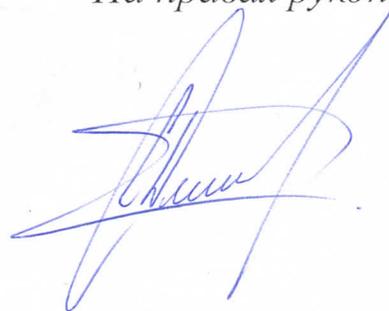


На правах рукописи



Сычев Дмитрий Александрович

**ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ В ЭЛЕКТРОПРИВОДАХ
ТРУБОПРОКАТНЫХ СТАНОВ ПИЛИГРИМОВОЙ ГРУППЫ**

Специальность: 05.09.03 – “Электротехнические комплексы и системы”

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Челябинск – 2017

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования “Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)” на кафедре “Автоматизированный электропривод”.

Научный руководитель –
д-р. техн. наук, проф. **Усынин Юрий Семенович**.

Официальные оппоненты:

Поляков Владимир Николаевич, д-р техн. наук, старший научный сотрудник, проф. кафедры “Электропривод и автоматизация промышленных установок” федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург.

Корнилов Геннадий Петрович, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой “Электроснабжение промышленных предприятий” федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск.

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования “Новосибирский государственный технический университет”, г. Новосибирск.

Защита состоится 20 октября 2017 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета Д212.298.05 при ФГАОУ ВО “Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)”, г. Челябинск, пр-т Ленина, 76, ауд. 1007.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО “Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)” и на сайте ЮУрГУ по адресу:

https://www.susu.ru/sites/default/files/dissertation/dissertaciya_sychev_d.a.pdf

Автореферат разослан “___” _____ 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.ru.

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

М.А. Григорьев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Актуальность работы. Бесшовные трубы (обсадные, бурильные, насосно-компрессорные, крекинговые, нефтепроводные и пр.) применяются в нефтедобыче и нефтепереработке, теплоэнергетической и химической промышленности, а также в машиностроении, авиа- и автотракторостроении, в гражданском и промышленном строительстве. В зависимости от назначения трубной продукции требования к качеству могут быть различными, поэтому прокатка труб характеризуется несколькими последовательными технологическими стадиями: прошивка заготовки, раскатка заготовки, процесс прокатки высококачественных труб.

Трубопрокатные агрегаты пилигримовой группы (прошивные станы, пильгерстаны, станы холодной прокатки труб) имеют весьма сложный и нестандартный характер движения исполнительных органов и большую неравномерность момента нагрузки на протяжении одного цикла прокатки.

Существующие способы повышения энергоэффективности электроприводов рассматриваются по большей части с позиций общепромышленных механизмов для номинального режима работы электромеханического преобразователя. Внимательное изучение особенностей работы и технической реализации электроприводов пилигримовых станов заставляет с позиции энергосбережения обратить внимание на следующее обстоятельство: это – уникальные установки большой (на единицы МВт) мощности двигателей, которые характеризуются крайне неравномерным графиком нагрузки, где большие перегрузки по моменту сочетаются с участками холостого хода электропривода.

В этих условиях задача экономии электроэнергии на стане затруднена и требует углубленного предварительного анализа, а также комплексного подхода в ее решении.

Учитывая рост спроса на бесшовные трубы (атомная, авиапромышленность и пр.), значительную долю потребления электроэнергии пилигримовыми станами, а с практической точки зрения – физический износ электротехнического оборудования, научно-техническая задача повышения энергоэффективности электроприводов рассматриваемых трубопрокатных станов является актуальной.

Степень научной разработанности проблемы. Большой вклад в решение задачи энергосбережения внесли ученые: И.И. Петров, Н.Ф. Ильинский, Б.С. Лезнов, О.В. Крюков, Ю.С. Усынин, И.Я. Браславский, З.Ш. Ишматов, В.Н. Поляков и др. Задача энергосбережения в электроприводах, как это следует из обзора научно-технических источников информации, оказывается достаточно сложной и даже неоднозначной.

Существующие способы повышения энергоэффективности: применение электродвигателей с повышенным номинальным КПД, переход на

регулируемый электропривод, рациональный выбор установленной мощности электромеханического преобразователя, выбор способа управления электроприводом, – рассматриваются по большей части с позиций общепромышленных механизмов.

Все большее внимание специалистов в области электропривода привлекают решения на базе новых типов электрических машин Lipo T., H.Weih, Козаченко В.Ф. и др.

Однако, несмотря на большое количество исследований в области энергосбережения, задача повышения энергоэффективности рассматриваемых электроприводов большой мощности с резко переменной нагрузкой далека от решения.

Объект исследования – электроприводы трубопрокатных станов пилигримовой группы.

Предмет исследования – взаимосвязи между показателями энергоэффективности электроприводов и их параметрами, нагрузочной диаграммой, а также процессами в электромеханических системах.

Целью диссертационной работы является повышение энергоэффективности электроприводов трубопрокатных станов пилигримовой группы.

Идея работы – повышение энергоэффективности электроприводов трубопрокатных станов пилигримовой группы за счет рационального выбора силового механо- и электрооборудования и внедрения энергосберегающих законов управления электромеханическими преобразователями.

Задачи исследования:

– уточнить и провести анализ требований технологического процесса к электроприводам трубопрокатных станов пилигримовой группы с позиций энергосбережения;

– сформулировать основные способы повышения энергоэффективности в электроприводах рассматриваемых технологических установок;

– разработать и обосновать методику прогнозирования электрических потерь в электродвигателях прокатных станов;

– разработать математические модели оценки показателей энергоэффективности рассматриваемых в работе электроприводов;

– оценить корректность разработанных математических моделей;

– сопоставить по критерию энергетической эффективности рассматриваемые структуры системы управления электроприводами.

Методы исследований. В процессе выполнения работы использовались основные положения теории электрических машин, теории электропривода, теории полупроводниковой преобразовательной техники, частотные методы теории автоматического управления, методы математического моделирования систем на ЭВМ, метод конечных элементов.

Достоверность полученных результатов подтверждается корректным применением математических методов, обоснованностью принятых допущений, согласованностью экспериментальных данных и результатов моделирования исследуемых процессов.

Научные положения, выносимые на защиту, их научная новизна

1. Показано, что в основу выбора стратегии энергосбережения в электроприводах трубопрокатных станов пилигримовой группы следует положить вид нагрузочной диаграммы электропривода. Предложена классификация основных путей экономии электроэнергии в электроприводах этих станов, учитывающая особенности технологического процесса, возможности силового механо- и электрооборудования и способов управления и представленная в виде структурной схемы.

2. Предложен алгоритм прогнозирования составляющих потерь в электроприводах прокатных станов с синхронным реактивным двигателем независимого возбуждения (СРДНВ), *отличающийся* тем, что в его основу положены особенности конструкции и функционирования, близкие или совпадающие с таковыми в существующих электроприводах прокатных станов с тихоходными синхронными и двигателями постоянного тока.

3. Разработана представленная в виде уравнения регрессии математическая модель определения составляющих потерь в электроприводах прокатных станов с СРДНВ, *отличающаяся* тем, что она содержит узел вычисления составляющих потерь, который позволяет определять их величину как в статических, так и в динамических режимах работы электропривода.

4. Предложен и разработан способ энергосберегающего управления электроприводом прокатного стана с СРДНВ, *отличающийся* параллельным и независимым воздействием по каналам возбуждения и якоря с оригинальным узлом выделения электромагнитного момента двигателя на основании информации о величине фазных токов статора.

Практическое значение работы заключается в следующем:

– предложенная математическая модель электропривода с СРДНВ, позволяющая проводить расчет показателей энергоэффективности, может быть положена в основу построения расчетной методики электроприводов, работающих в условиях существенной неравномерности момента статической нагрузки;

– методика выбора законов управления электропривода на базе СРДНВ для механизмов с существенной неравномерностью момента статической нагрузки использована при разработке электроприводов промышленных механизмов и успешно применяется на производственных предприятиях, что подтверждается актами о внедрении.

Результаты диссертационной работы нашли применение:

– и были приняты к внедрению: в ПАО “Челябинский трубопрокатный завод” (г. Челябинск) при модернизации электропривода трубопрокатного стана;

в ООО НТЦ “Приводная техника” (г. Челябинск) при разработке электроприводов с резко переменной нагрузкой;

– в учебном процессе на кафедре “Автоматизированный электропривод” ФГАОУ ВО “Южно-Уральский государственный университет”.

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

– “Автоматизированный электропривод” ФГАОУ ВО “Южно-Уральский государственный университет”, г. Челябинск;

– “Электропривод и автоматизация промышленных установок” ФГБОУ ВО “Новосибирский государственный технический университет”, г. Новосибирск.

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и получили одобрение на следующих конференциях: IX Международной (XX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2016, Пермь, 2016 г.; VIII Международной (XIX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2014, Саранск, 2014 г.; XIII Международной конференции пользователей CADFEM/ANSYS, Москва, 2016 г.; XII Международной конференции пользователей CADFEM/ANSYS, Москва, 2015 г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 14 научных статей, из них – 8 в периодических изданиях, **рекомендованных ВАК РФ**, 4 – входящие в систему цитирования **Scopus**, 4 доклада на конференциях, 1 патент РФ на изобретение, 4 свидетельства РФ о регистрации программ для ЭВМ.

Личный вклад автора состоит в постановке задач научного исследования, разработке методов решения задач научного исследования, в формулировании и доказательстве научных положений. В работах [3, 7] автору принадлежат: разработка методики проведения физического эксперимента; в работах [15–19] разработка математических моделей; в публикациях [1, 2, 4–6, 8–14] – ведущая роль в обосновании методов исследований.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения, изложенных на 160 страницах машинописного текста, содержит 57 рисунков, 21 таблицу, список используемой литературы из 181 наименования.

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

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первой главе выполнен анализ кинематики станов пилигримовой группы, предложена и обоснована обобщенная нагрузочная диаграмма, проведен подробный обзор литературы по техническим решениям в области энергосбережения, что позволило классифицировать основные пути экономии электроэнергии применительно к электроприводам рассматриваемых станов. Поставлена задача научного исследования. Доказано первое научное положение.

Во второй главе выполнена качественная и количественная оценка суммарных потерь и их составляющих в электроприводах разного типа (электропривод постоянного тока, синхронный электропривод, синхронный реактивный электропривод независимого возбуждения). Обоснована возможность и целесообразность синтеза математической модели для определения общих потерь и их составляющих в синхронном реактивном двигателе независимого возбуждения. Доказано второе научное положение.

В третьей главе была сформулирована задача математического моделирования электроприводов трубопрокатных станов, работающих в условиях резко переменной нагрузки. На основе анализа математических моделей были определены основные проблемы существующих методик. Доказано третье научное положение.

В четвертой главе комплексное решение задачи экономии электроэнергии в электроприводах пилигримовых станов проводилось с использованием современных методов математического моделирования. Сопоставлены по критерию энергетической эффективности возможные структуры системы управления: схема подчиненного регулирования, электропривод с двухзонным регулированием скорости, схема с пропорциональным управлением потоком и током якоря. Проведена оценка экономического эффекта реализации рассматриваемых решений. Доказано четвертое научное положение.

ЗАЩИЩАЕМЫ НАУЧНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Первое научное положение (Полная формулировка каждого из научных положений приведена в общей характеристике диссертационной работы, поэтому при обсуждении существа работы дается только ссылка на его номер).

Трубопрокатные агрегаты пилигримовой группы (прошивные станы, пильгерстаны, станы с холодной прокаткой труб на оправке) имеют весьма сложный и нестандартный характер движения исполнительных органов и большую неравномерность момента нагрузки на протяжении одного цикла прокатки. Например, для прошивного стана в качестве исходных характеристик технологического процесса принимались осциллограммы токов якорной цепи двигателя на основании регистрограмм процесса прокатки 886 слитков.

Среднеарифметическое значение наблюдаемых величин тока принималось за 100 %. При этом модуль относительного отклонения регистрируемых значений от средних составил $\Delta I_{CP} = 0,058$, а статистическая дисперсия относительного значения отклонения тока – $\sigma^2 = 0,0056$. Размах отклонений (разница между минимальным и максимальным наблюдением) тока якоря в ходе прокатки составил 32 % от I_{CP} .

В табл. 1 приведены и обобщены параметры нагрузочных диаграмм рассмотренных прокатных станов. При этом весь цикл прокатки можно разделить на два участка: рабочий ход и холостой ход (рис. 1).

Таблица 1

Параметры нагрузочных диаграмм пилигримовых прокатных станов

Тип стана	Параметр нагрузочной диаграммы и численное значение				
	$T_{ц}$	$T_{пр}$	$T_{хх}$	$M_{макс}$	$M_{хх}$
Прошивной	300	60	240	1,8	0,11
Пильгерстан	2,8	1,1	1,7	1,7	0,10
ХПТ-450	3 ... 1,5	0,9 ... 0,45	2,1 ... 1,05	1,4	0,15

В таблице указаны: $T_{ц}$ – время одного цикла прокатки, с; $T_{пр}$ – время прокатки, с; $T_{хх}$ – время холостого хода, с; $M_{макс}$ и $M_{хх}$ – максимальный момент за цикл прокатки и момент холостого хода в долях от номинального момента прокатного двигателя.

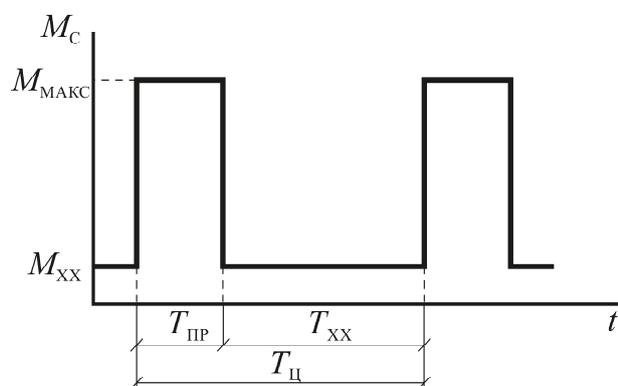


Рис. 1. Обобщенная нагрузочная диаграмма главных электроприводов пилигримовых станов

Имеющиеся данные позволяют качественно построить обобщенную нагрузочную диаграмму для рассматриваемых групп станов (см. рис. 1), которая впоследствии использована для проведения анализа.

В этих условиях задача экономии электроэнергии на стане затруднена и требует углубленного предварительного анализа, а также комплексного подхода в ее решении. Основными способами энергосбережения на станах пилигримовой

группы в настоящей работе предложены: выбор силового механо- и электрооборудования, выбор и обоснование типа электропривода и законов управления электроприводом с позиции минимального энергопотребления (рис. 2).



Рис. 2. Основные способы экономии электроэнергии в электроприводах пилигримовых станов

Второе научное положение. При разработке математической модели определения потерь в СРДНВ полезно учесть наработанный в электропромышленности опыт при создании двигателей постоянного тока и синхронных, а также обратить внимание на сходства конструктивного исполнения основных узлов двигателей разного типа, технологии изготовления и функционирования. Такой подход дает обоснованную надежду на то, что опыт изготовления существующих двигателей может быть использован наилучшим образом. Выполнен краткий обзор основных особенностей конструкции и технологии изготовления существующих прокатных двигателей, которые влияют на величины составляющих потерь.

Прямые данные по составляющим потерь в СРДНВ отсутствуют, однако на основании описания конструкции и принципа работы двигателей постоянного тока и синхронных можно утверждать, что у рассматриваемых машин много общего в конструктивном исполнении ряда узлов и функционировании. Нами и западными специалистами признается, что СРДНВ можно изготавливать, используя технологии и оснастку существующих двигателей переменного тока. Магнитная система и корпус статора конструктивно могут быть выполнены, как в синхронном или асинхронном двигателях. Результаты анализа конструктивного и функционального соответствия некоторых особенностей рассматриваемых в работе электромеханических преобразователей приведены в табл. 2.

Полученные классификационные признаки дают возможность использования опыта проектирования и эксплуатации существующих синхронных двигателей и двигателей постоянного тока в условиях прокатного производства при разработке энергоэффективных электроприводов с СРДНВ.

Конструктивные и функциональные особенности СРДНВ
в сравнении с другими типами прокатных двигателей

Конструктивные и функциональные признаки	Типы электрических двигателей		
	ДПТ	СД	СРДНВ
Обмотка якоря (статора)	Распределенная, многослойная, с полным шагом	Распределенная, многослойная, укороченный шаг	Распределенная, однослойная, с полным шагом
Форма тока фазы	Прямоугольная	Синусоидальная	Прямоугольная
Использование обмотки	Витки, находящиеся напротив межполюсного промежутка, не используются	В явнополюсных СД витки, находящиеся напротив межполюсного промежутка, не используются	Эффективно работает вся обмотка: витки, находящиеся напротив межполюсного промежутка, создают поток возбуждения, а находящиеся напротив полюса – момент
Количество фаз	Большое число секций (многофазное исполнение)	Обычно трехфазное исполнение	Как правило, число фаз 5-7
Наличие системы возбуждения	Обмотка возбуждения расположена на неподвижном индукторе	Обмотка возбуждения расположена на вращающемся роторе	Специальная обмотка возбуждения отсутствует
Исполнение ротора	Неявнополюсное исполнение; имеется коллектор	Явнополюсное исполнение; имеются контактные кольца	Явнополюсное исполнение; безобмоточный ротор; возможен массивный ротор

Проведенный анализ физической природы происхождения составляющих потерь в двигателях постоянного тока и синхронных, а также определенных сходств в конструктивном исполнении ряда узлов и функционировании, позволяет общее уравнение потерь в СРДНВ представить в алгебраической форме:

$$\Delta P_{\text{СРДНВ}} = \Delta P_{\text{ст}} + \Delta P_{\text{маг}} + \Delta P_{\text{мех}} + \Delta P_{\text{доб}},$$

где $\Delta P_{\text{СРДНВ}}$ – суммарные потери в СРДНВ; $\Delta P_{\text{ст}}$ – потери в обмотке статора; $\Delta P_{\text{маг}}$ – магнитные потери; $\Delta P_{\text{мех}}$ – механические потери; $\Delta P_{\text{доб}}$ – добавочные потери.

Применение аппарата математической статистики позволило при незначительных временных затратах с необходимой точностью и достоверностью обосновать рациональный тип электропривода с позиции минимального энергопотребления. Решение поставленных задач статистическими методами производилось в два этапа: кластерный анализ – с целью разбиения совокупности данных на однородные группы; факторный анализ – с целью определить взаимосвязи между интересующими выходными переменными и рассматриваемыми факторами. Факторный анализ включал в себя регрессионный анализ и оценку достоверности на основании критерия Стьюдента.

В качестве генеральной совокупности рассматривались технические данные более пятисот двигателей постоянного и переменного тока прокатных станов, работающих на разных предприятиях (на основании данных заводов-изготовителей). Наиболее ценными для решения поставленных в работе задач являлись достаточно подробные данные по составляющим потерь.

Кластерный анализ проводился с применением алгоритма выделения связных компонент, основанном на определяющих входной параметр гистограммах распределения межкластерных расстояний. Совокупность данных суммарных потерь в прокатных двигателях в результате проведенного кластерного анализа была представлена в виде двух групп: двигатели тихоходного (I, III) и быстроходного (II, IV) исполнения (рис. 3).

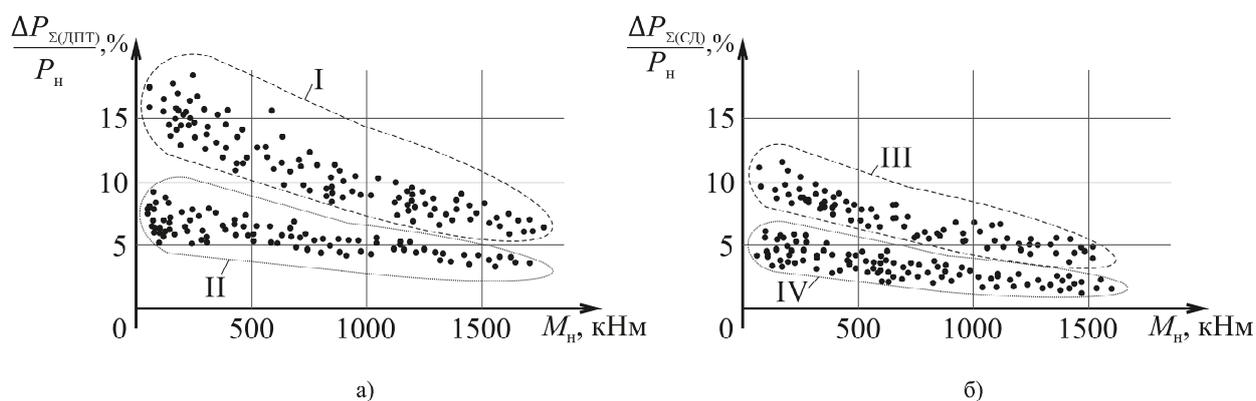


Рис. 3. Совокупность технических данных относительных суммарных потерь в прокатных двигателях постоянного тока (а) и синхронных (б) в зависимости от номинального момента

Электроприводам рассматриваемой в работе группы прокатных станов характерно тихоходное исполнение двигателей, поэтому в качестве исходного материала для последующего регрессионного анализа приняты электромеханические преобразователи тихоходного исполнения.

Регрессионный количественный анализ проведен с учетом принятой классификации составляющих потерь двигателей постоянного тока и синхронных двигателей. Было установлено, что порядок уравнений нелинейной регрессии, наиболее приемлемый с точки зрения минимального среднеквадратичного отклонения, равен двум. В результате уравнение потерь в якорной обмотке двигателя постоянного тока выглядит следующим образом:

$$\Delta P_{\text{як}} = A_{\text{як}2} \cdot M_{\text{н}}^2 + A_{\text{як}1} \cdot M_{\text{н}} + A_{\text{як}0};$$

– в обмотке статора синхронного двигателя

$$\Delta P_{\text{ст}} = A_{\text{ст}2} \cdot M_{\text{н}}^2 + A_{\text{ст}1} \cdot M_{\text{н}} + A_{\text{ст}0}.$$

Здесь $\Delta P_{\text{як}}$ – потери в якорной цепи; $\Delta P_{\text{ст}}$ – потери в обмотке статоре; $M_{\text{н}}$ – номинальный момент двигателя; $A_{\text{як}0}$, $A_{\text{як}1}$, $A_{\text{як}2}$, $A_{\text{ст}0}$, $A_{\text{ст}1}$, $A_{\text{ст}2}$ – коэффициенты уравнений регрессии.

На основании полученных уравнений были построены регрессионные зависимости в виде степенного полинома, представленные кривыми, проведенными через точки, имеющие нормально распределенное отклонение от истинного значения (рис. 4). Следует обратить внимание на то обстоятельство, что масштаб оси ординат рис. 4 а, б отличен от рис. 4 в, г, д. Это вызвано значительными (практически на порядок) количественными различиями в рассматриваемых составляющих потерь.

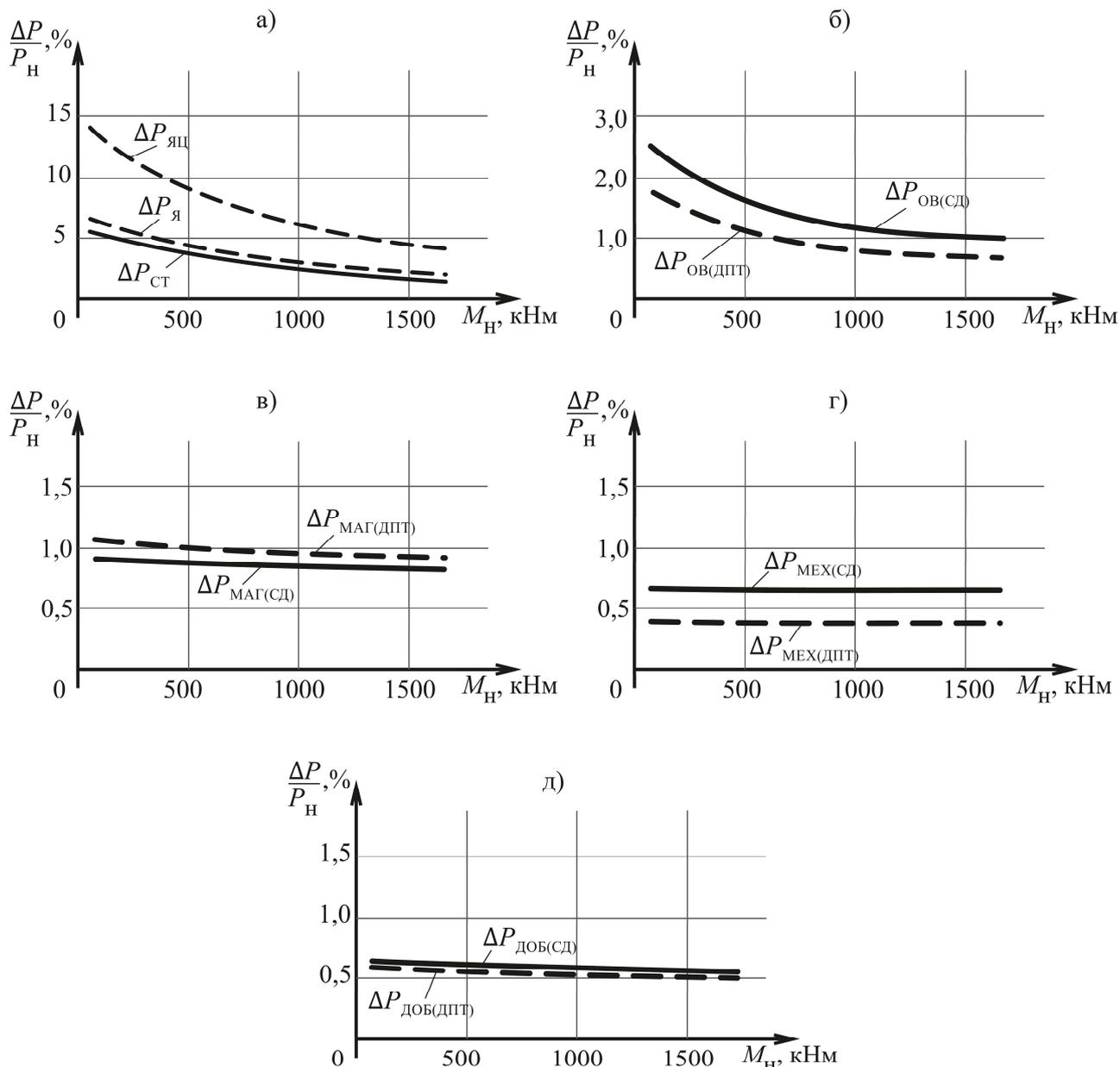


Рис. 4. Регрессионные зависимости составляющих потерь двигателей постоянного тока и синхронных двигателей тихоходного исполнения от номинального момента: потери в якорной цепи ДПТ и обмотке статора СД (а); потери в обмотках возбуждения (б); магнитные потери (в); механические потери (г); добавочные потери (д)

На основании принятого уравнения суммарных потерь в синхронном реактивном двигателе независимого возбуждения, проведенной количественной

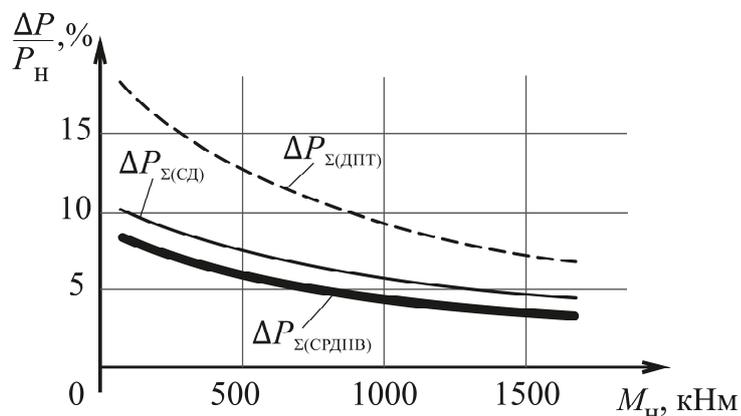


Рис. 5. Регрессионная зависимость прогнозирования суммарных потерь от номинального момента в СРДНВ

оценки для двигателей постоянного тока и синхронных построена регрессионная зависимость прогнозирования суммарных потерь в синхронных реактивных двигателях независимого возбуждения (рис. 5). Математическую модель прогнозирования потерь в синхронном реактивном двигателе независимого возбуждения можно представить в виде уравнения нелинейной регрессии второго порядка:

$$\Delta P_{\Sigma(\text{СРДНВ})} = A_{\Sigma(\text{СРДНВ})2} \cdot M_n^2 + A_{\Sigma(\text{СРДНВ})1} \cdot M_n + A_{\Sigma(\text{СРДНВ})0},$$

где $\Delta P_{\Sigma(\text{СРДНВ})}$ – суммарные потери в СРДНВ; M_n – номинальный момент двигателя; $A_{\Sigma(\text{СРДНВ})0}$, $A_{\Sigma(\text{СРДНВ})1}$, $A_{\Sigma(\text{СРДНВ})2}$ – коэффициенты уравнений регрессии.

Третье научное положение. Математическое описание электроприводов и относящихся к ним технологических объектов обычно проводится с учетом принятых допущений, которые позволяют обосновано упростить математический аппарат. Например, электрический двигатель представляют системой с сосредоточенными параметрами. Такой подход вполне обоснован, когда речь идет о математическом моделировании систем электропривода с традиционными электромеханическими преобразователями. С позиции оценки энергоэффективности электроприводов постоянного тока и синхронных, учитывая имеющуюся достаточно подробную аналитическую базу, это дает возможность воспользоваться типовыми математическими моделями и с достаточной достоверностью определить суммарные потери и их составляющие.

Отсутствие реальных методик проектирования и практических рекомендаций при разработке новых типов электромеханических преобразователей обуславливает необходимость учета распределенного характера параметров системы. Так как в существующей технической литературе и других источниках моделей для определения составляющих потерь в электроприводах с СРДНВ не найдено, нами предлагается математическая модель, которая, по нашему мнению, эту задачу решает. Особенностью этой модели является то, что она использует общепринятые для всех электродвигателей составляющие потерь, но уточненные с учетом специфики конструкции и особенностей работы СРДНВ.

Имеющиеся математические модели электропривода с СРДНВ описывают и уточняют или принцип работы двигателя с учетом особенностей магнитных полей в электрической машине, или особенности регулирования электропривода с СРДНВ, в частности, когда от него требуется повышенное быстродействие.

В качестве примера представлена математическая модель электропривода стана ХПТ-450 (рис. 6). Главный электропривод прокатной клетки выполнен по подчиненной схеме регулирования скорости на базе СРДНВ и содержит несколько блоков: механический преобразователь (кривошипно-шатунный механизм); электромеханический преобразователь – СРДНВ; узел формирования фазных токов, узел определения составляющих потерь. Контуры регулирования фазных токов СРДНВ совместно с моделью магнитной системы образовывали контур регулирования электромагнитного момента. Система работает как многоконтурная структура управления с внешним контуром регулирования скорости, настраиваемым регулятором РС. Контуры регулирования фазных токов включали полупроводниковый преобразователь, якорную цепь с активным сопротивлением каждой фазы r и настраивались регуляторами тока РТ1...РТ6.

Механическая часть

$$M_c = q \cdot \gamma \cdot r_{кр} \frac{M_{\Sigma пр(об)}}{\rho_{ш} \cdot \eta_{кпд}};$$

$$M_{\Sigma пр} = P_{ср} \cdot \rho_v \left(n_Q + \eta_3 \sqrt{\frac{1,4 \cdot \Delta t_{ср}}{\rho_v}} \right);$$

$$M_{\Sigma об} = 0,85 P_{ср} \cdot \rho_v \left(\eta_3 \sqrt{\frac{0,6 \cdot \Delta t_{ср}}{\rho_v}} - n_Q \right),$$

где M_c – момент статической нагрузки двигателя; $M_{\Sigma пр}$ – момент прокатки при прямом ходе клетки; $M_{\Sigma об}$ – момент прокатки при обратном ходе клетки; q – коэффициент, учитывающий долю момента, расходуемого на холостой ход; $\rho_{ш}$ – начальный радиус ведущей шестерни; $\eta_{кпд}$ – коэффициент полезного действия; $r_{кр}$ – радиус кривошипа; γ – коэффициент, определяемый динамикой и конструкцией стана; $P_{ср}$ – среднее полное давление при прокатке; ρ_v – радиус вала; η_3 – коэффициент формы очага деформации; $\Delta t_{ср}$ – среднее обжатие за цикл.

Модель магнитной системы

$$M(t) = \int_{Vol} \mathbf{r} \times [\mathbf{J}(t) \times \mathbf{B}(t)] dVol;$$

где $M(t)$ – момент электромеханического преобразователя; \mathbf{r} – вектор смещения от оси вращения; $\mathbf{J}(t)$ – плотность тока; $\mathbf{B}(t)$ – магнитная индукция.

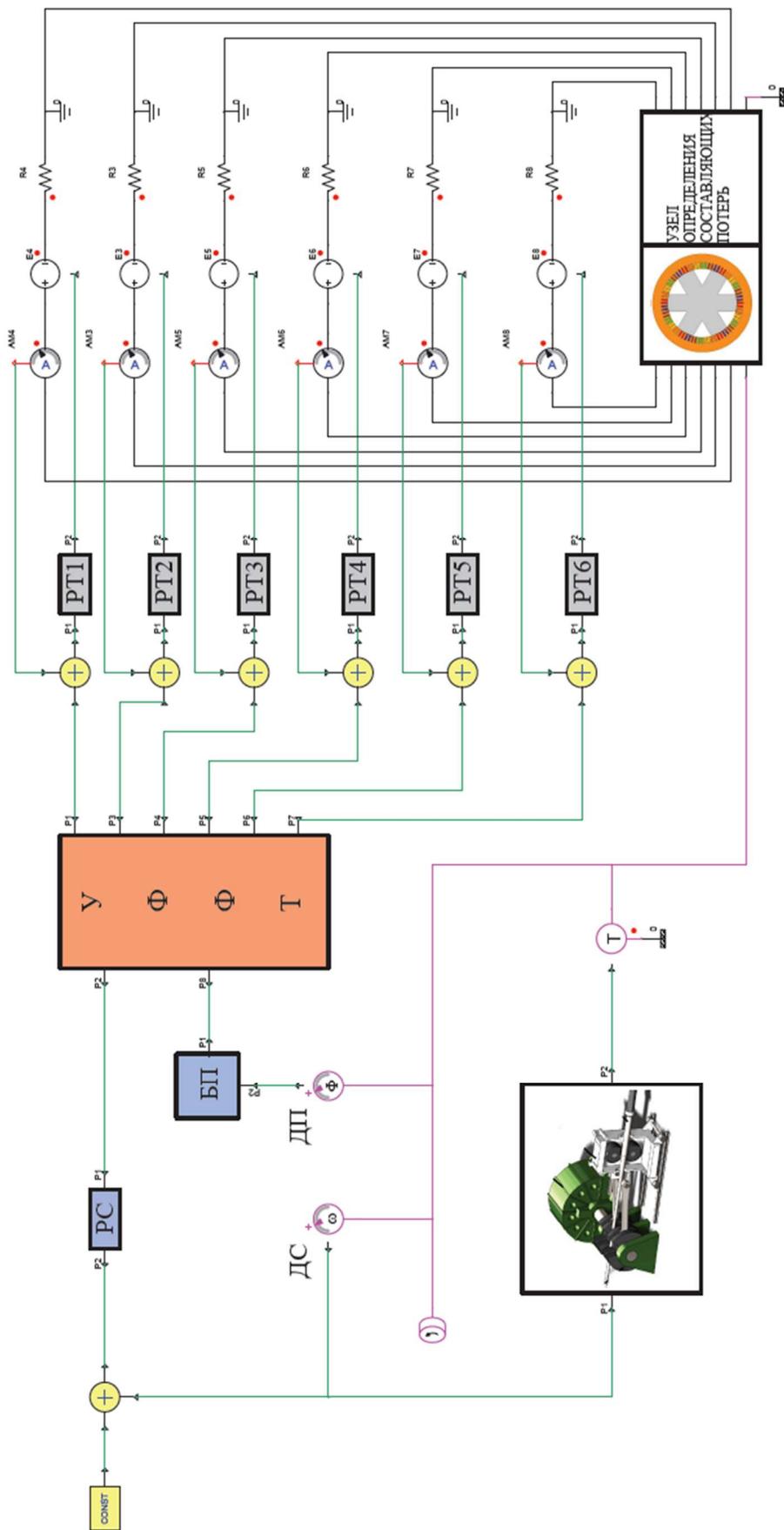


Рис. 6. Математическая модель «Электропривод – прокатная клетка» на базе синхронного реактивного двигателя независимого возбуждения в программном пакете *Ansys Simplorer/Maxwell*

Система управления

$$U_{\text{зУФФТ}} = U_{\text{дп}} - U_{\text{ком}};$$

$$U_{\text{рс}} = U_{\text{зрс}} - U_{\text{дс}};$$

$$U_{\text{рт}} = U_{\text{зрт}} - U_{\text{дт}},$$

где $U_{\text{зУФФТ}}$, $U_{\text{зрс}}$, $U_{\text{зрт}}$ – сигналы задания соответственно на узел формирования фазных токов, регулятор скорости и тока; $U_{\text{рс}}$, $U_{\text{рт}}$ – сигналы с выхода регуляторов скорости и токов; $U_{\text{дс}}$, $U_{\text{дт}}$, $U_{\text{дп}}$ – сигналы с датчиков скорости, токов и положения ротора; $U_{\text{ком}}$ – сигнал задания на угол коммутации фаз.

Расчет промежуточных координат модели главного электропривода выполнялся для модели магнитной системы в среде *ANSYS Maxwell*, а для системы управления – в среде *ANSYS Simplorer*. Расчет выполнялся в следующей последовательности: по выходной скорости электродвигателя вычислялись линейная скорость клетки $V_{\text{клетти}}$ и угол поворота калибров $\alpha_{\text{в}}$, далее блоком формирования нагрузочной диаграммы – момент прокатки.

Оценка адекватности математической модели выполнялась сопоставлением расчетных и экспериментальных данных статистическими методами и проводилась для участка прокатки главного электропривода. Действующий электропривод стана ХПТ реализован на базе электродвигателя постоянного тока. Оценка проводилась в два этапа. Сначала была обработана выборка из 30 экспериментальных осциллограмм тока якоря главного электропривода, полученных на действующем объекте. Затем результаты математического моделирования сопоставлялись с экспериментальными данными, полученными на регрессионной модели. Результаты приведены в табл. 3.

Таблица 3

Сопоставление расчетных и экспериментальных данных

Параметр				
Номер осциллограммы	$I_{\text{эксп, о.е.}}$	$I_{\text{расч, о.е.}}$	ΔI	ΔI^2
1	0,10	0,09	0,01	0,0001
2	0,17	0,18	-0,01	0,0001
3	0,24	0,22	0,02	0,0004
...
30	1,00	1,00	0,00	0,00
$s_d = \sqrt{\frac{\sum d^2 - (\sum d)^2}{n - 1}}$	0,03			
$t = \frac{\bar{d} - \mu_d}{\frac{s_d}{\sqrt{n}}}$	1,5			
$t_{\text{КРИТ}}$	2,04			

Где $I_{\text{расч}}$ – расчетное значение тока, полученное в ходе моделирования; $I_{\text{эксп}}$ – экспериментальное значение тока, полученное на основании 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 $t = 1,5$ не выходит за пределы критического значения ($t_{\text{КРИТ}} = 2,04$), на основании чего можно сделать вывод об адекватности предложенной математической модели.

Разработана программа для реализации алгоритма расчета суммарных потерь и их составляющих в СРДНВ в конечно-элементном продукте *Ansys Maxwell*, на которую получены свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ №2017613431, №2015662880, №2013619100.

В процессе обсуждения **четвертого научного положения** сопоставлялись ресурсы энергосбережения в электроприводах с электродвигателями разного типа (двигатели постоянного тока, синхронные двигатели и синхронные реактивные двигатели независимого возбуждения), объяснялся механизм реализации ресурсов энергосбережения, предлагались способы управления электроприводом, обеспечивающие эту экономию. Результаты сопоставления резервов энергосбережения иллюстрируются диаграммой (см. рис. 7).

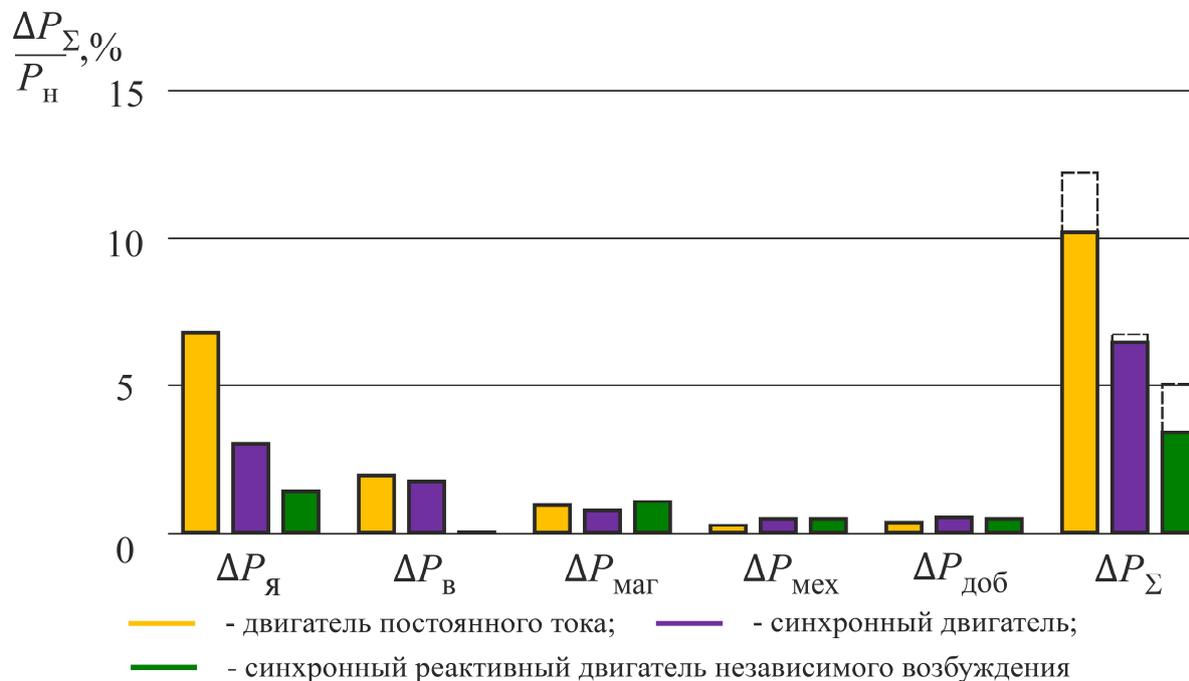


Рис. 7. Диаграмма суммарных потерь и их составляющих в электроприводах разного типа при сопоставлении энергосберегающих законов управления

Диаграмма показывает распределение суммарных потерь и их составляющих в электромеханических преобразователях при законах управления, которые реализуются или скорее всего могут быть реализованы на практике (пунктирные линии) и предлагаемых в работе (сплошные линии).

Особое внимание при моделировании уделялось изучению переходных процессов в электроприводах этих станов, что обусловлено резко переменным характером момента статической нагрузки. Показано, что качество переходных процессов в этих электроприводах играет существенную роль в экономии электроэнергии. По сравнению с электроприводами на базе ДПТ и СД только за счет разницы в качестве переходных процессов, при которых большие перегрузки чередуются с участками холостого хода, в электроприводе с СРДНВ достигается экономия до 5 % от номинальной мощности электропривода. Это обусловлено тем, что на пилгерстанах и ХПТ-450 время рабочего цикла соизмеримо с постоянными времени цепей возбуждения ДПТ и СД.

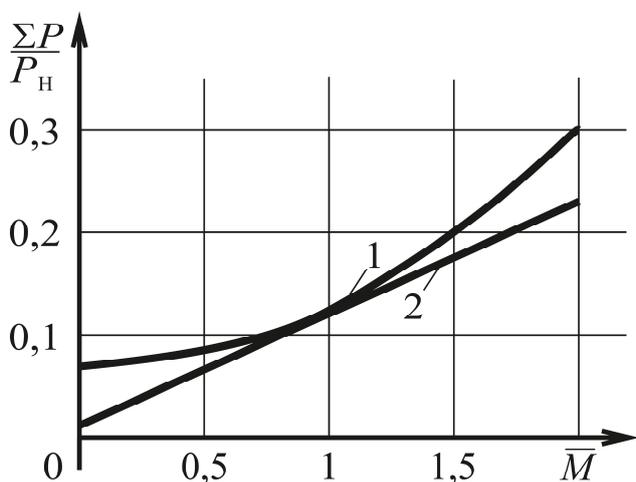


Рис. 8. Относительная величина потерь в зависимости от момента нагрузки в двигателях постоянного тока при постоянном потоке (1), при пропорциональном управлении потоком и током якоря (2)

На рис. 8 для прокатных двигателей постоянного тока приведены кривые потерь в зависимости от момента нагрузки при разных способах управления. Наибольший энергетический эффект наблюдается по краям диапазона изменения момента нагрузки. В зоне малых нагрузок ($M < 0,5$) «пропорциональное» управление позволяет резко снизить «постоянную» составляющую потерь, а в зоне перегрузок ($M > 1,5$) – максимально использовать габаритную мощность двигателя.

Пропорциональное управление требует регулирования потока возбуждения как в статике, так и в динамике.

Для электроприводов станов пилигримовой группы с относительно коротким временем цикла прокатки необходимость регулирования потока отражается на результатах оценки величины экономии электроэнергии. Так, для электроприводов постоянного тока и синхронного пропорциональное управление потоком и током якоря практически не дает эффекта в плане энергосбережения. Это обстоятельство обусловлено тем, что поток не успевает следовать за сигналом задания и обе схемы (двухзонное регулирование и пропорциональное управление) работают на среднем участке зависимости $\Delta P/P_n = f(M)$ (см. рис. 8), а вся выгода пропорционального управления достигается тогда, когда время работы электропривода на крайних участках этой характеристики составляет существенную долю от времени цикла.

Наибольшую экономию электроэнергии в электроприводах с СРДНВ при крайне неравномерном характере нагрузки удастся получить при «пропорциональном» управлении, когда ток возбуждения прокатного двигателя регулируется пропорционально току якорной обмотки. В электроприводе с СРДНВ функцию создания потока выполняет якорная обмотка, постоянная времени которой не только не превышает, но и значительно меньше времени рабочего цикла прокатки. За счет этого электропривод практически все время рабочего цикла работает на крайних участках этой характеристики (рис. 8). Итогом комплексного подхода к решению задачи формирования энергосберегающих переходных процессов явилось предложение о целесообразности применения трехконтурной системы управления электроприводом, которая выполнена по подчиненному принципу, внутренними контурами являются контуры регулирования фазных токов статора, которые работают независимо в функции показаний датчика положения ротора. Промежуточным контуром является контур косвенного регулирования электромагнитного момента, который вычисляется как произведение суммы токов проводников обмоток, находящихся над полюсом двигателя, на сумму токов проводников обмоток, находящихся напротив межполюсного промежутка. Внешним контуром является обычный контур регулирования скорости с обратной связью по скорости.

Применительно к стану ХПТ-450 этот способ управления дает экономию примерно 2,5 млн кВт·ч в год, а к пильгерстану – около 4,5 млн кВт·ч в год. Столь значительные цифры экономии электроэнергии наблюдаются, во-первых, за счет энергетически выгодных законов управления и, во-вторых, при сравнительно большой (единицы мегаватт) установленной мощности прокатных двигателей.

ВЫВОДЫ

В диссертационной работе решена актуальная научно-техническая задача – повышение энергоэффективности электроприводов трубопрокатных станов пилигримовой группы, предложены новые принципы и алгоритмы управления электротехническими системами трубопрокатных станов, раскрыты возможности и резервы энерго- и ресурсосбережения средствами автоматизированных электроприводов и систем управления.

Выполненные исследования позволили сформулировать следующие выводы.

1. Проведен анализ требований технологического процесса к электроприводам трубопрокатных станов пилигримовой группы с позиций энергосбережения. Изучение особенностей технологии прокатки, механо- и электрооборудования станов пилигримовой группы показало, что в основу выбора путей и способов экономии электроэнергии следует положить вид нагрузочной диаграммы рабочего механизма. Предложена классификация основных путей экономии электроэнергии в электроприводах этих станов.

2. Предложен алгоритм прогнозирования составляющих потерь в электроприводах прокатных станов с СРДНВ. Он учитывает особенности конструкции и функционирования, близкие или совпадающие с таковыми в существующих электроприводах прокатных станов с тихоходными синхронными и двигателями постоянного тока.

3. Разработана представленная в виде уравнения регрессии математическая модель определения составляющих потерь в электроприводе прокатной клетки стана ХПТ-450, отличающаяся тем, что она содержит узел вычисления составляющих потерь, который позволяет определять их величину как в статических, так и в динамических режимах работы электропривода. Сопоставление расчетных и экспериментальных данных показало корректность математической модели. При этом коэффициент Стьюдента $t = 1,5$ и не превышал $t_{\text{крит}} = 2,04$.

4. Полученная математическая модель позволила провести оценку величины суммарных потерь и их составляющих в электроприводе с СРДНВ. Суммарные потери электроэнергии за цикл прокатки в электроприводе с СРДНВ и рекомендованными в диссертации законами управления могут быть снижены на 72 % по сравнению с потерями в существующем электроприводе постоянного тока, которым оборудован стан ХПТ-450.

5. В электроприводах станов пилигримовой группы, работающих в режиме больших перегрузок по моменту и с коротким временем рабочего цикла, соизмеримым с постоянными времени существующих синхронных и постоянного тока двигателей, наилучшие результаты в плане экономии электроэнергии обеспечивают электроприводы с СРДНВ, благодаря более высокому качеству переходных процессов регулирования токов якоря и возбуждения.

6. Модернизация электропривода прокатной клетки позволит улучшить показатели энергоэффективности. При этом экономический эффект (на основании расчетов, выполненных в диссертации) достигается за счет внедрения энергоэффективного типа электромеханического преобразователя, реализации энергосберегающих законов управления и для стана ХПТ-450 оценивается суммой 2,5 млн. руб. в год. Применительно к всей группе пилигримовых станов ПАО «ЧТПЗ» экономический эффект может составить 12 млн. руб. в год.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

Издания из перечня ВАК для кандидатских диссертаций

1. Повышение энергоэффективности электроприводов станов периодической прокатки труб / Ю.С. Усынин, Д.А. Сычев, А.Н. Шишков и др. // Электротехника. – 2015, №12. – С. 32–34.

2. Способы повышения энергоэффективности электропривода стана холодной прокатки труб / Д.А. Сычев, К.М. Виноградов, Е.В. Белоусов и др. //

Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. –2016. – Т. 16. – № 1. – С. 42–46.

3. Система прямого управления момента в синхронном электроприводе / А.Н. Шишков, Е.В. Белоусов, **Д.А. Сычев** и др. // Электротехника. – 2014, №10. – С. 29–32.

4. Математическая модель электропривода с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения / Д.А. Сычев, Е.В. Белоусов, С.И. Кинас, А.М. Журавлев // Вестник южно-уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2014. – Т. 14. – №1. – С. 66–70.

5. Оптимизация функции управляющего воздействия для электропривода с синхронной реактивной машиной с независимым управлением по каналу возбуждения / Д.А. Сычев, К.М. Виноградов, Е.В. Белоусов и др. // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. –2016. – Т. 16. – № 2. – С. 30–33.

6. Параметрическая оптимизация синхронного электропривода с улучшенными массогабаритными показателями / А.Н. Горожанкин, М.А. Григорьев, **Д.А. Сычев**, А.М. Журавлев // Электротехника. – 2015, №12. – С. 19–22.

7. Пульсации электромагнитного момента в электроприводе с синхронным реактивным двигателем независимого возбуждения / А.Н. Горожанкин, А.Е. Бычков, **Д.А. Сычев** и др. // Вестник южно-уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2013. – Т. 13. – №1. – С. 103–111.

8. Оптимальная траектория движения позиционного электропривода / А.Н. Шишков, К.М. Виноградов, **Д.А. Сычев** и др. // Вестник южно-уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2015. – Т. 15. – №3. – С. 82–89.

Издания, входящие в систему цитирования Scopus:

9. **Sychev, D. A.** Energy efficiency improvement of electric drive of cold pilgering mill / D.A. Sychev, N.V. Savosteenko, A.A. Gryzlov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2017, Vol. 177, Issue 1, pp. 1–5. DOI: 10.1088/1757-899X/177/1/012038.

10. Usynin, Yu. S. Improving the Energy Efficiency of Electric Drives of Reciprocating Rolling Mills / A.N. Shishkov, **D.A. Sychev**, N.V. Savosteenko and E.S. Khayatov // Russian Electrical Engineering, 2015, Vol. 86, No. 12, pp. 709–711.

11. **Sychev, D.A.** Mass-dimensional parameters of traction drive / D.A. Sychev, A.M. Zhuravlev, N.V. Savosteenko // Procedia Engineering, 2015, pp. 946–950, doi: 10.1016/j.proeng.2015.12.140.

12. **Sychev, D. A.** Special of calculation of the electromagnetic torque of the field regulated reluctance machine / D.A. Sychev, S.S. Bukhanov, A.A. Imanova and S.P. Gladyshev // Proceedings of the 2017 IEEE Russia Section Young Researchers in

Electrical and Electronic Engineering Conference, 2017, pp. 1038–1041. DOI: 10.1109/EIConRus.2017.7910734.

Другие научные публикации

13. Релейно-векторные законы управления электроприводами с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения / Е.В. Белоусов, А.М. Журавлев, **Д.А. Сычев**, С.И. Кинас, Н.В. Савостеенко // Труды VIII Международной (XIX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2014. Том 1. Саранск, 07-09 октября 2014 г. С. 342–344.

14. Экономия электроэнергии в электроприводах трубопрокатных агрегатов пилигримовой группы / Ю.С. Усынин, **Д.А. Сычев** // Труды IX международной (XX всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2016. – Пермь: Издательство Пермского национального исследовательского политехнического университета, 2016. – С. 515–518.

Патенты и свидетельства

15. Пат. 2541359 Российская Федерация, МПК G01L3/22, G01L5/00, G01L5/10, H02P25/08, H02P6/08. Устройство и способ измерения электромагнитного момента в электроприводе с синхронной реактивной машиной / Ю.С. Усынин, А.Н. Шишков, **Д.А. Сычев** и др. – №2013142466/07; заявл. 17.09.2013; опубл. 10.02.2015, Бюл. №4.

16. Свид. 2017613431 о государственной регистрации программы для ЭВМ. Программа расчета магнитных потерь в электрических машинах нетрадиционной конструкции / М.А. Григорьев, А.Н. Шишков, **Д.А. Сычев** и др. – №2017610669; заявл. 25.01.2017; зарегистр. 17.03.2017.

17. Свид. 2017616644 о государственной регистрации программы для ЭВМ. Программа расчета статистических параметров регрессионной модели двигателя постоянного тока для определения составляющих потерь / **Д.А. Сычев**, Р.В. Костенко, Н.С. Архипова и др. – №2017613624; заявл. 20.04.2017; зарегистр. 09.06.2017.

18. Свид. 2015662880 о государственной регистрации программы для ЭВМ. Программа расчета вихревых токов в электродвигателях переменного тока с распараллеливанием расчета на 12 каналов / М.А. Григорьев, А.Н. Шишков, **Д.А. Сычев** и др. – №2015619791; заявл. 15.10.2015; зарегистр. 04.12.2015.

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

Сычев Дмитрий Александрович

**ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ В ЭЛЕКТРОПРИВОДАХ
ТРУБОПРОКАТНЫХ СТАНОВ ПИЛИГРИМОВОЙ ГРУППЫ**

Специальность 05.09.03 – “Электротехнические комплексы и системы”

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Издательский Центр Южно-Уральского государственного университета

Подписано в печать _____. Формат 60x84 1/16. Печать цифровая.
Усл. печ.л. _____. Уч.-изд. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ

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