями, которые дают электромеханические преобразователи. Отказ от традиционных подходов к проектированию двигателя переменного тока в пользу несинусоидального возбуждения многофазной электрической машины переменного тока позволяет реализовать в ней новые привлекательные качества – большие перегрузочные моменты при простоте конструкции машины.

Таким образом, научно-техническая задача создания нового электропривода с использованием системного подхода, который позволит снизить разнотолщинность холоднокатаной трубы, повысит ее качество – является актуальной.

Степень научной разработанности проблемы. Большой вклад в общую теорию современного металлургического электропривода постоянного тока внесли ученые Бычков В.П., Дружинин Н.Н., Дралюк Б.Н., Лукьянов С.И., Усынин Ю.С., Филатов А.С. Развитие теории приводов переменного тока для объектов металлургического производства связано с трудами Осипова О.И., Сарапулова Ф.Н., Лиро Т. и др.

Долгое время регулирование скорости в механизмах пилигримовой группы выполнялось механическим способом. В 1986 г. Вейнгером А.М. был впервые теоретически обоснован и практически реализован регулируемый электропривод переменного тока на механизме подачи стана ХПТ. В 2008 г. Остроуховым В.В. решена научно-техническая задача замены информационно-управляющей системы при сохранении силовой части полупроводникового преобразователя. Григорьевым М.А. в 2013 г. теоретически показаны новые возможности по увеличению быстрдействия электропривода, которые могут быть получены в системе на базе синхронного реактивного электропривода с независимым управлением по каналу возбуждения (СРМНВ).

Между тем, если рассматриваемую задачу решать с позиции повышения точности позиционирования трубы, то эта проблема далека от завершения, так как требует рассматривать стан ХПТ как многосвязную систему.

Объект исследования – синхронный реактивный электропривод с независимым управлением по каналу возбуждения механизма подачи стана ХПТ–450.

Предмет исследования – переходные процессы в контурах скорости и момента при использовании в качестве электромеханического преобразователя синхронной реактивной машины с различными способами управления.

Целью диссертационной работы является создание электропривода подачи стана ХПТ с улучшенными точностными показателями позиционирования рабочего органа при сохранении заданного быстродействия системы.

Идея работы. Выбор силовых элементов электропривода подачи нужно вести с учетом взаимного влияния главного привода клетки, а при выборе структур управления необходимо еще и ориентироваться на соотношение динамических показателей “неизменяемой части” и наиболее быстродействующего контура регулирования.

Задачи исследования:

- анализ требований технологического процесса к электроприводу подачи;
- разработка математической модели электропривода подачи, реализованного на базе СРМНВ;
- оценка адекватности математической модели;
- разработка методики синтеза силовой части и системы управления силовой части электропривода подачи по критерию минимума ошибки позиционирования;
- оценка возможностей структур с подчиненным регулированием и системы с модальным управлением для электропривода подачи.

Методы исследований. В работе использовались методы теоретического и экспериментального исследований.

Теоретические методы исследования: теория электропривода и полупроводниковой преобразовательной техники, метод конечных элементов, частотные методы теории регулирования, методы математического моделирования с использованием суперкомпьютерных технологий, статистические методы исследований.

Методы экспериментального исследования: наблюдения, измерения, которые производились как непосредственно на работающем стане, так и в лабораторных условиях, где в качестве объекта исследований выступал макет электропривода, наиболее близкий по своей структуре производственному.

Достоверность полученных результатов определялась обоснованностью принятых допущений, корректностью использования математического аппарата и экспериментальным подтверждением основных теоретических выводов.

Научные положения, выносимые на защиту, и их научная новизна

1. Разработана *математическая модель* электропривода подачи стана ХПТ, в которой механическая часть представлена как двухмассовая, преобразователь частоты аппроксимирован непрерывным динамическим звеном, электродвигатель – системой с распределенными параметрами, *отличающаяся* тем, что

в расчетной модели выполнен учет влияния работы главного привода клетки на механизм подачи.

2. Предложена *методика* выбора силового электротехнического оборудования и законов управления электроприводом подачи стана ХПТ, представленного в виде многосвязной системы по критерию минимума ошибки позиционирования рабочего органа, *отличающаяся* тем, что выбор структуры управления определяется соотношением частот среза одного из контуров “неизменяемой части” электропривода и контура регулирования электромагнитного момента.

Практическое значение работы заключается в следующем:

– предложенная математическая модель может быть положена в основу построения расчетной методики высокоточных электроприводов, работающих с широким диапазоном регулирования скорости;

– методика синтеза силовой части и системы управления электропривода была использована при разработке этапов наладки позиционных электроприводов и успешно применяется на производственных предприятиях, что подтверждается актами о внедрении.

Результаты диссертационной работы нашли применение:

– и были приняты к внедрению: в пятом цехе ОАО “ЧТПЗ” (г. Челябинск) при модернизации электропривода подачи стана ХПТ; в ООО НТЦ “Приводная техника” (г. Челябинск) при разработке тяговых электроприводов;

– в учебном процессе на кафедре электропривода ФГБОУ ВПО “Южно-Уральский государственный университет”;

– при выполнении Гранта Президента РФ (Соглашение №14.124.13.1403-МК от 04.02.2013).

Апробация работы. В полном объеме работа докладывалась и обсуждалась на расширенных заседаниях кафедр:

– “Электропривод и автоматизация промышленных установок” ФГБОУ ВПО “Южно-Уральский государственный университет”, г. Челябинск;

– “Электропривод и электрооборудование” ФГБОУ ВПО “Национальный исследовательский Томский политехнический университет”.

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на конференциях и семинарах, в том числе на: XV научнотехнической Международной конференции “Электроприводы переменного тока”, Екатеринбург, 2012 г.; Отраслевой конференции “ANSYS в энергетике”, Санкт-Петербург, 2012 г.; VII Международной конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2012, Иваново, 2012 г.; Пользовательской конференции “ANSYS 2013: направления развития инженерного анализа”, Москва, 2013 г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 10 научных статей (из них – 6 в периодических изданиях, **рекомендованных ВАК РФ**), 4 доклада на конференциях, 1 патент РФ на изобретение, 5 свидетельств РФ об официальной регистрации программ для ЭВМ.

Личный вклад автора состоит в постановке задач исследования, разработке методов исследований, в формулировании и доказательстве научных по-

ложений. В работах [1, 3, 6] автору принадлежат: разработка математических моделей и результаты моделирования; в публикациях [2, 4, 5, 7–16] – ведущая роль в обосновании методов исследований.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и приложения, изложенных на 145 страницах машинописного текста, содержит 66 рисунков, 7 таблиц, список используемой литературы из 214 наименований.

Соответствие научной специальности: исследование, проводимое в рамках диссертационной работы, полностью соответствует формуле и пп. 1 и 3 области исследования, приведённой в паспорте специальности 05.09.03.

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы научные положения, их новизна, практическая значимость.

В первой главе выполнен анализ существующих проблем, сформулированы требования к электроприводу подачи, что позволило построить зависимость разнотолщинности Δs от величин перерегулирования σ и ошибки подачи Δh рабочего органа (см. рис. 1). Поверхность 1 (рис. 1), которая в большей степени зависит от перерегулирования σ , может рассматриваться как количественная оценка требований к разрабатываемому электроприводу.

Во второй главе сформулировано первое научное положение, определены основные допущения для разрабатываемой математической модели, статистическими методами сопоставлены результаты моделирования с экспериментальными данными. Выполнен анализ влияния главной клетки на электропривод подачи.

В третьей главе сформулировано второе научное положение, перечислены и обоснованы основные этапы методики синтеза силовой части и системы управления электроприводом. На примере электропривода подачи детально рассмотрены этапы: параметрического синтеза электропривода, оценки разнотолщинности Δs с учетом дискретного режима работы электропривода.

В четвертой главе рассмотрены этапы синтеза системы управления электроприводом. Дана оценка предельных значений частоты среза контура регулирования момента в системах с векторным и релейно-векторным управлением. Сформулирован критерий выбора структуры управления.

В заключении сформулированы основные выводы и даны результаты исследований в соответствии с целью и задачами исследований.

В приложении даны расчеты экономического эффекта и акты о внедрении результатов работы в производственный процесс.

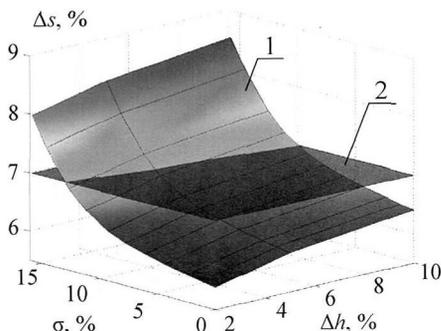


Рис. 1. Зависимость разнотолщинности трубы Δs от перерегулирования σ и от ошибки подачи Δh (1); (2) – поверхность допустимой величины разнотолщинности

ЗАЩИЩАЕМЫЕ НАУЧНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1 научное положение: математическая модель электропривода подачи стана ХПТ. Как правило, при описании электропривода объектов металлургического производства принимают ряд допущений. *Во-первых*, электромеханический преобразователь представляют в виде системы с сосредоточенными параметрами и при разработке модели большее внимание уделяют полупроводниковому преобразователю и системе управления. Однако, при проектировании электроприводов с новыми типами электромеханических преобразователей, например с СРМНВ, требуется обязательный учет характера распределения линий магнитной индукции в зазоре. Этот учет необходимо выполнять и для традиционных электроприводов, если привод работает со сверхвысоким диапазоном регулирования скорости, когда приходится учитывать зубцовые пульсации индукции в зазоре. *Во-вторых*, электропривод рассматривают как многосвязную систему только в длинных технологических цепочках. Между тем, позиционирование трубы может частично осуществляться и после попадания трубы в валки прокатной клетки, что требует рассматривать электропривод подачи и главный привод прокатной клетки в виде многосвязной системы, в которой связь элементов осуществляется через прокатываемую трубу.

Разрабатываемая математическая модель содержит следующие узлы: механический преобразователь (конический редуктор и винтовую передачу), СРМНВ, многофазный полупроводниковый преобразователь, узел формирования фазных токов (модуль 1, рис. 2) и главный электропривод прокатной клетки (модуль 2, рис. 2).

В модели электропривода стана ХПТ были приняты следующие *допущения*:

– многомассовая система была аппроксимирована двухмассовой, что было доказано методом декомпозиции в работах Коффа З.А., Остроухова В.В. При этом первая “масса” включала вращающиеся части двигателя и конического редуктора, вторая – перемещаемую трубу, а винтовая передача являлась упругим элементом, связывающим эти массы;

– в начале прокатки усилие, направленное вдоль трубы при ее позиционировании, передается “жестко” (доказано Коффом З.А.);

– при расчете электромагнитного момента методом конечных элементов в работах Сарапулова Ф.Н. доказано, что влиянием индукционных токов можно пренебречь;

– в диапазоне частот тестового сигнала от нуля до половины несущей частоты широтно-импульсного модулятора (ШИМ) преобразователь частоты был представлен линейным звеном, инерционные свойства которого определялись временем выполнения одного скана программы микропроцессорной системы управления. Такая аппроксимация вполне допустима, так как частота среза контура регулирования тока, как правило, не превышает 10% от несущей частоты ШИМ сигнала.

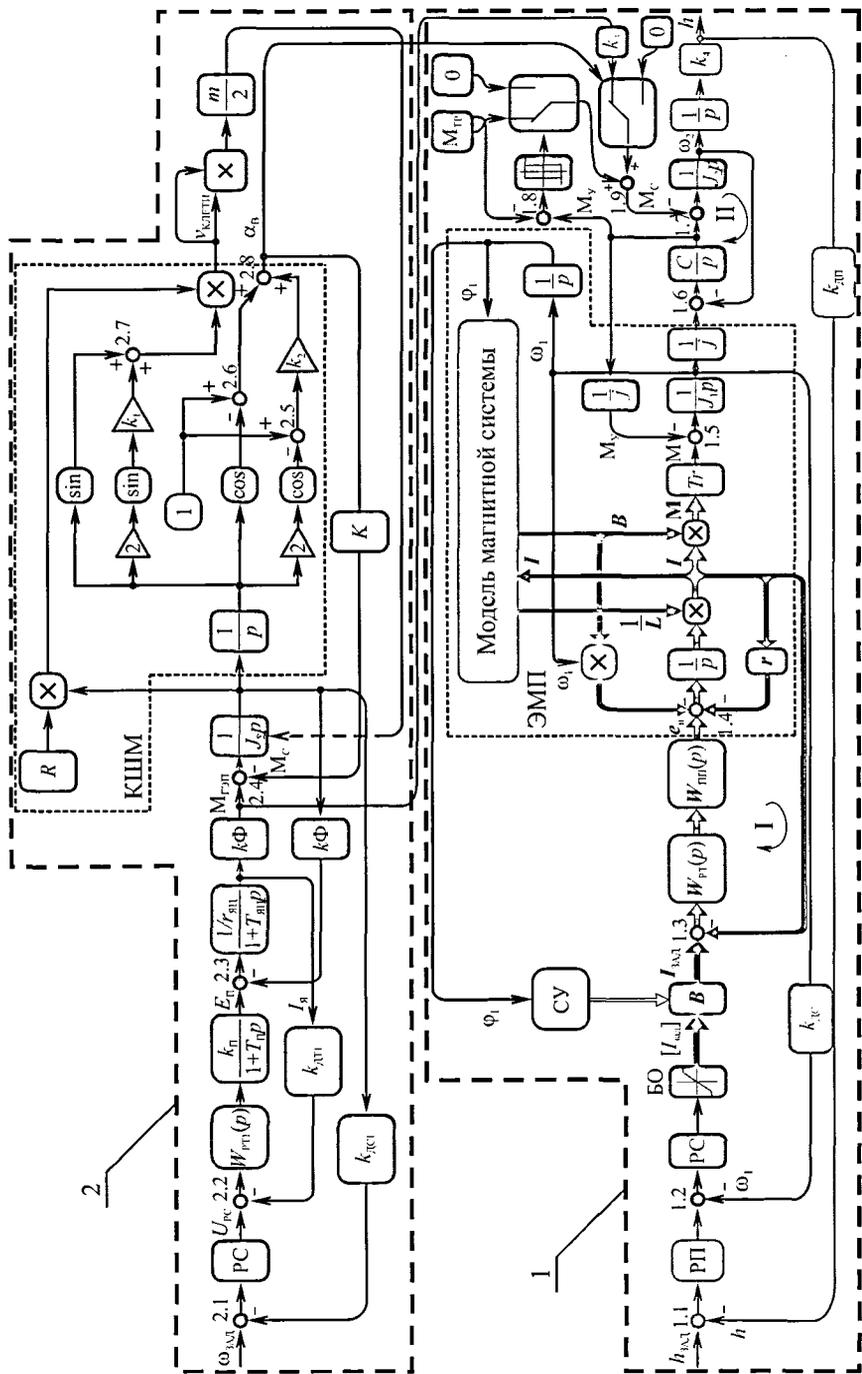


Рис 2. Структурная схема электропривода подачи (модуль 1) с учетом работы главного электропривода прокатной клетки (модуль 2)

Предлагаемая *модель* многосвязной системы содержит два модуля: электропривод подачи (модуль 1, рис. 2) и главный электропривод прокатной клетки (модуль 2, рис. 2). Воздействие главного электропривода на привод подачи, осуществляемое через прокатываемую трубу, на структурной схеме показано связью, идущей от блока якорной цепи (модуль 2, рис. 2) к сумматору M_c (модуль 1, рис. 2), и масштабируется коэффициентом k_3 .

В модели *электропривод подачи* (модуль 1, рис. 2) выполнен по подчиненной схеме регулирования положения h на базе СРМНВ и содержал несколько блоков: “неизменяемую часть” (контур II на рис. 2), включающую упругое звено C/p , рабочий орган $1/J_2p$, охваченные единичной отрицательной обратной связью по скорости ω_2 рабочего органа; электромеханический преобразователь (ЭМП, рис. 2) – СРМНВ (многофазную синхронную реактивную машину с пассивным явнополюсным ротором, управляемую в функции положения ротора φ_1 током несинусоидальной формы, в большинстве случаев прямоугольной); узла формирования фазных токов (СУ и В). Контур регулирования фазных токов СРМНВ I (рис. 2) совместно с блоком “Модель магнитной системы” образовывали контур косвенного регулирования электромагнитного момента. Система работает как многоконтурная структура управления с внешним контуром регулирования положения, настраиваемым регулятором РП. Блоком ограничения (БО) выставались максимальные значения статорных токов. Контур регулирования фазных токов включали полупроводниковый преобразователь $W_{пп}(p)$, якорную цепь с активным сопротивлением каждой фазы r и настраивались регуляторами тока $W_{р1}(p)$.

Расчет промежуточных координат модели *электропривода подачи* выполнялся для блока “Модель магнитной системы” в среде *ANSYS Maxwell*, а для остальных модулей – в среде *ANSYS Simplorer* в следующей последовательности: по сигналам φ_1 и фазных токов I , рассчитывалась матрица M , в ячейках которой находились составляющие электромагнитного момента от каждой фазы. Блок T_T выполнял операцию суммирования всех элементов матрицы, в результате чего рассчитывался электромагнитный момент M . Матрицей B , в которой выполнялось смещение пространственного результирующего тока относительно углового положения ротора φ_1 , выполнялась настройка системы электропривода.

Модель *главного электропривода прокатной клетки* содержала типовые звенья, которыми описывается электропривод постоянного тока. Электропривод выполнен по подчиненной схеме регулирования. Механическая часть электропривода представлена кривошипно-шатунным механизмом (КШМ, модуль 2, рис. 2). Расчет модели главного привода прокатной клетки выполнялся в следующей последовательности: по выходной скорости электродвигателя вычислялись линейная скорость клетки $\vartheta_{клетн}$ и угол поворота калибров α_B , момент, создаваемый главным электроприводом $M_{ГЭП}$.

В модели электропривода *впервые* предложено учитывать влияние главного электропривода на привод подачи, которое на структуре реализовано связью от переменной $M_{ГЭП}$ через масштабирующий коэффициентом k_3 и подается на вход сумматора 1.9 (рис. 2).

Оценка *адекватности* математической модели выполнялась сопоставлением расчетных и экспериментальных данных статистическими методами. Она проводилась для участка торможения электропривода подачи, так как именно на нём происходит взаимодействие главного электропривода и привода подачи. Действующий электропривод подачи стана ХПТ реализован на базе традиционной синхронной машины с возбужденным ротором. Поэтому для корректного сопоставления в разработанной модели блок ЭМП, описывающий СРМНВ, был заменен на блок трехфазного синхронного двигателя с обмоткой возбуждения на роторе. Оценка проводилась в два этапа.

Сначала на основании выборки из 10 экспериментальных осциллограмм активной составляющей тока электропривода подачи, полученных на действующем объекте, была построена регрессионная зависимость, описывающая переходный процесс тока на участке торможения:

$$\bar{I} = -469,18 \cdot t^3 + 864,58 \cdot t^2 - 382,1 \cdot t + 47,95.$$

Затем результаты математического моделирования сопоставлялись с экспериментальными данными, полученными на регрессионной зависимости. Результаты приведены в табл. 1, где $I_{\text{расч}}$ – расчетное значение тока, полученное в ходе моделирования; $I_{\text{эксп}}$ – экспериментальное значение тока, полученное исходя из регрессионной зависимости; $\Delta I, \Delta I^2$ – соответственно разность и квадрат разности между экспериментальными и расчетными величинами тока электропривода; t – квантиль Стьюдента; $S_{\Delta I}$ – стандартное отклонение расчетных значений; $\mu_{\Delta I}$ – математическое ожидание значений ΔI . При сопоставлении расчетных и экспериментальных данных коэффициент Стьюдента $t = 0,46$ не выходит за пределы критического значения ($t_{\text{крит}} = 1,813$), на основании чего можно сделать вывод об адекватности предложенной математической модели.

Таблица 1

Сопоставление расчетных и экспериментальных данных

$t, \text{с}$	$I_{\text{расч}}$	$I_{\text{эксп}}$	ΔI	ΔI^2
0,2	2,2	2,2	0,0	0,0
0,22	1,0	0,99	-0,01	0,0001
0,23	0,1	0,28	0,18	0,0324
...
0,35	0,0	0,01	0,01	0,0001
$s_d = \sqrt{\frac{\sum \Delta I^2 - (\sum \Delta I)^2}{N - 1}}$	0,29			
$t = \frac{\bar{\Delta I} - \mu_{\Delta I}}{\frac{S_{\Delta I}}{\sqrt{N}}}$	0,46			
$t_{\text{крит}}$	1,813			

Разработанная математическая модель электропривода позволила уточнить расчетную методику выбора электропривода по нагреву. Конечное быстродействие контура регулирования скорости в главном электроприводе прокатной

клетки приводит к изменению графика момента сопротивления M_C , при этом изменяется форма кривой осциллограммы электромагнитного момента, а следовательно, и нагрев двигателя. Изменение графика момента сопротивления обусловлено тем, что при позиционировании трубы приводом подачи на участке торможения в момент времени t_{Mc} включается главный привод. В момент начала прокатки главный привод создает дополнительный тормозной момент для электропривода подачи. При ограниченной полосе равномерного пропускания частот контура регулирования скорости главного электропривода момент сопротивления M_C на валу электропривода подачи изменяет свою форму со ступенчатой на криволинейную.

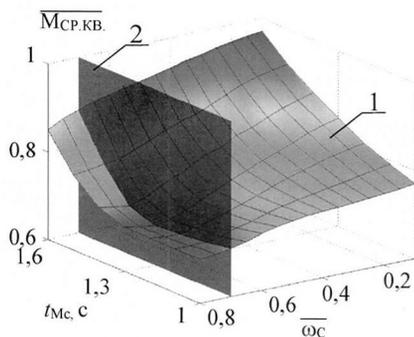


Рис. 3. Зависимость $\overline{M_{СР.КВ}}$ электропривода подачи от $\overline{\omega_c}$ контура регулирования скорости электропривода прокатной клетки и от времени начала приложения нагрузки t_{Mc}

скорости главного привода на 10...20%. Обусловлено это увеличением времени переходного процесса наброса нагрузки и изменением его характера с монотонного на апериодический, а в некоторых случаях и колебательный, вызывающий дополнительные вибрации. Плоскостью 2 (рис. 3) показана зона допустимого изменения частоты среза контура регулирования скорости, в которой перегрев находится в допустимых пределах.

Задача уточнения нагрева электропривода особенно актуальна при выборе нового электропривода, так как приближенные методики расчета электропривода по мощности требуют выбирать двигатель с запасом. Электропривод, работающий в пуско-тормозных режимах и выбранный с запасом по мощности, может иметь не самый лучший показатель M/J , где M – номинальный момент двигателя, а J – момент инерции ротора.

Для учета влияния конечного быстродействия главного электропривода на нагрев электропривода подачи по разработанной математической модели оценивалась зависимость среднеквадратичного электромагнитного момента $\overline{M_{СР.КВ}}$ привода подачи от времени начала приложения усилия t_{Mc} и частоты среза контура $\overline{\omega_c}$ скорости электропривода прокатной клетки (см. рис. 3). При этом базовое значение частоты среза принималось равным 100 рад/с. Диапазон изменения t_{Mc} выбран на основе статистической обработки и может изменяться от 1 до 1,5 с при общей продолжительности цикла 2 с. Как видно из рис. 3, среднеквадратичный момент возрастает по мере уменьшения частоты среза контура

2 научное положение: методика выбора силового электротехнического оборудования и законов управления электроприводом подачи. Возможности системного подхода при разработке позиционного электропривода, заключающиеся в совместном учете при проектировании механической части и системы управления, показаны в работах Терехова В.М., Усынина Ю.С. Дополнительные потребительские качества могут быть получены, если учесть возможности, которые дают новые типы электромеханических преобразователей, например СРМНВ: большую механическую жесткость вала в радиальном направлении, широкую полосу равномерного пропускания частот в контуре регулирования момента, большие перегрузки по моменту, линейную зависимость между моментом и током в зоне перегрузки. Так, если при проектировании электропривода обеспечить определенное соотношение между частотами среза контуров регулирования электромагнитного момента I и “неизменяемой части” II (рис. 2, модуль 1), то в некоторых случаях можно обеспечить заданные показатели качества регулирования в более простой и наиболее распространенной схеме подчиненного регулирования, отказавшись от системы с модальным управлением, требующей при настройке большего количества исходных данных.

В работе предложена методика синтеза электропривода, общая структура которой представлена на рис. 4. Так как полупроводниковый преобразователь аппроксимируется линейной передаточной функцией, а СРМНВ имеет линейную моментную характеристику даже в зоне перегрузок, то вполне оправдано при синтезе системы использование частотных методов. Первый этап, на котором определялась оптимальная форма кривой переходного процесса скорости, может рассматриваться как исходное задание для всех последующих. На втором этапе допустимая величина перерегулирования ограничивалась параметрическими средствами (выбором оптимального передаточного числа редуктора j и параметров двигателя – отношения активных частей диаметра ротора D_p к его длине l), и тем самым облегчались условия настройки на последующих этапах. На третьем этапе выполнялась оценка составляющей величины перерегулирования, которая связана с дискретным режимом работы электрической машины в зоне низких частот вращения. Ошибка регулирования ограничивалась на этом этапе выбором параметров электромеханического преобразователя. Четвертый этап был разделен на промежуточные. Сначала обеспечивалось максимальное быстродействие контура регулирования момента (КРМ) выбором структуры регулирования II и параметров корректирующих связей $W_{PKM}(p)$ (рис. 4), что значительно облегчало условия настройки системы управления СУ в подчиненной структуре управления и являлось необходимым условием высокого качества регулирования выходной координаты в модальных системах. Далее сопоставлялись значения перерегулирования σ в схемах с подчиненным регулированием и модального управления. Очевидно, что если частота среза контура “неизменяемой части” II будет стремиться к бесконечности, а частота среза КРМ I (рис. 2) уменьшаться до минимального значения, то показатели регулирования, достигаемые в структурах с подчиненным регулированием и модальным управлением, становятся близкими.

Дадим детальное описание и оценку возможностей каждого из этапов.

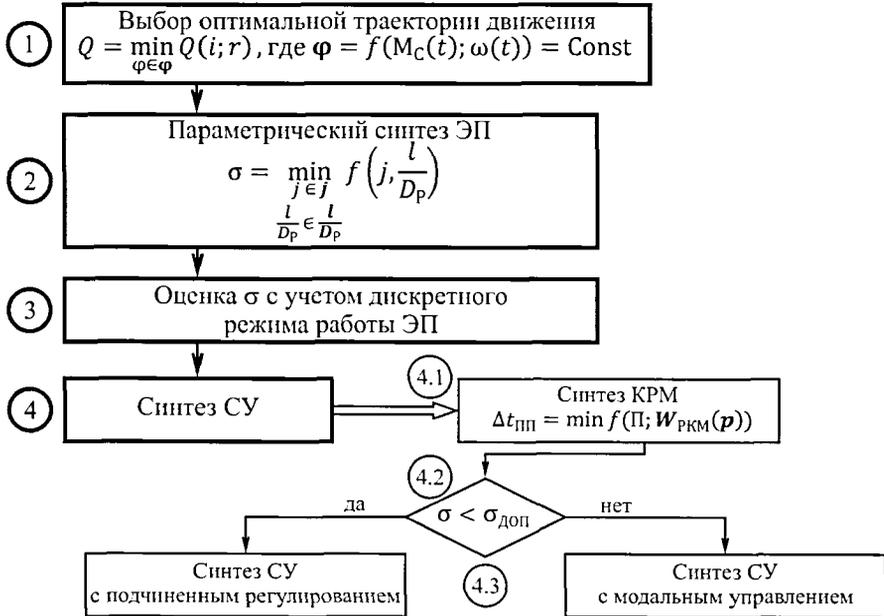


Рис. 4. Методика выбора силового оборудования и структуры системы управления

На *первом этапе* решалась задача поиска оптимальной кривой скорости рабочего органа $\omega(t)$. Критерием расчета принимался минимум электрических потерь в электроприводе $Q = \min_{\varphi \in \Phi} Q(i; r)$ при постоянном значении суммарного угла поворота рабочего органа $\varphi = f(M_c(t); \omega(t)) = \text{Const}$. Предполагалось, что переменные электрические потери зависели только от тока и активного сопротивления обмотки. Данная задача в вариационном исчислении относится к классу изопериметрических. Расчет оптимальной формы кривой скорости $\omega(t)$ выполнялся методом наискорейшего спуска. Результаты расчета показали, что оптимальное соотношение времени пуска ко времени торможения при заданном графике нагрузки составляло примерно 2:1 и зависело от времени начала воздействия главного электропривода прокатной клетки. На это же соотношение указывается в работах Коффа З.А.

Полученный результат можно объяснить “рваным” графиком нагрузки электропривода. Позиционный электропривод подачи, работающий на участке разгона, преодолевает момент сопротивления, создаваемый перемещаемой трубой, а на участке торможения к этому моменту добавляется усилие, обусловленное влиянием главного привода. Наилучшее использование электропривода по нагреву идет при постоянном графике электромагнитного момента и при изменяющейся во времени кривой момента сопротивления, динамический момент на

участке торможения существенно превышает момент на участке разгона электропривода.

Параметрическая оптимизация электропривода (выбор передаточного числа редуктора и параметров двигателя l/D_p) выполнялась на *втором этапе*. На возможности обеспечения устойчивости и качества процессов в контуре регулирования положения параметрическими методами обращалось внимание в диссертационной работе Усынина Ю.С. Так, если в системе с “легким” двигателем (с малым отношением J/M_H) изменять передаточное число редуктора, удавалось снизить величину резонансного максимума частотной характеристики контура регулирования положения, обусловленную структурной неустойчивостью контура “неизменяемой части” II (рис. 2), а в замкнутых системах подчиненного регулирования узлами коррекции эту же задачу решить не удается. В традиционных электроприводах частота среза контура регулирования скорости иногда оказывается меньше частоты среза контура “неизменяемой части” II. Новые возможности появляются в системе, если учесть, что в электроприводе с СРМНВ за счет большой механической жесткости ротора в радиальном направлении удастся выполнить ротор с большим отношением l/D_p , что позволяет уменьшить отношение J/M_H , а двигатель сделать более “легким”.

В качестве критерия оптимизации на этом этапе была выбрана экстремальная задача (рис. 4, блок 2):

$$\sigma = \min_{j \in J} f\left(j, \frac{l}{D_p}\right),$$
$$\frac{l}{D_p} \in \frac{l}{D_p}$$

где j – суммарное передаточное отношение редуктора; D_p , l – диаметр и длина активной части магнитопровода ротора соответственно; J , l , D_p – область допустимых значений передаточного отношения редуктора, длины и диаметра магнитопровода соответственно.

Выбор параметров силовых элементов электропривода на этом этапе выполнялся в следующей последовательности. Сначала выполнялся расчет частот среза контуров регулирования скорости и “неизменяемой части” II (рис. 2). В случае “тяжелого” двигателя находилось отношение l/D_p , при котором достигался минимум J/M_H . В этом случае область допустимых значений l/D_p ограничивалась прогибом вала двигателя и условиями охлаждения статорной обмотки. Затем минимизировалось значение перерегулирования σ воздействием на передаточное отношение j , при этом нижняя граница области допустимых значений j зависела от предельного значения электромагнитного момента. В некоторых случаях эта граница близка значению j , определенному из условия минимума суммарной кинетической энергии комплекса “Электропривод – рабочий орган”.

Предложенный алгоритм параметрической оптимизации был использован при выборе силового оборудования электропривода подачи стана ХПТ-450. Расчет показал, что частота среза контура “неизменяемой части” лежала в диапазоне 30...35 рад/с, а частота среза контура регулирования скорости – 15...20 рад/с. Такое соотношение было обусловлено применением серийного синхронного двигателя с относительно большим диаметром. В электроприводе с СРМНВ

мощностью $P_H = 250$ кВт предельное значение $//D_p$ по условиям прогиба вала допускалось увеличить в 4...5 раз, однако по условиям нагрева это значение было ограничено 3. Наконец, уменьшая передаточное число редуктора, удалось минимизировать величину перерегулирования σ положения рабочего органа, но при этом нижняя граница j определялась допустимым значением среднеквадратичного момента по условиям нагрева двигателя. Выбор передаточного отношения j выполнялся частотными методами. Воздействуя на j , установлено, что допустимая разнотолщинность Δs (рис. 1) обеспечивалась при частоте среза контура регулирования скорости на 20% ниже частоты среза контура “неизменяемой части” II (рис. 2).

На *третьем* этапе (рис. 4) уточнялось значение перерегулирования σ с учетом дискретного режима работы электропривода, который обусловлен зубчатой структурой магнитопровода любого электромеханического преобразователя при работе электропривода в зоне сверхнизких скоростей на конечном участке позиционирования рабочего органа. Такой учет особенно актуален для электроприводов с нетрадиционной конструкцией электродвигателя. Так, в вентильно-индукторных электроприводах с двойной зубчатостью (статор и ротор электрической машины явнополюсные) пульсации электромагнитного момента могут достигать 50%. В электроприводе с СРМНВ электрическая машина имеет “одностороннюю” зубчатость (ротор является явнополюсным, а статор – “гладким”), но при этом уровень пульсаций момента может превышать допустимое значение.

Оценка величины перерегулирования σ выполнялась по разработанной математической модели (рис. 2). Сначала в системе с внешним контуром регулирования скорости вычислялся уровень пульсаций электромагнитного момента в функции номинального момента и числа пар полюсов для различных типов электромеханических преобразователей. Затем в системе с подчиненным регулированием положения рабочего органа определялась величина перерегулирования σ , которая в электроприводах с СРМНВ оказывается выше на 5...10 %, чем в асинхронных, что обусловлено явнополюсной геометрией ротора СРМНВ. Для того чтобы ограничить уровень этих пульсаций, необходимо согласовать номинальную скорость рабочего органа и двигателя не только выбором передаточного отношения редуктора, но и числа пар полюсов электрической машины.

Задача выбора структуры системы управления и параметров корректирующих связей решалась на *четвертом* этапе. В многомассовых системах наилучшие показатели регулирования достигаются в структурах модального управления. Однако эти возможности могут быть достигнуты лишь при очень высоком быстродействии самого внутреннего контура регулирования и при детальном описании объекта управления. В некоторых случаях удается обеспечить показатели качества в более простой схеме с подчиненным регулированием переменных, но для этого необходимо найти область, в которой величина перерегулирования σ остаётся в допустимых пределах. С одной стороны, эта область ограничена полосой пропускания контура “неизменяемой части” II, с другой стороны – быстродействием КРМ. Независимо от типа системы управления СУ (рис. 4,

блок 4.3) настройка на последующих этапах требует обеспечить максимальное быстродействие КРМ.

Синтез КРМ выполнялся по критерию:

$$\Delta t_{\text{пп}} = \min f(\Pi; W_{\text{РКМ}}(\mathbf{p})),$$

где Π – функциональные решения (тип структуры управления), $W_{\text{РКМ}}(\mathbf{p})$ – вектор, состоящий из последовательных корректирующих устройств, $\Delta t_{\text{пп}}$ – время переходного процесса КРМ.

Выбор структуры управления Π по указанному критерию выполнялся при заданных ограничениях показателей: робастности, пульсаций электромагнитного момента, минимуму перегулирования. Для сопоставления были выбраны схемы векторного управления (с частотно-токовым регулированием, с поддержанием постоянного вектора потокосцепления ротора, трансвекторные) и релейно-векторного управления, более известные как структуры с ДТС-управлением (Direct Torque Control).

Анализ этих схем по установленной системе оценок показал, что наилучшие показатели достигаются в схемах с ДТС-управлением, в которых регулирование координаты электромагнитного момента осуществляется изменением угла между векторами потокосцепления статора и ротора. При этом максимальное быстродействие ограничено временем выполнения скана программы цифрового сигнального процессора. Известно, что отказ в существующих ДТС-структурах от пространственной векторной модуляции в пользу “табличного” управления полупроводниковым преобразователем позволил значительно сократить задержку реакции системы в КРМ. Дальнейшее улучшение показателей возможно при снижении трудоемкости вычислительных процедур, необходимых для определения переменных электромагнитного момента и потокосцепления статора, и делает задачу упрощения математической модели при сохранении точности расчетов актуальной.

КРМ настраивался последовательными корректирующими устройствами $W_{\text{РКМ}}(\mathbf{p})$, состоящими из двух релейных регуляторов: потокосцепления статора и момента, на входе которых алгебраически складывались сигнал задания регулируемой координаты и её оценка с выхода блока модели электропривода. Выбор гистерезиса релейных регуляторов выполнялся традиционным способом по критерию минимума пульсаций момента. Нижняя граница ширины гистерезиса определялась максимально допустимой частотой коммутации полупроводниковых ключей. Увеличение быстродействия КРМ было реализовано за счет упрощения математической модели электропривода. Такое упрощение вполне допустимо для электроприводов с СРМНВ, в которых зависимость между моментом и током имеет линейный характер даже в зоне перегрузок. Линейная зависимость моментной характеристики обеспечивается в структурах управления с равными сигналами задания на возбуждение и активную составляющую тока и обусловлена эффектом последовательного возбуждения, когда размагничивающая реакция якоря компенсируется увеличением сигнала задания на составляющую тока возбуждения.

На **заключительном** этапе **впервые** было выполнено сопоставление показателей регулирования в схемах с подчиненным регулированием и модальным управлением при изменении частот среза контуров регулирования “неизменяемой” части II и КРМ.

Для сопоставления были выбраны многоконтурная схема подчиненного регулирования с внешним контуром регулирования положения рабочего органа h и многоконтурная схема с модальным регулятором, в которой промежуточные координаты вычислялись в наблюдателе. В обоих случаях электромеханическая часть была реализована на базе СРМНВ и описывалась математической моделью (рис. 2, модуль ЭМП). В исходной системе принимались: частота среза КРМ $\omega_{\text{КРМ}} = 1500$ рад/с, скорости $\omega_1 = 200$ рад/с и контура “неизменяемой части” II $\omega_{\text{C}} = 20$ рад/с. В рассматриваемых структурах величина перерегулирования σ регистрировалась при изменении частот среза КРМ $\omega_{\text{КРМ}}$ и “неизменяемой части” II ω_{CPO} . С целью уточнения зависимостей градиентным методом Флетчера-Ривса определялись критические точки.

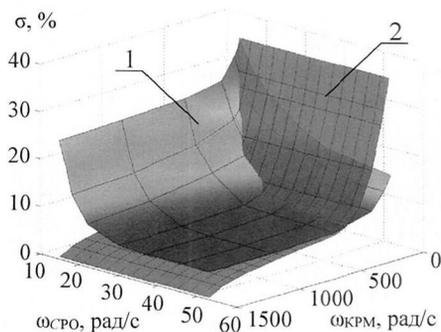


Рис. 5. Зависимость перерегулирования в контуре положения от частоты среза КРМ I $\omega_{\text{КРМ}}$ и частоты среза контура II ω_{CPO} в схемах с подчиненным регулированием (1) и модальным управлением (2)

На рис. 5 представлены зависимости (поверхности) величины перерегулирования для структуры подчиненного регулирования (поверхность 1) и модального управления (поверхность 2). Первая поверхность содержит слабовыраженный минимум. Как видно из рис. 5, величина перерегулирования уменьшается как с увеличением частоты ω_{CPO} , так и $\omega_{\text{КРМ}}$. На рис. 5 видно, что при частотах $\omega_{\text{CPO}} > 50$ рад/с влиянием второй массы на условия устойчивости можно пренебречь. В этой области система может рассматриваться одномассовой, и при настройке подчиненной схемы показатели регулирования близки к показателям структуры с модальным управлением. Поверхность 2 является

монотонно убывающей функцией и слабо зависела от частоты среза ω_{CPO} . В диапазоне частот $\omega_{\text{КРМ}}$ от 0 до 200 рад/с поверхность 1 лежала ниже поверхности 2 и убывала быстрее, т.к. с уменьшением частоты среза $\omega_{\text{КРМ}}$ резко ухудшаются условия настройки внешних контуров (по переменным скорости, упругого момента) модального регулятора. В этой области системы модального управления уступают по показателям структуре с подчиненным регулированием координат.

ВЫВОДЫ

В диссертационной работе решена актуальная научно-техническая задача – создание электропривода подачи стана ХПТ с улучшенными точностными показателями, имеющая важное значение для технологических объектов трубопрокатного производства. Выполненные исследования позволили сформулировать следующие выводы:

1. Разработана математическая модель электропривода подачи стана ХПТ, в которой механическая часть представлена как двухмассовая, преобразователь частоты аппроксимирован непрерывным динамическим звеном, электродвигатель – системой с распределенными параметрами, отличающаяся тем, что в расчетной модели выполнен учет влияния работы главного привода клетки на механизм подачи. Адекватность математической модели проверялась путем сопоставления расчетных и экспериментальных данных статистическими методами. Так, коэффициент Стьюдента $t = 0,46$ и не превышал $t_{\text{крит}} = 1,813$;

2. Полученная модель электропривода позволила учесть влияние работы главного привода клетки на механизм подачи. Показано, что снижение быстродействия контура регулирования скорости главного привода прокатной клетки приводит к повышению нагрева электропривода подачи. Так, среднеквадратичный момент электропривода подачи возрастает на 10...20% при уменьшении частоты среза контура регулирования скорости главного привода от 100 до 20 рад/с;

3. Предложена методика выбора силового электротехнического оборудования и законов управления электроприводом подачи стана ХПТ, отличающаяся тем, что электропривод представлен в виде многосвязной системы, в которой выбор структуры управления производится в функции соотношения частот среза по критерию минимума ошибки позиционирования рабочего органа, отличающаяся тем, что выбор структуры управления определяется соотношением частот среза одного из контуров “неизменяемой части” электропривода и КРМ;

4. Установлено, что при частотах среза “неизменяемой части” Π выше $\omega_c = 10-25$ рад/с и частотах среза контура регулирования момента в диапазоне $\omega_{\text{КРМ}} = 50-500$ рад/с может быть рекомендована структура подчиненного регулирования;

5. Наибольшую эффективность разрабатываемая методика показала в электроприводе с СРМНВ, где достигаются большие значения отношения M/J (благодаря повышенной радиальной жесткости удлиненного ротора) и линейность моментных характеристик (из-за эффекта “последовательного возбуждения”);

6. Модернизация электропривода подачи позволит повысить точность позиционирования заготовки и тем самым снизить уровень разнотолщинности трубы на допустимом уровне 7%. При этом экономический эффект достигается за счет снижения процента отбраковки выпускаемой продукции и оценивается суммой 1,5 млн. руб. в год, что подтверждено актом о внедрении на ОАО ЧТПЗ (г. Челябинск).

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

Издания из перечня ВАК для кандидатских диссертаций

1. Усынин, Ю.С. Электроприводы с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения для станов холодной прокатки труб / Усынин Ю.С., Лохов С.П., Григорьев М.А., Шишков А.Н., Белоусов Е.В. // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия “Энергетика”. – 2012. – Вып. 17. – № 16(275). – С. 107–110.

2. Усынин, Ю.С. Развитие частотных методов синтеза электроприводов с синхронными электрическими машинами / Усынин Ю.С., Григорьев М.А., Шишков А.Н., Бычков А.Е., Белоусов Е.В. // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия “Энергетика”. – 2011. – Вып. 16. – № 34(251). – С. 21–27.

3. Белоусов, Е.В. Математическая модель электропривода с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения / Белоусов Е.В., Журавлев А.М., Бычков А.Е. и др. // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия “Энергетика”. – 2012. – № 37(296). – С. 34–37.

4. Усынин, Ю.С. Тяговый электропривод активного прицепа трубовоза / Усынин Ю.С., Шишков А.Н., Горожанкин А.Н., Белоусов Е.В., Журавлев А.М., Бычков А.Е., Сычев Д.А. // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия “Энергетика”. – 2013. – Том 13. – №1. – С. 137–143.

5. Горожанкин, А.Н. Пульсации электромагнитного момента в электроприводе с синхронным реактивным двигателем независимого возбуждения / Горожанкин А.Н., Бычков А.Е., Козина Т.А., Белоусов Е.В., Журавлев А.М., Сычев Д.А., Шишков А.Н. // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия “Энергетика”. – 2013. – Том 13. – №1. – С. 103–110.

6. Белоусов, Е.В. Математическая модель электропривода с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения / Белоусов Е.В., Журавлев А.М., Сычев Д.А., Кинас С.И. // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия “Энергетика”. – 2014. – Том 14. – №1. – С. 66–70.

Издания, входящие в систему цитирования Scopus

7. Electric drive of an industrial tractor / Usinin, U., Gladyshev, S., Grigoryev, M., Shishkov, A., Bychkov, A., Belousov, E. // SAE 2013 Commercial Vehicle Engineering Congress, COMVEC 2013; Rosemont, IL; United States; 1 October 2013 through 3 October 2013; Code 100871

Другие научные издания

8. Примеры и перспективы применения электроприводов на базе синхронной реактивной машины независимого возбуждения / Усынин Ю.С., Григорьев М.А., Шишков А.Н., Бычков А.Е., Белоусов Е.В., Журавлев А.М. // Труды международной XV научно-технической конференции “Электроприводы переменного тока” – Екатеринбург, 2012. – С. 27–28.

9. Синхронный реактивный двигатель независимого возбуждения для электроприводов с тяжелыми условиями эксплуатации / Е.В. Белоусов, Д.В. Соко-

лов, А.М. Журавлев // Труды VII Международной (XVIII Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2012 – Иваново, 2 – 4 октября 2012. – С. 419–421.

10. Основы теории электропривода с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения / Ю.С. Усынин, С.А. Чупин, М.А. Григорьев, А.Н. Шишков, А.Н. Горожанкин, **Е.В. Белоусов**, А.Е. Бычков, А.М. Журавлев // Труды VII Международной (XVIII Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2012 – Иваново, 2012. – С. 31–33.

Патенты и свидетельства

11. Пат. 2510877 Российская Федерация, МПК H02P27/04. Электропривод с синхронной реактивной машиной / Усынин Ю.С., Горожанкин А.Н., Бычков А.Е., **Белоусов Е.В.**, Журавлев А.М. – № 2012143554/07; заявл. 11.10.2012; опубл. 10.04.2014, Бюл. №10.

12. Свид. 2011617185 о государственной регистрации программы для ЭВМ. Программа расчета мгновенных значений фазных токов комплекса “Вентильный преобразователь – двигатель” / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, А.Н. Шишков, А.Е. Бычков, А.Н. Горожанкин, **Е.В. Белоусов** – №2011615634; заявл. 26.07.2011; зарегистр. 15.09.2011.

13. Свид. 2012611914 о государственной регистрации программы для ЭВМ. Программа расчета электрических потерь в вентильном преобразователе/ Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, А.Н. Шишков, А.Е. Бычков, А.Н. Горожанкин, **Е.В. Белоусов** – №2011619898 заявл. 21.12.2012; зарегистр. 20.02.2012.

14. Свид. №2013619100 о государственной регистрации программы для ЭВМ. Программа расчета среднего значения индукции в электрических машинах переменного тока/ М.А. Григорьев, А.Н. Шишков, **Е.В. Белоусов** и др. – № 2013616608; заявл. 26.07.2013; зарегистр. 25.09.2013.

15. Свид. № 2013619011 о государственной регистрации программы для ЭВМ. Программа расчета частотных характеристик синхронных электроприводов с распараллеливанием на 12 каналов/ М.А. Григорьев, А.Н. Шишков, **Е.В. Белоусов** и др. – № 2013616617; заявл. 26.07.2013; зарегистр. 24.09.2013.

16. Свид. 2013661334 о государственной регистрации программы для ЭВМ. Программа расчета параметров синхронных машин с распараллеливанием расчета на 12 каналов/ М.А. Григорьев, А.Н. Шишков, А.М. Журавлев, Д.А. Сычев, **Е.В. Белоусов** – №2013619027 заявл. 09.10.2013; зарегистр. 05.12.2013.

Белоусов Евгений Викторович

**ЭЛЕКТРОПРИВОД МЕХАНИЗМА ПОДАЧИ СТАНА
ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ ТРУБ С СИНХРОННОЙ РЕАКТИВНОЙ МАШИНОЙ
НЕЗАВИСИМОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ**

Специальность 05.09.03 – “Электротехнические комплексы и системы”

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Техн. редактор *А.В. Миних*

Издательский центр Южно-Уральского государственного университета

Подписано в печать 08.08.2014. Формат 60×84 1/16. Печать цифровая.
Уч.-изд. л. 1,16. Усл. печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ 314/426.

Отпечатано в типографии Издательского центра ЮУрГУ.
454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76.