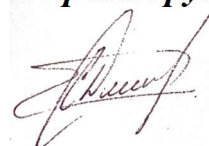


**Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный
университет (национальный исследовательский университет)»**

На правах рукописи



Сычев Дмитрий Александрович

УДК62-83::621.313.3

**ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ В ЭЛЕКТРОПРИВОДАХ
ТРУБОПРОКАТНЫХ СТАНОВ ПИЛИГРИМОВОЙ ГРУППЫ**

Специальность: 05.09.03 – “Электротехнические комплексы и системы”

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук

Научный руководитель –
доктор технических наук
Усынин Ю.С.

Челябинск – 2017

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	4
ГЛАВА 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ В ЭЛЕКТРОПРИВОДАХ СТАНОВ ПИЛИГРИМОВОЙ ГРУППЫ.....	10
1.1. Описание работы прокатных станов пилигримовой группы	10
1.2. Краткие сведения о существующих электроприводах и нагрузочных диаграммах прокатных станов пилигримовой группы.....	17
1.3. Проблемы энергосбережения в регулируемых металлургических электроприводах и особенности ее решения	19
1.4. Основные пути экономии электроэнергии.....	22
ГЛАВА 2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРИНЯТОЙ МЕТОДИКИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ В ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯХ ПРОКАТНЫХ СТАНОВ	24
2.1. Технические особенности прокатных двигателей с позиций оценки составляющих потерь.....	26
2.2. Синтез моделей потерь существующих прокатных двигателей в электроприводах прокатных станов	33
2.3. Синтез регрессионной модели определения потерь синхронного реактивного двигателя независимого возбуждения	48
ГЛАВА 3. СИНТЕЗ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПРОКАТНОГО СТАНА с ПОЗИЦИЙ ОЦЕНКИ ВЕЛИЧИНЫ ПОТЕРЬ	55
3.1. Математические модели электроприводов стана холодной прокатки труб ХПТ-450	57
3.2. Оценка адекватности математической модели электропривода стана холодной прокатки труб ХПТ-450	73
ГЛАВА 4. КОМПЛЕКСНОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ЭКОНОМИИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРОПРИВОДАХ ПИЛИГРИМОВЫХ СТАНОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ.....	75
4.1. Потери в электроприводе с прокатными двигателями постоянного тока.....	76
4.1.1. Потери электроэнергии в типовом электроприводе с подчиненным регулированием	77

4.1.2. Способы снижения потерь электроэнергии в моделируемых электроприводах постоянного тока.....	84
4.2. Потери в электроприводах с прокатными синхронными двигателями	107
4.2.1. Потери электроэнергии в синхронном электроприводе с нерегулируемым возбуждением.....	107
4.2.2. Потери электроэнергии в электроприводе с пропорциональным управлением токами якоря и возбуждения синхронного двигателя	113
4.3. Потери в электроприводе с прокатными синхронными реактивными двигателями независимого возбуждения.....	116
4.3.1. Потери электроэнергии в электроприводе с нерегулируемым возбуждением двигателя.....	117
4.3.2. Потери электроэнергии в электроприводе с пропорциональным управлением токами якоря и возбуждения.....	123
4.3.3. Сравнительный анализ величины потерь в моделируемых электроприводах пилигримовых станов	127
4.4. Экономические показатели энергоэффективности для станов пилигримовой группы.....	129
Заключение.....	136
Литература	138

ВВЕДЕНИЕ

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., N.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.

Объекты 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.

ГЛАВА 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ В ЭЛЕКТРОПРИВОДАХ СТАНОВ ПИЛИГРИМОВОЙ ГРУППЫ

В этой главе обсуждается **первое научное положение**. Полная формулировка каждого из научных положений как в первой, так и в последующих главах приведена в общей характеристике диссертационной работы, поэтому при обсуждении существа работы дается только ссылка на его номер.

Изучение особенностей технологического процесса, механо- и электрооборудования прокатных станов пилигримовой группы показало, что в основу выбора путей и способов энергосбережения следует положить вид нагрузочной диаграммы рабочего механизма (обобщенный график момента статической нагрузки от времени). Показано, что несмотря на разнообразие механического оборудования, кинематики и траекторий движения рабочих органов, электроприводы этих станов с точки зрения энергосбережения целесообразно объединить в одну группу, имеющую схожие нагрузочные диаграммы, которые и следует положить в основу классификации основных путей реализации энергосберегающих решений.

1.1. Описание работы прокатных станов пилигримовой группы

Бесшовные трубы (обсадные, бурильные, насосно-компрессорные, крекинговые, нефтепроводные и пр.) применяются в нефтедобыче и нефтепереработке, теплоэнергетической и химической промышленности, а также в машиностроении, авиации, автотракторостроении, в гражданском и промышленном строительстве [6, 33, 50, 57, 88, 123, 157]. В зависимости от назначения трубной продукции требования к качеству могут быть различными, поэтому прокатка труб характеризуется несколькими последовательными технологическими стадиями, включающими в себя

прошивку заготовки (прошивные станы, см. рис. 1.1 и 1.2), ее раскатку (пильгерстаны, см. рис. 1.3 и 1.4), холодную прокатку труб на оправке (станы ХПТ, см. рис. 1.5 и 1.6).

Процесс прокатки нагретой заготовки в гильзу начинается на **прошивных станах** и осуществляется рабочими валками, имеющими двойную конусность и вращающимися в одну сторону [58, 157]. В валковых прошивных станах горизонтальные оси валков расположены под углом к оси прокатки с перекосом этих осей друг относительно друга (см. рис. 1.1). Две конические поверхности каждого валка соответствуют двум основным зонам деформации.



Рис. 1.1. Прокатка труб на прошивном стане

Входные конусы валков выполняются одинаковой длины или несколько короче выходных. Геометрически правильную поверхность и необходимое расширение обеспечивает большая длина выходного конуса. Углы наклона образующих входного и выходного конусов приблизительно одинаковые. При прокатке заготовка совершает не только вращательное движение, но и поступательное за счет того, что оси валков расположены под некоторым углом к осевой линии прокатки. На входном конусе валков металл подготавливается к прошивке на оправке, на выходном – выравнивается внутренняя поверхность гильзы.

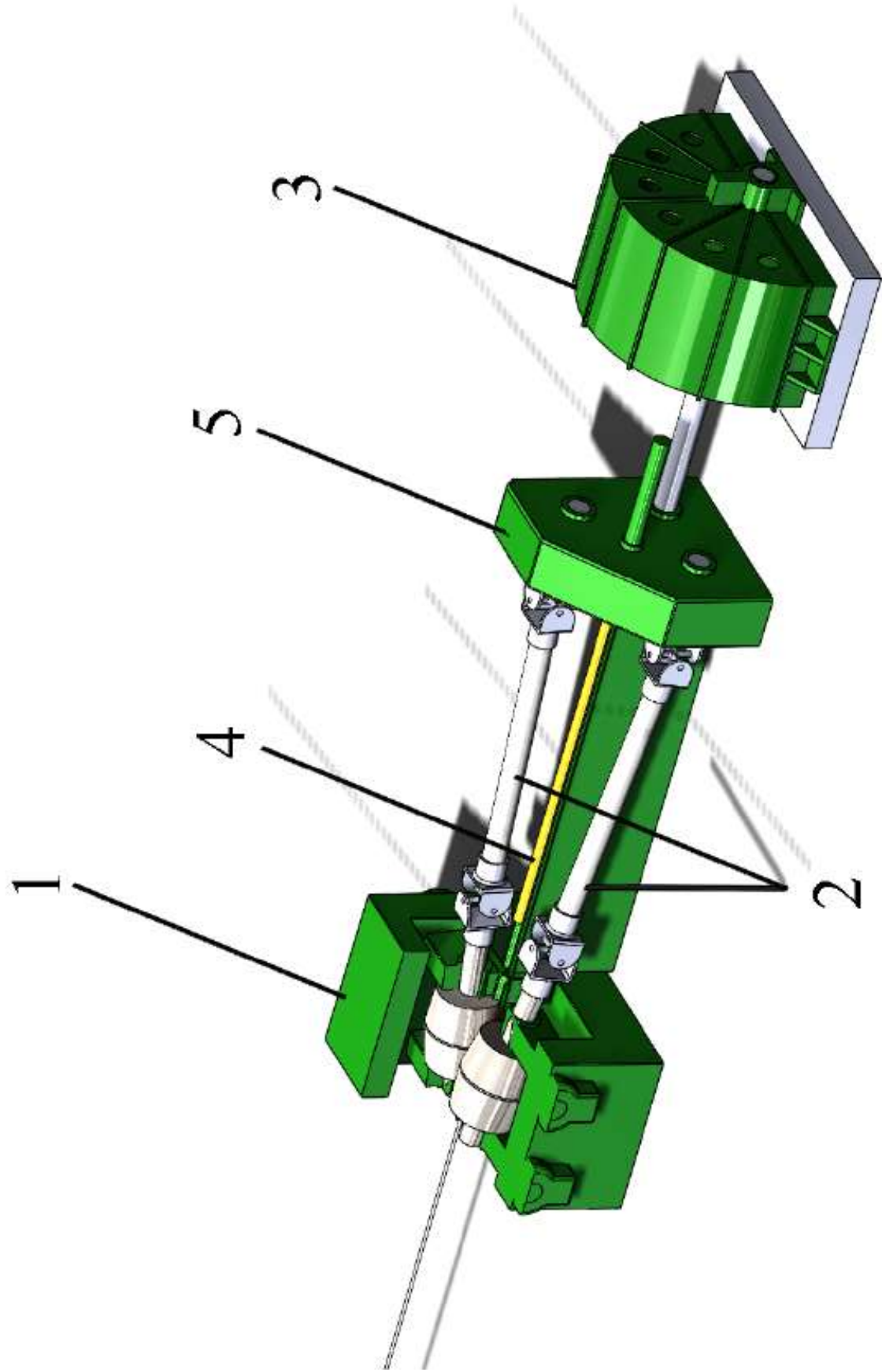


Рис. 1.2. Прошивной стан: 1 – прокатная клет; 2 – шпиндели; 3 – двигатель; 4 – трубная заготовка; 5 – шестеренная клет

На пильгерстанах производится прокатка труб различных сечений из углеродистых, низко- и среднелегированных сталей наружного диаметра от 48 до 650 мм [157]. Для диаметра труб более 140 мм толщина стенки не может быть выполнена менее 7–8 мм. Пильгерстаны имеют в поперечном сечении валков переменный катающий радиус. Прокатку ведут на конической оправке, при этом направление вращения валков противоположно направлению подачи заготовки в клеть (см. рис. 1.4). Цикл условно разделяют на два периода: рабочий ход (собственно прокатка металла) и холостой ход, когда происходит работа вспомогательных механизмов. Заготовка с каждым оборотом валков подвергается обжатию между калибрами и оправкой.

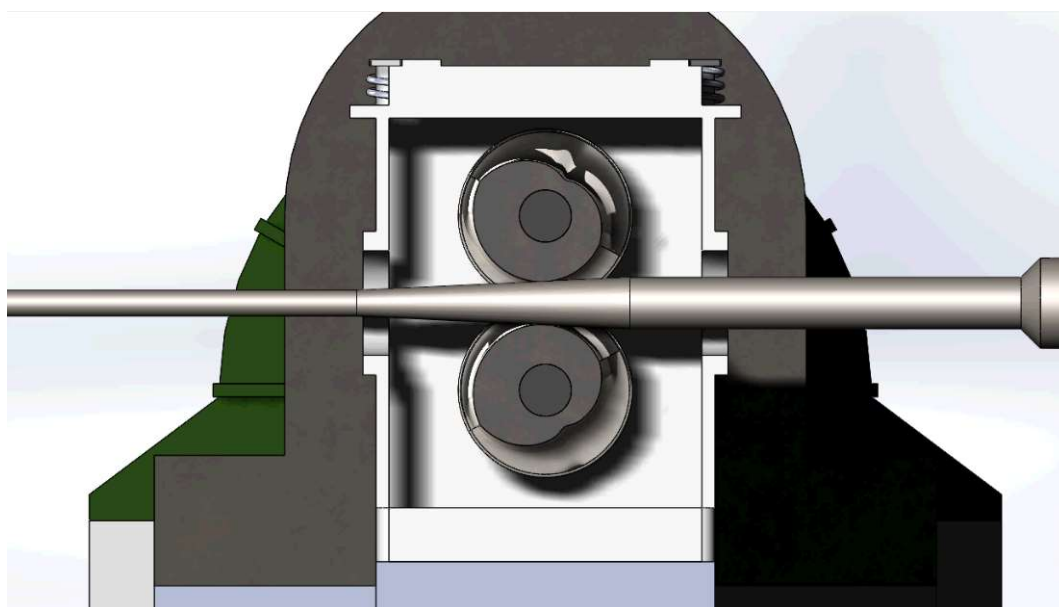


Рис. 1.3. Прокатка труб на пильгерстане

В цехе №1 ПАО «ЧТПЗ» производится прокатка бесшовных труб с толщиной стенки от 8 мм до 45 мм и наружным диаметром от 219 мм до 530 мм, длиной до 14-15 метров. Исходным материалом для труб являются круглые слитки (заготовки) массой до 15 тонн, которые впоследствии режутся на 3-4 части на дисковых пилах. Производительность двух пильгерстанах достигает до 30 труб в час, если толщина стенки не превышает 8 мм.

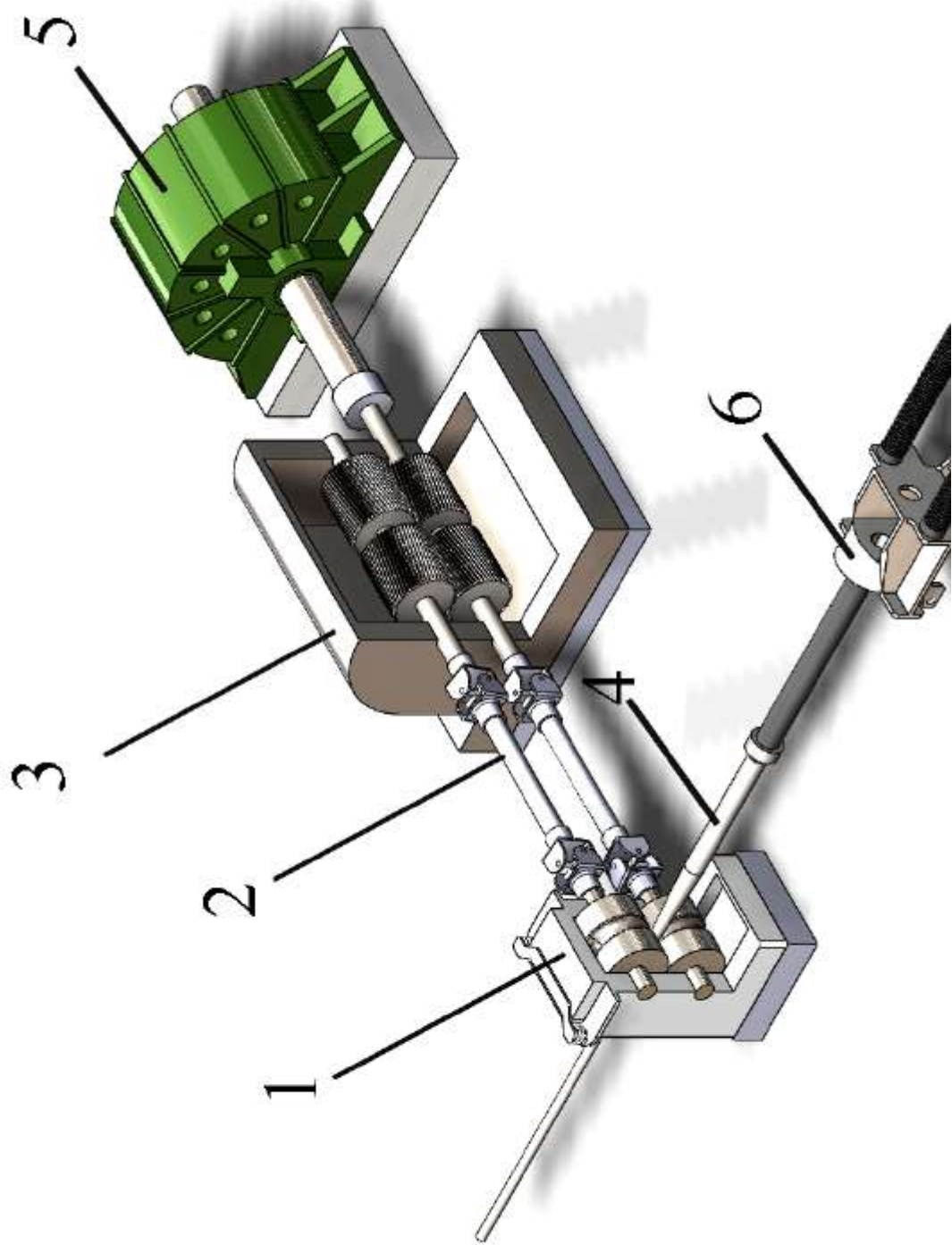


Рис. 1.4. Пильгерстан: 1 – прокатная клеть; 2 – шпиндели; 3 – шестеренная клеть; 4 – трубная заготовка; 5 – двигатель; 6 – вспомогательный механизм

Холодной прокатке подвергают главным образом трубы из нержавеющей и высоколегированных сталей, малопластичных металлов и сплавов, а также трубы ответственного назначения [95]. При этом получают трубы, точные по геометрическим размерам с внутренней и наружной поверхностью высокого качества. Например, на стане ХПТ-450 осуществляется прокатка бесшовных труб с наружным диаметром от 140 до 450 мм с толщиной стенки от 2,4 до 50 мм [1].

Прокатка высококачественных труб осуществляется на станах периодического действия (ХПТ, см. рис. 1.6) [49, 71, 108]. Процесс холодной прокатки аналогичен процессу горячей пилигримовой прокатки [157]. Прокатку ведут рабочими валками, которые вместе с рабочей клетью совершают возвратно-поступательное движение, при этом валки одновременно совершают и возвратно-качательное движение [79]. В валках закреплены сменные калибры, имеющие ручей переменного сечения. Прокатку ведут на неподвижной конической оправке.

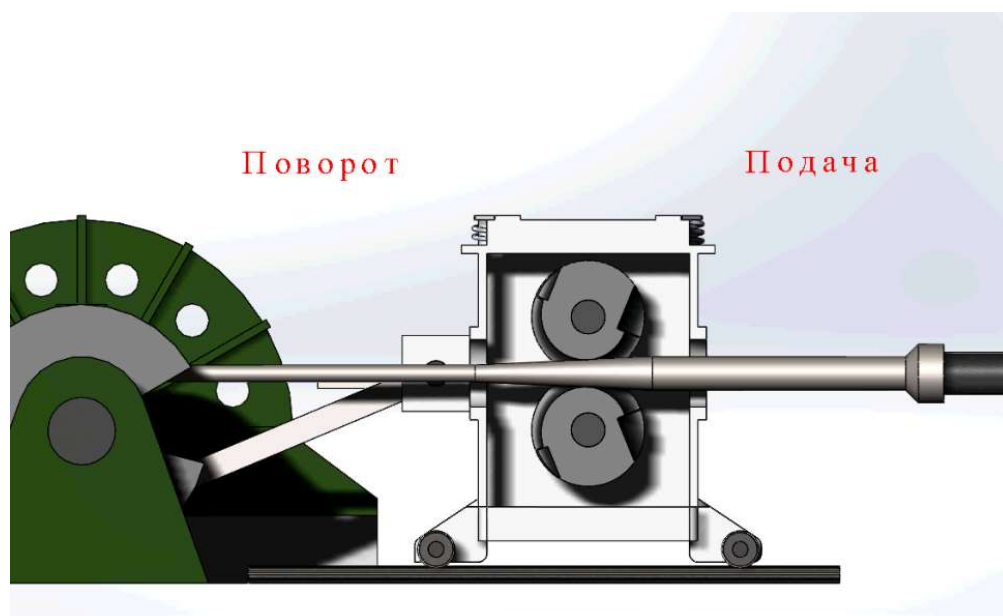


Рис. 1.5. Прокатка труб на стане холодной прокатки труб

Когда валки находятся в крайнем левом положении (заднее положение), заготовка подается в клеть на величину подачи, в крайнем правом положении валков (переднее положение) происходит поворот трубы.

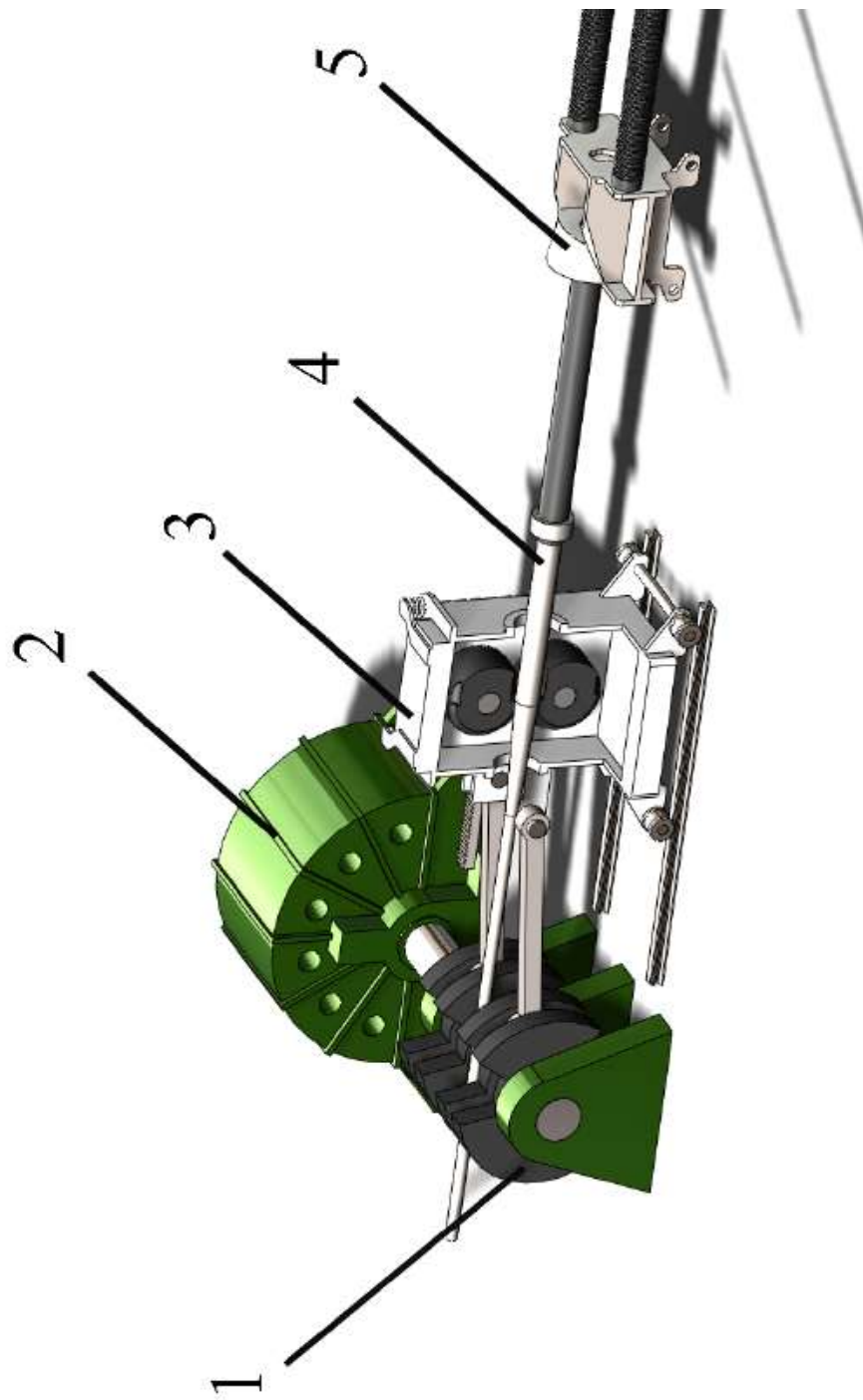


Рис. 1.6. Стан холодной прокатки труб: 1 – кривошипно-шатунный механизм; 2 – двигатель; 3 – прокатная клеть; 4 – трубная заготовка; 5 – вспомогательный механизм

1.2. Краткие сведения о существующих электроприводах и нагрузочных диаграммах прокатных станов пилигримовой группы

Валки существующих прокатных станов пилигримовой группы приводятся в движение электроприводами постоянного тока. Паспортные данные двигателей главных электроприводов прошивного, пильгерстана и ХПТ-450 приведены в таблице 1.1. Привод валков осуществляется через шестеренную клеть. Для уменьшения влияния пиковых нагрузок привод пильгерстана оснащен маховиком. Управление электроприводом каждого из станов осуществляется комплектным тиристорным преобразователем.

Многие заводы оснащены устаревшим электрооборудованием. Так, на ПАО «Челябинский трубопрокатный завод» двигатели прошивного и пильгерстана работают с довоенных лет.

Таблица 1.1

Паспортные данные электродвигателей станов пилигримовой группы

Параметр	Тип стана		
	Прошивной	Пильгерстан	ХПТ-450
Тип двигателя	<i>GM 840/40</i>	<i>GM 900/100</i>	П21-125-9к
Номинальная мощность, P_n	2570 кВт	2570 кВт	1300 кВт
Напряжение якоря, $U_{я}$	700 В	700 В	620 В
Номинальный ток, $I_{я}$	3900 А	4000 А	2340 А
Напряжение возбуждения, $U_{в}$	500 В	500 В	220 В
Ток возбуждения, $I_{в}$	30 А	90 А	143,5 А
Номинальная скорость, n_n	80 об/мин	35 об/мин	40 об/мин

За исходные характеристики технологических процессов прокатки на этих станах принимались осциллограммы прокатки. В качестве примера ниже приведены результаты статистической обработки осциллограмм процесса прокатки слитков стали марки 38ХНЗМФА на прошивном стане [82]. Гистограмма распределения токов якоря прокатного двигателя, полученная

обработкой серии осциллограмм, приведена на рис. 1.7. Среднеарифметическое значение наблюдаемых величин тока прокатки принималось за 100 %. В этом случае модуль относительного значения отклонения тока якоря от среднего составил:

$$\Delta I_{CP} = (\sum |I_{CP} - I_i|) / N = 0,058.$$

Здесь N – число измерений тока якоря; I_{CP} , I_i – относительные значения среднего тока и тока при прокатке конкретного i -го слитка.

Статистическая дисперсия относительного значения отклонения тока от среднего

$$\sigma^2 = \frac{\sum (I_{CP} - I_i)^2}{N} = 0,0056,$$

а среднеквадратичное отклонение

$$\sigma = 0,075.$$

Размах отклонений (разница между максимальным и минимальным наблюдением) тока якоря в ходе прокатки составил 32 % от I_{CP} .

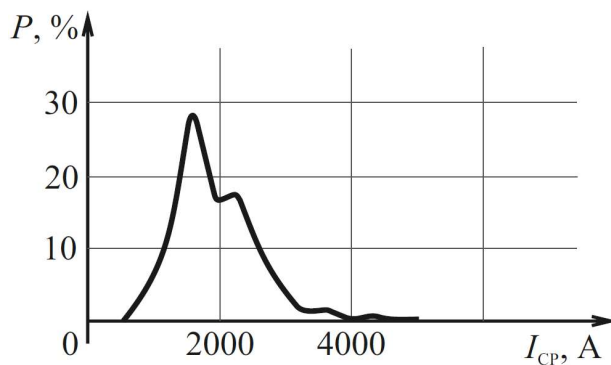


Рис. 1.7. Гистограмма распределения тока якоря прокатного двигателя прошивного стана

Хотя исследуемые прокатные станы принципиально отличаются по назначению и картине распределения усилий в зоне прокатки (обжатия), тем не менее это – станы, имеющие ряд схожих принципиальных особенностей: непрерывный нереверсивный режим работы с резко выраженной

неравномерностью момента статической нагрузки (режим S6), близкие значения скорости прокатки и мощности приводных двигателей, прокатка труб осуществляется на оправке.

Для трубопрокатных агрегатов пилигримовой группы характерна существенная неравномерность момента нагрузки, определяемая технологией процесса прокатки. При этом весь цикл прокатки можно разделить на два

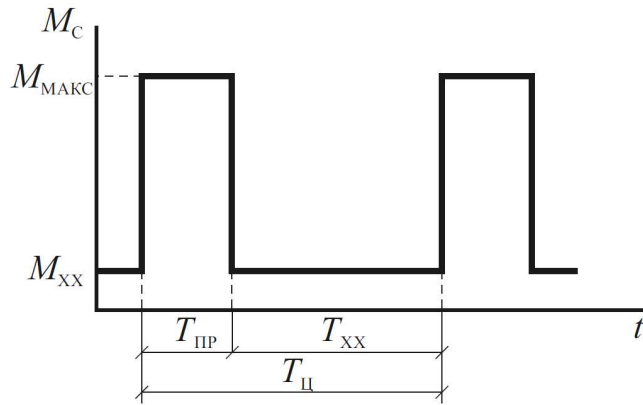


Рис. 1.8. Обобщенная нагрузочная диаграмма главных электроприводов станов пилигримовой группы

участка: рабочий ход и холостой ход.

Энергосиловые характеристики станов очень схожи, что позволило в работе пользоваться обобщенной нагрузочной диаграммой (см. рис. 1.8). В табл. 1.2 приведены численные значения параметров этих диаграмм для разных типов станов.

Таблица 1.2

Параметры нагрузочных диаграмм 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.

1.3. Проблемы энергосбережения в регулируемых металлургических электроприводах и особенности ее решения

Изучению способов снижения электрических потерь в электроприводах с электродвигателями разного типа посвящено достаточно много работ. Здесь можно указать на работы И.И. Петрова [104], Н.Ф. Ильинского [25, 64, 65],

Б.С. Лезнова [84-86], О.В. Крюкова [80, 81, 107, 167-169], Ю.С. Усынина [134, 137, 148, 166], И.Я. Браславского [19-21], З.Ш. Ишматова [21, 66], В.Н. Полякова [36, 106, 161, 162].

Особо следует обратить внимание на цикл работ, посвященных энергосбережению в электроустановках металлургической промышленности: прокатных станов (А.С. Карандаев [38, 68, 115], В.Ф. Бурьянов [23], В.Р. Храмшин [149-154]), дуговых сталеплавильных печей (Г.П. Корнилов [75-77, 92]), тягодутьевых механизмов (Ю.С. Усынин [137, 148], О.В. Крюков [107, 167]), общих вопросов организации энергосбережения на металлургических предприятиях (Г.В. Никифоров [72, 89-91], В.К. Олейников [93]).

Задача энергосбережения в электроприводах, как это следует из обзора научно-технических источников информации, оказывается достаточно сложной и даже неоднозначной.

Так, одним из путей экономии электроэнергии признается применение электродвигателей с повышенным номинальным КПД даже в массовом электроприводе [9-12, 21, 64]. Однако это решение неоднозначно, так как влечет за собой перерасход активных материалов, в первую очередь меди, завышению габаритов электродвигателя и, как следствие, их стоимости [166].

В большом числе публикаций обосновывается целесообразность, большая выгода от перехода на регулируемый электропривод [21, 64, 86, 166]. Это связано с тем обстоятельством, что в большинстве случаев основные потери электроэнергии сосредоточены в технологическом процессе из-за несовершенного ведения этого процесса рабочим механизмом, нерегулируемым по скорости (или по моменту). Например, в [166] показано, что в электроприводах насосов и вентиляторов отказ от использования задвижки и переход к регулированию угловой скорости двигателя увеличивает КПД установки на 10...40 %.

При комплексном подходе к проектированию асинхронного частотно-регулируемого электропривода такие мероприятия, как исполнение пазов

ротора неглубокими, обоснованное число пар полюсов, применение схем питания обмоток статора, позволяющих улучшить гармонический состав магнитодвижущей силы и снизить дифференциальное рассеяние, а другими словами, конструирование электродвигателя, рассчитанного на работу не от промышленной сети, а от преобразователя, обеспечивает повышение энергетических и улучшение массо-габаритных показателей электропривода [21, 64, 166].

В ряде работ выбор установленной мощности электромеханического преобразователя признается важным организационно-техническим мероприятием энергосбережения. Обращается внимание на коэффициент загрузки двигателя, который на основании данных энергоаудита в отечественной практике порой оказывается равным 0,3...0,4. Это обстоятельство говорит о том, что капитальные затраты на электропривод необоснованно завышены, а активные материалы, заложенные в двигатель, недоиспользуются, как следствие, – снижаются КПД и коэффициент мощности [21, 64].

Выбор способа управления электроприводом, реализованным даже на базе серийного электротехнического оборудования, также позволяет добиться экономии электроэнергии. Например, для нерегулируемого электропривода с изменяющейся нагрузкой в качестве одного из возможных способов повышения энергоэффективности предлагается формировать управляющее воздействие на тиристорный преобразователь напряжения в функции статического момента. Для регулируемого электропривода с широким диапазоном момента нагрузки приводится обоснование способа поддержания постоянной величины скольжения, что позволяет получить минимальные потери за счет снижения тока намагничивания и уменьшения потерь в стали [22, 166].

1.4. Основные пути экономии электроэнергии

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. 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 синтез

законов управления электроприводом с позиции минимального энергопотребления (см. рис. 1.9).

Существующие пилигримовые станы имеют сложные кинематические цепи, что увеличивает потери электроэнергии. Чтобы снизить толчки тока в силовых цепях прокатных двигателей и сетях электроснабжения, на некоторых станах применяют маховичный привод (например, на пильгерстане установлен маховик диаметром 9 метров и весом 120 тонн), что не только утяжеляет электропривод, но и увеличивает



Рис. 1.9. Основные способы экономии электроэнергии в электроприводах пилигримовых станов

потери холостого хода. Возможности современных средств управления позволяют решение многих задач в реализации заданных законов движения исполнительных органов поручить электроприводу и тем самым упростить кинематические связи (например, отказаться от шестеренной клетки на прошивных и пильгерстанах), перейти на индивидуальный электропривод валков, что расширяет диапазон возможных законов управления движением.

Выбор типа электропривода в рамках решения поставленной задачи энергосбережения необходимо рассматривать с позиции минимума потерь в электромеханическом и электрическом преобразователях. Наиболее приемлемым на этапе предварительной оценки, по нашему мнению, следует признать опыт существующих решений: провести статистическую обработку данных, выделить и дать количественные оценки удачным особенностям конструкции существующих двигателей, объяснить возможность реализации этих признаков в нетрадиционных типах электроприводов, например, с синхронным реактивным двигателем независимого возбуждения (СРДНВ).

Структуры систем управления, обеспечивающие энергосберегающие режимы работы электропривода, представлены на рис. 1.9. При выборе законов управления необходимо рассмотреть как способы экономии электроэнергии в существующих системах подчиненного регулирования, так и проанализировать возможности для механизмов с ударным характером нагрузки нетрадиционных схем управления потоком и током якоря.

Все возможные способы экономии электроэнергии в электроприводах пилигримовых станов представлены в виде структурной схемы (рис. 1.9). Здесь основными способами выделены: совершенствование силового механо- и электрооборудования, рациональный выбор типа электропривода и реализация энергосберегающих законов управления.

ГЛАВА 2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРИНЯТОЙ МЕТОДИКИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ В ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯХ ПРОКАТНЫХ СТАНОВ

В этой главе обсуждается **второе научное положение**.

Для главных приводов прокатных станов в настоящее время применяют электродвигатели постоянного тока (ДПТ) и синхронные (СД) [56]. Хотя их технические характеристики изучены достаточно глубоко, но с точки зрения энергосбережения здесь, на наш взгляд, имеются неиспользованные резервы. Их можно реализовать, анализируя детально представленные заводами-изготовителями составляющие потерь в электродвигателях, а также рассчитывая на возможности индивидуального изготовления крупных прокатных двигателей [3].

Кроме того, в последние годы появились очень заманчивые предложения по двигателям нового типа, в частности, по СРДНВ [41, 42, 44-47, 54, 55, 124, 125, 127, 131, 132, 138, 139], которые обладают рядом бесспорных преимуществ: простота и технологичность изготовления, бесконтактность, повышенные удельные моменты и значительная перегрузочная способность, облегчающее тепловой режим работы подшипников безобмоточное («холодное») исполнение ротора, простая однослойная обмотка статора с полным шагом.

Однако в плане энергосбережения серьезных публикаций, касающихся СРДНВ в прокатном производстве, не содержится. Поэтому в настоящей главе поставлена задача прогнозирования величины ресурса энергосбережения в СРДНВ, планируемых в качестве электроприводов пилигримовых станов.

Внимательное изучение особенностей работы и технической реализации электроприводов пилигримовых станов заставляет с позиции энергосбережения обратить внимание на следующие обстоятельства. Прежде

всего, 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. Принятые в свое время решения по электроприводам этих агрегатов не потеряли своей привлекательности и в настоящее время, несмотря на то, что сегодня потенциальные возможности электротехнической промышленности могут предложить значительно больший выбор возможных решений.

Рассчитывая на определенное сходство в конструкции и технологии изготовления прокатных электродвигателей разного типа, можно надеяться на получение достаточно точных прогнозов величин общих потерь и их составляющих в СРДНВ, используя опыт разработки и эксплуатации существующих электроприводов прокатных станов с ДПТ и СД.

Это обосновывает возможность и целесообразность синтеза математической модели для определения общих потерь и их составляющих в СРДНВ. При этом полезно воспользоваться богатым опытом разработки электродвигателей прокатных станов [3].

При синтезе предложенной модели решались следующие задачи:

- с учетом особенностей конструкции и функционирования разных прокатных двигателей предлагалась и обосновывалась структура модели;
- с использованием статистических подходов определялись и уточнялись параметры модели;
- на основании общности физических, конструктивных и других особенностей, объединяющих ДПТ и СД с СРДНВ, предлагалась и доказывалась возможность экстраполяции ряда признаков моделей ДПТ и СД на параметры модели СРДНВ;
- принималась модель потерь СРДНВ в сравнении с аналогичными моделями ДПТ и СД и производилось сопоставление суммарных потерь и их составляющих.

2.1. Технические особенности прокатных двигателей с позиций оценки составляющих потерь

При разработке математической модели определения потерь в СРДНВ полезно учесть наработанный в промышленности опыт при создании ДПТ и СД, 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. В данном пункте для решения поставленных ранее задач выполнен краткий обзор основных особенностей конструкции и технологии изготовления существующих прокатных двигателей, которые, по нашему мнению, влияют на величины составляющих потерь.

Исторически сложилось, что **электроприводы постоянного тока** были единственно возможным вариантом для механизмов, где требовалось регулирование скорости вращения. Однако, и на сегодняшний день, несмотря на сложную конструкцию и неудобства, связанные с обслуживанием щеточно-коллекторного аппарата, многие технологические объекты промышленности, особенно большой мощности, продолжают работать на этом типе привода, так как физический ресурс ДПТ еще не выработали [5, 13].

На этапе постановки задачи повышения энергоэффективности следует обратить внимание на конструктивные особенности ДПТ, которые могут оказаться актуальными при сопоставлении составляющих потерь [31, 74, 119, 120]. Стационарная часть машины, которая называется индуктором, выполняется из стального магнитопровода с полюсами и участвует в создании основного магнитного потока. Якорь и коллектор, зафиксированные на валу, – вращающаяся часть машины. Якорь представляет собой сердечник, который набирается из листов электротехнической стали. В пазах якоря укладывается обмотка, концы которой соединяются с пластинами коллектора,

изолированными от вала. Якорная обмотка двигателя постоянного тока имеет многофазное исполнение. В реальных прокатных двигателях – это число секций, которое можно принять бесконечно большим. Форму тока в секции в идеальной машине можно считать прямоугольной, а так как уровень пульсаций незначительный, то с позиций оценки потерь их допустимо не учитывать.

В ДПТ якорная цепь представляет собой несколько последовательно соединенных обмоток. С точки зрения оценки составляющих потерь удобно выделить следующие: якорную, компенсационную и обмотку добавочных полюсов.

Обмотка возбуждения, подключенная к источнику постоянного тока и расположенная на полюсах индуктора, создает основной магнитный поток в машине. Машина имеет явнополюсную систему возбуждения, межполюсные промежутки в существующих двигателях составляют 0,4-0,5 полюсного деления.

На основании проведенного обзора конструктивных особенностей ДПТ суммарные потери классифицируют на потери в магнитопроводе $\Delta P_{\text{маг}}$, электрические потери в цепях возбуждения и якоря $\Delta P_{\text{эл}}$, на потери в механической части $\Delta P_{\text{мех}}$, а также добавочные потери $\Delta P_{\text{доб}}$ [31, 74]. Основная часть магнитных потерь в любом электромеханическом преобразователе приходится на перемагничивание электротехнической стали. Эти потери пропорциональны частоте перемагничивания и максимальному значению индукции в степени, близкой ко второй. Второй составляющей потерь в магнитопроводе являются потери на вихревые токи. Они также пропорциональны частоте перемагничивания и максимальному значению индукции во второй степени. В ДПТ потери возникают только в сердечнике якоря, так как только здесь магнитный поток изменяется во времени с частотой вращения. Магнитный поток в статоре постоянный и потери отсутствуют. В соответствии с этим, характер магнитных потерь у этих машин определяется

режимом их работы.

Составляющие электрических потерь подразделяются на потери в активных сопротивлениях цепей возбуждения и якоря. Якорная цепь состоит из обмотки собственно якоря и обмоток дополнительных полюсов и компенсационной. Эти составляющие потерь относятся к переменным и зависят от нагрузки двигателя.

Механические потери в машинах постоянного тока складываются из потерь трения щеток о коллектор, в подшипниках якоря и вентиляционных потерь. Механические и магнитные потери при постоянной скорости вращения можно считать постоянными.

Еще одной составляющей потерь в ДПТ являются добавочные потери [31, 165]. Существует ряд причин, которые вызывают добавочные потери в электромеханическом преобразователе, например, искажение кривой магнитного поля в воздушном зазоре при нагрузке под влиянием поперечной реакции якоря, изменение во времени потоков рассеяния коммутируемых секций в проводниках обмотки, вихревые токи в крепежных деталях. Также часть добавочных потерь связана с основным значением магнитного потока и вызвана зубчатым строением сердечников и зависит от величины и частоты пульсации индукции, толщины листов стали полюсов и степени их изолированности. Такие потери чаще оценивают на основании эмпирических данных и принимают 1% для некомпенсированных и 0,5% для компенсированных машин от подводимой мощности для двигателя [74].

Область применения **синхронного электропривода** до недавнего времени ограничивалась механизмами, которые не требовали регулирования скорости [28, 30]. Например, СД большой мощности при низких скоростях вращения применялись для нерегулируемого привода черновых клетей непрерывных прокатных станов, компрессоров, поршневых насосных станций, холодильных машин, камнедробилок. С появлением электрических преобразователей данное обстоятельство необходимо пересматривать.

Принципиальная особенность этого типа электропривода заключается в возможности повышать коэффициент мощности системы [31].

Неподвижная часть машины переменного тока называется статором, а подвижная часть – ротором. Сердечники статора синхронных машин собираются из листов электротехнической стали. Сердечник статора закрепляется в корпусе, а сердечник ротора – на валу на ободке с крестовиной и втулкой, надетой на вал (машины большой мощности). Вал ротора вращается в подшипниках, которые помещаются в подшипниковых щитах.

На внутренней цилиндрической поверхности статора имеются пазы, в которых размещаются проводники обмотки статора. Обмотка статора выполняется обычно трехфазной и присоединяется к сети трехфазного тока. Трехфазная обмотка статора синхронной машины выполняется с таким же числом полюсов, как и ротор, и называется также обмоткой якоря. Сердечник статора вместе с обмоткой называется также якорем.

Ротор синхронной машины имеет обмотку возбуждения, питаемую через два контактных кольца и щетки постоянным током от постороннего источника. Назначение обмотки возбуждения – создание в машине первичного магнитного поля. Ротор вместе со своей обмоткой возбуждения называется индуктором. При изготовлении синхронных машин принимаются меры к тому, чтобы распределение индукции поля возбуждения вдоль окружности статора было по возможности близко к синусоидальному, так как в традиционных машинах переменного тока число фаз статора равно трем и прямоугольная форма тока приведет к резкому увеличению потерь [87].

Переход на многофазность в традиционных электроприводах переменного тока, как показано в работах Соустина Б.П. [17, 18], не ухудшает качество переходных процессов, но снижает пики моментов и токов, вызванные несинусоидальностью напряжения и распределения индукции в зазоре. Увеличение числа фаз в электроприводах переменного тока резко снижает требования к синусоидальной форме тока, а также приводит к

уменьшению потерь в массивном роторе от высших гармоник.

Преобразование энергии в синхронной машине связано с потерями энергии. Все виды потерь в СД так же, как и в ДПТ, разделяются на основные и добавочные. Потери в синхронной машине складываются из электрических потерь в обмотке статора $\Delta P_{ст}$, потерь на возбуждение $\Delta P_{об}$, магнитных $\Delta P_{маг}$, механических $\Delta P_{мех}$ и добавочных потерь $\Delta P_{доб}$ [31].

Магнитные потери синхронной машины происходят в сердечнике статора, который подвержен перемагничиванию вращающимся магнитным полем. Эти потери состоят из потерь от гистерезиса и потерь от вихревых токов. Механические потери – это сумма потерь на трение в подшипниках и потерь на вентиляцию.

Добавочные потери в СД разделяются на два вида: пульсационные потери в полюсных наконечниках ротора и потери при нагрузке. Добавочные пульсационные потери в полюсных наконечниках ротора обусловлены пульсацией магнитной индукции в зазоре из-за зубчатости внутренней поверхности статора. Добавочные потери при нагрузке в СД определяют в процентах от подводимой мощности двигателей [165].

Синхронный реактивный двигатель независимого возбуждения в основе своей конструкции и функционирования имеет много общих особенностей с прокатными двигателями переменного тока (магнитная система и корпус статора выполняются по технологии и с применением оснастки, используемой в производстве СД) и ДПТ (многофазная обмотка якоря с полным шагом, соотношение размеров межполюсного промежутка и полюса). В отличие от традиционной синхронной машины СРДНВ не имеет специальной обмотки возбуждения. Эту роль выполняет распределенная обмотка статора, выполненная с полным шагом [96-99, 136].

СРДНВ имеет многофазное исполнение, которое особенно уместно у двигателей средней и большой мощности особенно там, где приходится дробить ток фазы на отдельные ветви [27-30, 181].

Если анализировать количество докладов, публикаций по электроприводам с синхронными реактивными двигателями, то конференции последних лет демонстрируют неуклонный рост внимания к этим электроприводам [7, 46, 52, 55, 61-63, 132, 144]. Это обосновывает попытку более глубокого изучения возможностей этих электроприводов с позиции энергосбережения наряду с общепринятыми оценками (надежность, стоимость, технологичность изготовления, материалоемкость, отсутствие дефицитных вариантов).

Синхронный реактивный электропривод независимого возбуждения (Field Regulated Reluctance Machine) впервые описан у Н. Weh [180]. Особенности протекания электромагнитных процессов рассмотрены, в частности, Т. Lipo и его школой [171-174, 175-179]. Из отечественных авторов можно отметить работы профессора Ю.С. Усынина [96-102, 125-131], профессора М.А. Григорьева [141-143, 145-147], а также кандидатские и докторские диссертации последних лет [8, 24, 39, 43, 48].

В отличие от СД и тем более ДПТ, где активно работает только та часть обмотки якоря, которая в данный момент времени находится напротив полюса, а витки обмотки якоря, попадающие в межполюсный промежуток, током якоря обтекаются, но полезной работы не выполняют, в СРДНВ эффективно работает вся обмотка: витки статора, расположенные напротив полюса, создают активный момент, а расположенные напротив межполюсного промежутка – создают поток возбуждения, не требуя для этой цели специальной обмотки возбуждения, как в СД или ДПТ. С позиций экономии электроэнергии это оборачивается исчезновением одной составляющей потерь.

Качественный сравнительный анализ рассматриваемых в работе электромеханических преобразователей позволил выделить конструктивные и функциональные особенности СРДНВ по сравнению с существующими прокатными двигателями (см. табл. 2.1).

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

Полученные классификационные признаки дают возможность использования опыта проектирования и эксплуатации существующих СД и ДПТ в условиях прокатного производства при разработке энергоэффективных электроприводов с СРДНВ.

На основании анализа физической природы происхождения рассмотренных составляющих потерь в двигателях постоянного тока потери

можно классифицировать следующим образом:

$$\Delta P_{\text{ДПТ}} = \Delta P_{\text{як}} + \Delta P_{\text{ко}} + \Delta P_{\text{дп}} + \Delta P_{\text{ов}} + \Delta P_{\text{маг}} + \Delta P_{\text{мех}} + \Delta P_{\text{доб}};$$

– в синхронных двигателях

$$\Delta P_{\text{СД}} = \Delta P_{\text{ст}} + \Delta P_{\text{ов}} + \Delta P_{\text{маг}} + \Delta P_{\text{мех}} + \Delta P_{\text{доб}}.$$

Следует обратить внимание, что реальная совокупность двигателей индивидуального исполнения допускает существование особенностей конструкции и технологии их изготовления. В свою очередь, это приводит к разбросу их параметров и усложнению реальной картины относительных значений в величинах составляющих потерь. С учетом сказанного попытка выделения строго однозначной функциональной зависимости общих потерь и их составляющих от номинальных значений мощности и момента двигателей требует количественной оценки и более строгого математического обоснования с привлечением аппарата статистического анализа.

Итак, на основании проведенного качественного анализа предложено статистическую модель потерь СРДНВ представить в виде суммы составляющих потерь, которые содержатся в подробных технических данных на двигатели (клиентских формулярах) заводов-изготовителей. Это позволило максимально учесть особенности конструирования, изготовления и эксплуатации существующих прокатных двигателей.

Также показано, что численные значения составляющих потерь в СРДНВ целесообразно прогнозировать в два этапа: сначала ориентироваться на численные значения составляющих потерь существующих двигателей (ДПТ, СД) с учетом близости конструкции и технологии изготовления их узлов, а затем уточнять, используя методы математической статистики.

2.2. Синтез моделей потерь существующих прокатных двигателей в электроприводах прокатных станов

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: проведен кластерный анализ с целью разбиения совокупности данных на однородные группы и затем факторный анализ, что позволило определить взаимосвязи между интересующими выходными переменными и рассматриваемыми факторами [82]. Факторный анализ включал в себя регрессионный анализ и оценку достоверности на основании критерия Стьюдента.

Предлагаемый подход позволил объяснить влияние особенностей конструктивного исполнения электромеханических преобразователей на величину потерь и дать сравнительные количественные оценки.

Большая выборка параметров прокатных двигателей, близких по мощности и условиям работы электродвигателям пилигримовых станов, позволила математически строго описать зависимости этих параметров от номинальных значений мощности и момента двигателей.

В качестве генеральной совокупности рассматривался большой объем технических данных двигателей постоянного и переменного тока прокатных станов, работающих на разных предприятиях (на основании данных заводоизготовителей) [3]. В таблицах 2.2 и 2.3 приведены фрагменты исходных данных. Наиболее ценными для решения поставленных в работе задач являлись достаточно подробные данные по составляющим потерь.

Чтобы увеличить точность математической обработки исходных данных, в работе был выполнен кластерный анализ, который проводился с применением алгоритма выделения связанных компонент, основанном на определяющих входной параметр гистограммах распределения межкластерных расстояний [82]. 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. 2.1).

Таблица 2.2

Фрагмент таблицы исходных данных прокатных двигателей постоянного тока (информация заимствована из [3])

№	P_H , кВт	n_H , об/мин	U_H , В	I_H , А	M_H , кНм	R_H , Ом	R_B , Ом	I_B , А	z_p	z_a	$\delta, м \cdot 10^{-3}$	$I, кТМ2 \cdot 10^3$	$j, А/мм^2$	$A, А/см$	ΔP_B , кВт	$\Delta P_{доб}$, кВт	$\Delta P_{копл}$, кВт	ΔP_K , кВт	ΔP_M , кВт	$\Delta P_{Мех}$, кВт	ΔP_{Σ} , кВт	η	$\Delta P_{об}$, кВт	
1	9120	81	1000	9600	1100	1,4	0,1	343	16	32	7	87	4,3	607	136	48	143,5	19,2	89	31,9	467,6	95,1	59,7	
2	9000	65	800	6000	677	4,5	0,16	427	14	28	7,5	85	4,91	-	214	48	184	24	89,3	27,8	656,7	93,2	-	
3	8840	65	900	10350	1325	2,2	0,39	385	22	44	9	112,5	5,83	506	170	46,5	141	20,7	86	17,2	481,4	94,9	-	
4	8600	70	850	5410	600	5,8	0,2	353	18	18	7	100	4,3	617	189	46	225	21,6	86,6	26,6	594,9	93,5	66,8	
5	7400	60	860	9200	1200	3,1	0,22	477	20	40	8	116,3	5,18	590	166	37	167,3	18,4	74,7	18	481,4	94	-	
...
347	200	400	440	497	4,86	48,6	14,7	9,5	4	4	5	0,03	5,5	400	8,3	1,1	6,4	1	1,6	0,8	19,2	91,2	2,1	

Таблица 2.3

Фрагмент таблицы исходных данных прокатных синхронных двигателей (информация заимствована из [3])

№	P_H , кВт	n_H , об/мин	U_H , В	I_{H1} , А	M_H , кНм	$\cos\phi$	$R_1, Ом \cdot 10^{-3}$	$R_2, Ом$	$I_B, А$	z_p	z_a	$\delta, м \cdot 10^{-3}$	$I, кТМ2 \cdot 10^3$	ΔP_M , кВт	$\Delta P_{Мех}$, кВт	ΔP_1 , кВт	$\Delta P_{1доб}$, кВт	ΔP_2 , кВт	$\Delta P_{2доб}$, кВт	ΔP_{Σ} , кВт	η		
1	19500	375	6000	2150	508	0,9	4,4	0,27	480	16	8	14	47,5	83,9	75,5	75	61,7	80	-	440	98,2		
2	18500	375	10500	1100	480	0,95	15,5	0,27	495	16	4	18	35	87,2	76,5	69	50	81	-	420	98,2		
3	10900	500	6000	1350	211	0,8	8,05	0,132	628	12	3	15	21,1	58,5	76,5	55,7	38,5	55	34,5	330	97,7		
4	10000	150	10000	682	650	0,9	41,8	0,248	564	40	4	12	165	64,6	52	71,2	33,2	96	-	360,6	96,6		
5	9000	375	6300	1065	234	0,8	14,7	0,165	550	16	4	15	27,5	46,4	60	61	66,6	61	-	295	96,8		
6	9000	500	10000	678	175	0,8	37,7	0,132	565	12	3	15	21,1	64,8	76,6	63,4	39,2	60,6	23,5	328,3	96,5		
...
212	1250	100	6000	146	122	0,9	328	0,384	275	60	1	5	25	17,6	8,4	26	10,4	36,8	8,6	107,8	92		

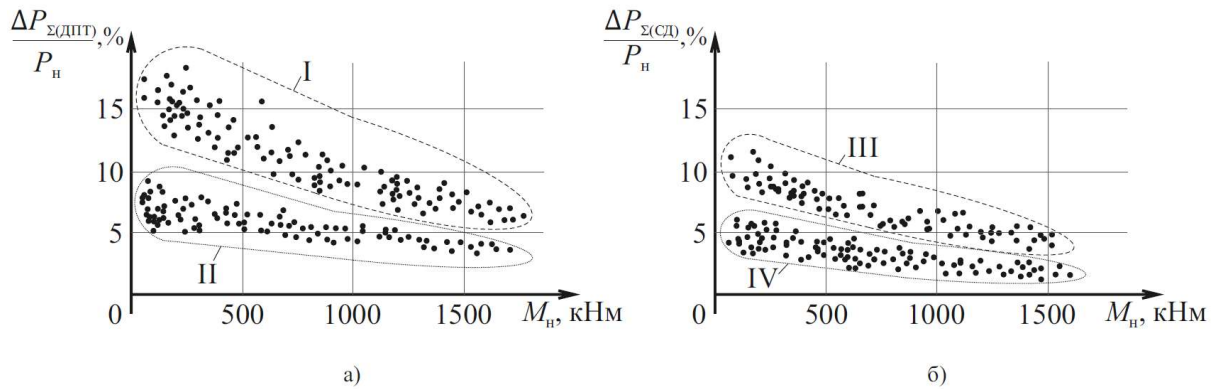


Рис. 2.1. Совокупность технических данных относительных суммарных потерь в прокатных ДПТ (а) и СД (б) в зависимости от номинального момента

Последующий регрессионный анализ проводился для параметров электромеханических преобразователей тихоходного исполнения и для каждой из составляющих потерь.

На рис. 2.2 (а, б) приведены совокупности данных относительных потерь в обмотках якоря ДПТ и статора СД.

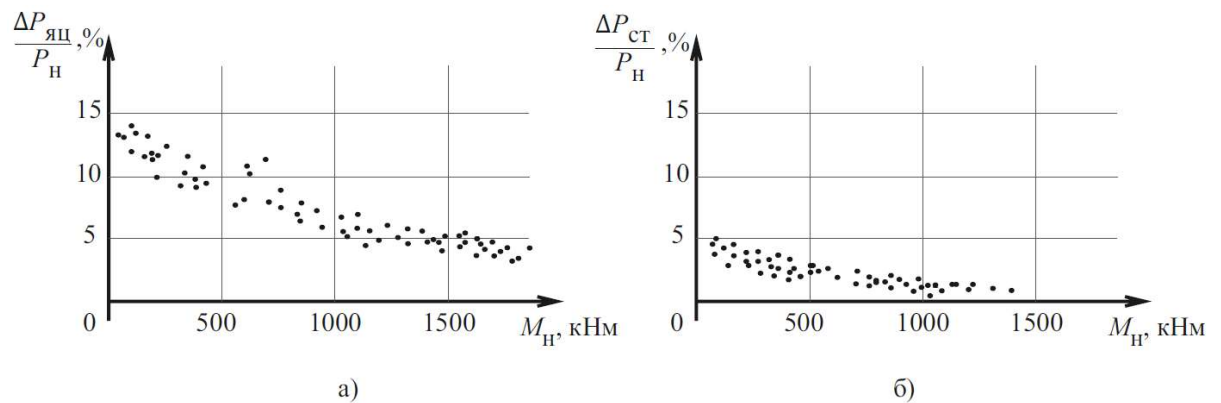


Рис. 2.2. Совокупность технических данных относительных потерь в обмотке якорной цепи ДПТ (а) и в обмотке статора СД (б) в зависимости от номинального момента

На рис. 2.3, 2.4 и 2.5 приведены совокупности данных относительных потерь в обмотках возбуждения, а также магнитных и механических потерь ДПТ (а) и СД (б).

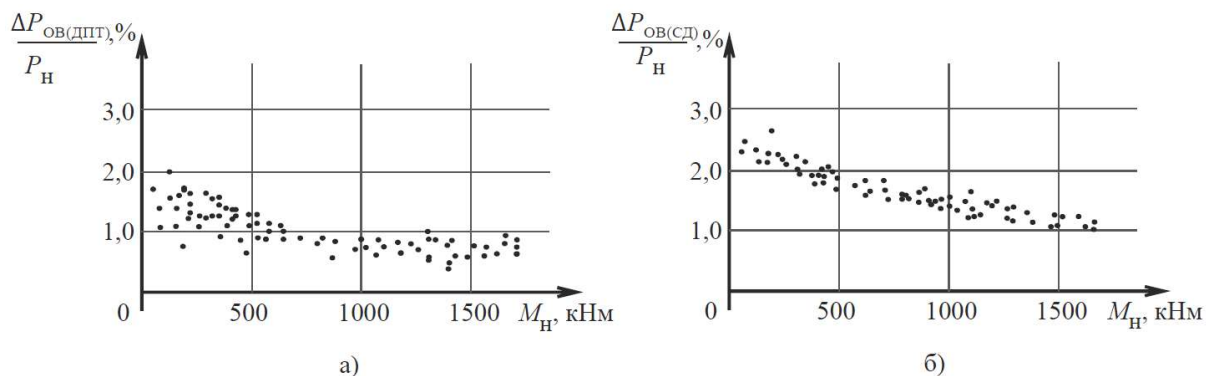


Рис. 2.3. Совокупность технических данных относительных потерь в обмотке возбуждения ДПТ (а) и СД (б) в зависимости от номинального момента

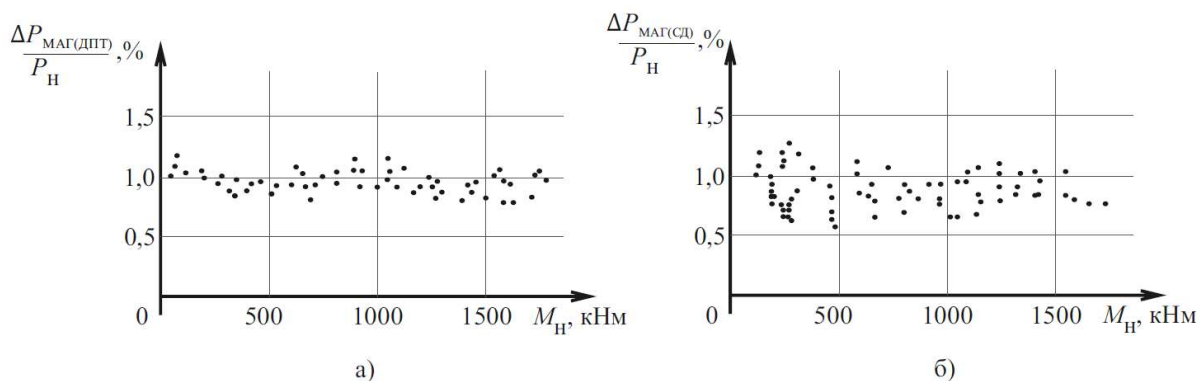


Рис. 2.4. Совокупность технических данных относительных магнитных потерь в ДПТ (а) и СД (б) в зависимости от номинального момента

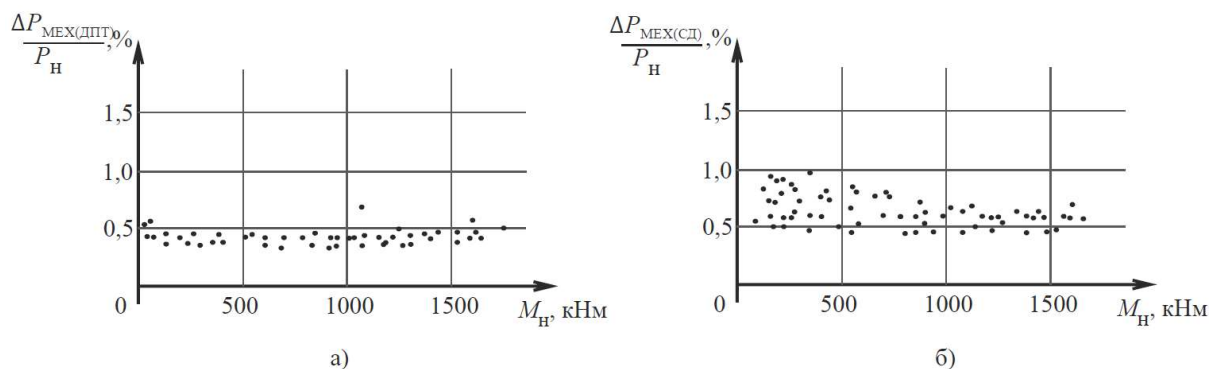


Рис. 2.5. Совокупность технических данных механических потерь в ДПТ (а) и СД (б) в зависимости от номинального момента

На рис. 2.6 (а, б) приведены совокупности данных относительных добавочных потерь в двигателях постоянного тока и синхронных двигателях.

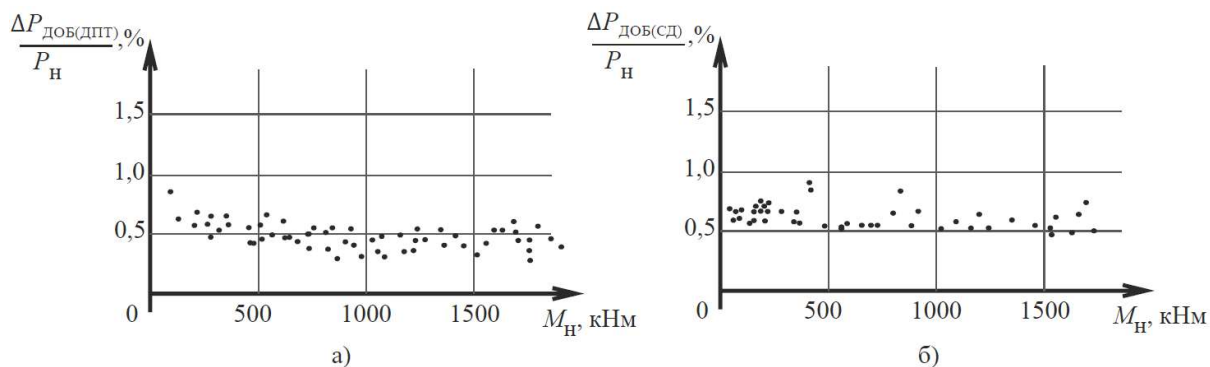


Рис. 2.6. Совокупность технических данных добавочных потерь в ДПТ (а) и СД (б) в зависимости от номинального момента

Коэффициенты уравнений регрессии рассчитывались методом наименьших квадратов [59, 60, 82]. Общий вид уравнений, которые описывают зависимости относительных потерь в электромеханических преобразователях от номинального момента, следующий:

$$\Delta P = A_{nm} \cdot I_n^m + A_{n(m-1)} \cdot I_n^{(m-1)} + \dots + A_{n0}$$

где A_m – коэффициенты уравнения регрессии.

Коэффициенты регрессии $A = (A_0, A_1, \dots, A_m)^T$ были найдены следующим образом:

$$\Lambda \cdot A = \beta,$$

где $\Lambda = X^T \cdot X$, $\beta = X^T \cdot y$.

Матрица X принимает следующий вид:

$$X = \begin{bmatrix} 1 & x_0 & \dots & x_0^m \\ 1 & x_1 & \dots & x_1^m \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & x_n & \dots & x_n^m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & M_0 & \dots & M_0^m \\ 1 & M_1 & \dots & M_1^m \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & M_n & \dots & M_n^m \end{bmatrix},$$

где x – значение номинального момента электромеханического преобразователя;

n – порядковый номер коэффициента уравнения регрессии;

m – степень уравнения регрессии.

Как показывает приведенная на рис. 2.7 кривая, суммарные потери в

двигателях тихоходного исполнения от номинальной скорости меняются мало и для СД лежат в пределах от 6 до 7,5 %.

Регрессионный количественный анализ был проведен с учетом принятой в п. 2.1 классификации составляющих потерь ДПТ и СД.

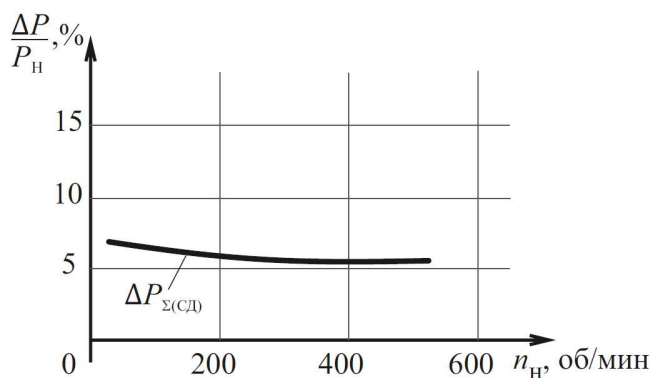


Рис. 2.7. Зависимость суммарных потерь

СД тихоходного исполнения от номинальной скорости

Было установлено, что порядок уравнений нелинейной регрессии, наиболее приемлемый с точки зрения минимального среднеквадратичного отклонения, равен двум. В результате уравнение потерь в якорной обмотке ДПТ 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 СД

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

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. 2.8). Следует обратить внимание на то обстоятельство, что масштаб оси ординат рис. 2.8 (а, б) отличен от рис. 2.8 (в, г, д). Это вызвано значительными (практически на порядок) количественными различиями в рассматриваемых составляющих потерь.

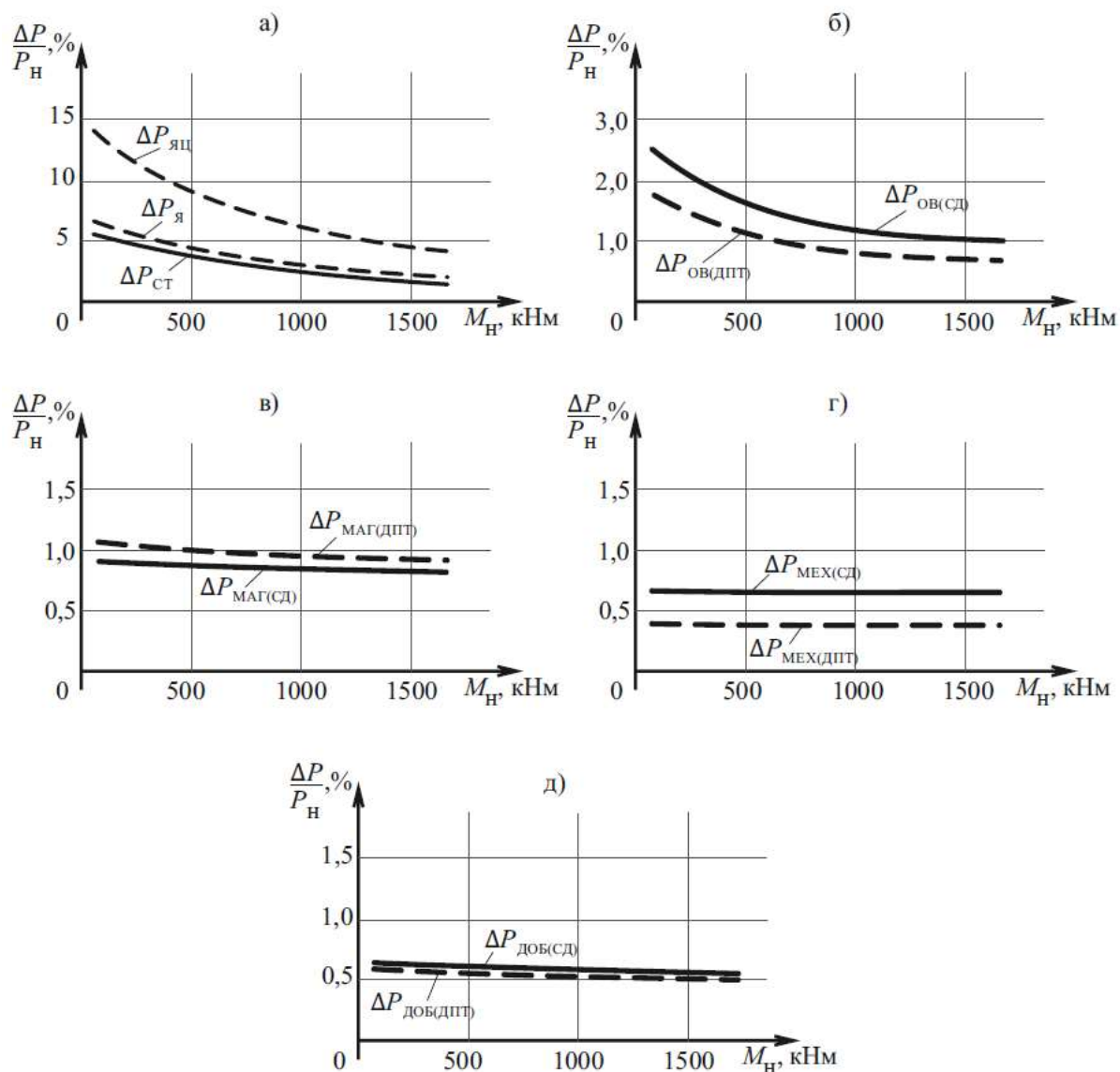


Рис. 2.8. Регрессионные зависимости составляющих потерь ДПТ и СД тихоходного исполнения от номинального момента: потери в якорной цепи ДПТ и обмотке статора СД (а); потери в обмотках возбуждения (б); магнитные потери (в); механические потери (г); добавочные потери (д)

На основании зависимостей на примере потерь собственно в якорной обмотке двигателей постоянного тока и обмотке статора синхронных двигателей тихоходного исполнения от номинального момента была проведена оценка достоверности статистического анализа [82]. В табл. 2.4 и 2.5 представлены результаты статистической обработки регрессионной модели потерь собственно в якорной обмотке двигателей постоянного тока и в обмотке статора синхронного двигателя.

Таблица 2.4

Результаты статистической обработки регрессионной модели потерь собственно
в якровой обмотке тихоходных двигателей постоянного тока

Параметр	M_H , кНм	$\overline{\Delta P_{исх}}$, %	$\overline{\Delta P_{рег}}$, %	d	d^2
Номер двигателя					
1	50	7,37	7,97	-0,60	0,360
2	62,5	7,23	7,82	-0,59	0,348
3	75	7,10	6,93	0,17	0,029
...
155	1500	3,20	3,26	-0,06	0,004
$s_d = \sqrt{\frac{\sum d^2 - \frac{(\sum d)^2}{n}}{n-1}}$	0,78				
$t = \frac{\bar{d} - \mu_d}{\frac{s_d}{\sqrt{n}}}$	1,38				
$t_{крит}$	1,66				

Таблица 2.5

Результаты статистической обработки регрессионной модели потерь
в обмотке статора тихоходных синхронных двигателей

Параметр	M_H , кНм	$\overline{\Delta P_{исх}}$, %	$\overline{\Delta P_{рег}}$, %	d	d^2
Номер двигателя					
1	50	6,08	7,2	-1,12	1,254
2	62,5	5,94	7,05	-1,11	1,232
3	75	5,81	5,16	0,65	0,422
...
126	1500	1,91	2,49	-0,58	0,336
$s_d = \sqrt{\frac{\sum d^2 - \frac{(\sum d)^2}{n}}{n-1}}$	1,01				
$t = \frac{\bar{d} - \mu_d}{\frac{s_d}{\sqrt{n}}}$	0,5				
$t_{крит}$	1,66				

На основании полученных результатов можно утверждать, что с вероятностью 0,95 регрессия достоверно описывает зависимость рассматриваемой составляющей от номинального момента, так как расчетное

значение квантиля Стьюдента не превышает критического (1,66).

Приведенный статистический подход применен для всех полученных регрессионных зависимостей составляющих потерь, статистические показатели сведены в табл. 2.6.

Таблица 2.6

Результаты статистической обработки регрессионных моделей составляющих потерь тихоходных электромеханических преобразователей

Статистический параметр	Двигатели постоянного тока				Синхронные двигатели			
	$\Delta P_{\text{ов}}$	$\Delta P_{\text{маг}}$	$\Delta P_{\text{мех}}$	$\Delta P_{\text{доб}}$	$\Delta P_{\text{ов}}$	$\Delta P_{\text{маг}}$	$\Delta P_{\text{мех}}$	$\Delta P_{\text{доб}}$
$s_d = \sqrt{\frac{\sum d^2 - \frac{(\sum d)^2}{n}}{n-1}}$	0,39	0,61	0,12	0,17	0,52	0,28	0,12	0,06
$t = \frac{\bar{d} - \mu_d}{\frac{s_d}{\sqrt{n}}}$	0,34	0,19	1,00	1,64	0,07	0,38	1,12	1,46
$t_{\text{КРИТ}}$	1,66							

Расчетное значение квантиля Стьюдента ни в одном из рассматриваемых случаев не превышало критического, что говорит о достаточно строгой, математически обоснованной (с вероятностью 0,95) зависимости составляющих потерь от принятого входного фактора.

Полученные зависимости позволяют заключить, что усредненная относительная величина потерь собственно в якоре двигателя постоянного тока лежит в пределах от 2,5 до 7 %, в статоре синхронного двигателя от 2,2 до 5,9 %. То есть рассматриваемые составляющие потерь оказываются достаточно близки (рис. 2.8 а). Это связано прежде всего с конструктивным исполнением обмоток якоря ДПТ и статора СД: обмотки распределенного типа, зубцовые зоны идентичны особенно на большие мощности, при этом отношения пазового шага и диаметра якоря лежат в пределах от 0,016 до 0,025

и близки в СД и ДПТ. Однако потери в обмотке статора СД существенно ниже, чем в якорной цепи ДПТ, что объясняется необходимым с позиций функционирования усложнением ее конструкции, то есть наличием в ДПТ обмоток дополнительных полюсов и компенсационной.

Количественные различия в обмотке якорной цепи ДПТ и обмотке статора СД следует объяснить усложненной обмоткой якорной цепи ДПТ, то есть наличием обмоток дополнительных полюсов и компенсационной.

В ДПТ и СД обмотка якоря выполняет функцию создания момента, создание основного магнитного потока обеспечивается обмоткой возбуждения, что оборачивается наличием еще одной составляющей потерь. Потери в обмотке возбуждения СД лежат в пределах от 1 до 2,5 %, в ДПТ – от 0,7 до 1,8 %. Это обстоятельство обусловлено относительно большей величиной воздушного зазора в СД по сравнению с ДПТ. Такое конструктивное решение при изготовлении СД принимается в качестве способа подавления реакции якоря [16]. Однако некоторые авторы обращают свое внимание на то, что величина зазора должна диктоваться условиями механической надежности и нет необходимости в неоправданном его завышении [18].

Магнитные и механические потери в обоих типах двигателей близки, что объясняется также некоторыми конструктивными сходствами такими как: явнополюсная система возбуждения, зубчатость якорей, тихоходное исполнение (рис. 2.8 в, г). Относительная величина магнитных потерь в ДПТ лежит в пределах от 0,9 до 1,0 %, в СД – от 0,8 до 0,9 %. Усредненные механические потери во всем диапазоне номинальных моментов электромеханических преобразователей принимают значения: в СД – 0,65 %, в ДПТ – 0,4 %.

Регрессионные зависимости для этих составляющих вырождаются в линейные и как частный случай проведенного анализа представляются в виде:

– для двигателей постоянного тока

$$\Delta P_{\text{МАГ(ДПТ)}} = A_{\text{МАГ(ДПТ)1}} \cdot M_{\text{н}} + A_{\text{МАГ(ДПТ)0}};$$

$$\Delta P_{\text{МЕХ(ДПТ)}} = A_{\text{МЕХ(ДПТ)1}} \cdot M_{\text{н}} + A_{\text{МЕХ(ДПТ)0}};$$

– для синхронных двигателей

$$\Delta P_{\text{МАГ(СД)}} = A_{\text{МАГ(СД)1}} \cdot M_{\text{н}} + A_{\text{МАГ(СД)0}};$$

$$\Delta P_{\text{МЕХ(СД)}} = A_{\text{МЕХ(СД)1}} \cdot M_{\text{н}} + A_{\text{МЕХ(СД)0}}.$$

Физическая природа добавочных потерь для рассматриваемых двигателей описана в п. 2.1. Приблизительная величина этой составляющей при проектировании электромеханических преобразователей оценивается на основании эмпирических зависимостей, приведенных, например, в [155]. Достаточно подробные данные заводов-изготовителей составляющих потерь, рассматриваемые в работе в качестве исходного материала и приведенные в [3], показывают, что усредненные добавочные потери в СД лежат в пределах от 0,6 до 0,65 %, в ДПТ – от 0,5 до 0,55 %.

Такое подробное рассмотрение составляющих потерь позволило в дальнейшем обоснованно выделить доминирующие составляющие потерь и указать наиболее эффективные пути снижения общих потерь.

В работах [21, 166] в качестве одного из способов повышения энергоэффективности рассмотрено применение двигателей с повышенным КПД, но это приводит к повышенному расходу активных материалов.

В массовом электроприводе большое разнообразие технологических объектов и широкий диапазон изменения нагрузок приводят к снижению коэффициента загрузки. По данным [64] в зарубежных электроустановках он снижается до 0,7, а в отечественных – даже до 0,3-0,4. В индивидуальных

системах электропривода прокатных станов этот коэффициент ближе к единице, определяется детерминированным характером нагрузки, что вытекает из необходимости строгого выполнения заданной программы прокатки.

На основании принятого в п. 2.1 уравнения суммарных потерь и проведенной количественной оценки составляющих математическая модель определения потерь в двигателе постоянного тока представлена в виде уравнений нелинейной регрессии второго порядка:

$$\Delta P_{\Sigma(\text{ДПТ})} = A_{\Sigma(\text{ДПТ})2} \cdot M_{\text{н}}^2 + A_{\Sigma(\text{ДПТ})1} \cdot M_{\text{н}} + A_{\Sigma(\text{ДПТ})0};$$

– в синхронном двигателе

$$\Delta P_{\Sigma(\text{СД})} = A_{\Sigma(\text{СД})2} \cdot M_{\text{н}}^2 + A_{\Sigma(\text{СД})1} \cdot M_{\text{н}} + A_{\Sigma(\text{СД})0}.$$

Полученные регрессионные зависимости суммарных потерь от номинального момента в двигателях постоянного тока и синхронных двигателях позволили дать усредненные количественные оценки составляющим потерь, а детальный сравнительный анализ составляющих потерь в этих двигателях – обосновать особенности полученных зависимостей (см. рис. 2.9).

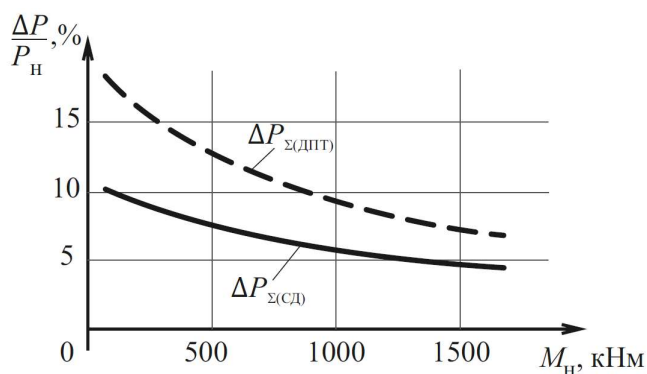


Рис. 2.9. Регрессионная зависимость суммарных потерь от номинального момента в двигателях постоянного тока и синхронных двигателях тихоходного исполнения

Статистическая оценка достоверности суммарных потерь в рассматриваемых электромеханических преобразователях проводилась на основании принятых ранее методик с учетом допустимого доверительного интервала (см. табл. 2.7 и 2.8).

Таблица 2.7

Статистическая оценка достоверности суммарных потерь
в тихоходных синхронных двигателях

Параметр	$\overline{\Delta P_{исх}}, \%$	$\overline{\Delta P_{пер}}, \%$	d	$E_1 = d - t \cdot \frac{s_d}{\sqrt{n}}$	$E_2 = d + t \cdot \frac{s_d}{\sqrt{n}}$
Номер двигателя					
1	10,50	10,48	0,02	-0,06	0,24
2	10,37	10,35	0,02		
3	10,30	10,32	-0,02		
...		
126	4,79	4,75	0,04		
$s_d = \sqrt{\frac{\sum d^2 - \frac{(\sum d)^2}{n}}{n-1}}$	0,02				
$t = \frac{\bar{d} - \mu_d}{\frac{s_d}{\sqrt{n}}}$	1,54				
$t_{крит}$	1,66				

Таблица 2.8

Статистическая оценка достоверности суммарных потерь
в тихоходных двигателях постоянного тока

Параметр	$\overline{\Delta P_{исх}}, \%$	$\overline{\Delta P_{пер}}, \%$	d	$E_1 = d - t \cdot \frac{s_d}{\sqrt{n}}$	$E_2 = d + t \cdot \frac{s_d}{\sqrt{n}}$
Номер двигателя					
1	18,89	18,91	-0,02	-0,06	0,23
2	18,50	18,43	0,07		
3	18,21	18,18	0,03		
...		
155	7,31	7,28	0,03		
$s_d = \sqrt{\frac{\sum d^2 - \frac{(\sum d)^2}{n}}{n-1}}$	0,05				
$t = \frac{\bar{d} - \mu_d}{\frac{s_d}{\sqrt{n}}}$	1,60				
$t_{крит}$	1,66				

Наибольшей из составляющих потерь в двигателях являются потери в цепи якоря двигателей постоянного тока. При этом суммарные потери в якорной цепи ДПТ больше, чем в обмотке статора СД в 2-3 раза, а потери в

обмотке собственно якоря ДПТ и обмотке статора СД близки между собой. Суммарные потери в ДПТ превышают потери в СД в 1,5-2 раза.

В качестве конкретного примера ниже приведены истинные величины относительных потерь в двигателе постоянного тока и синхронном, близким тихоходным двигателям рассматриваемых в работе пилигримовых прокатных станов. Составляющие потерь и некоторые характерные номинальные данные даны в табл. 2.9.

Таблица 2.9

Конкретный пример применения результатов

Таблица сравнения потерь в двигателях постоянного тока и синхронных двигателях (тихоходное исполнение) [3]

Параметр	Двигатель постоянного тока независимого возбуждения ($P_n=2250$ кВт, $n = 75$ об/мин)	Синхронный двигатель ($P_n=2500$ кВт, $n = 100$ об/мин)
Потери в якорной цепи (статоре), $\Delta P_{я}/P_n, \%$	4,89	4,2
Добавочные потери, $\Delta P_{доб}/P_n, \%$	0,55	0,64
Потери в КО и ДП, $\Delta P_{кодп}/P_n, \%$	4,34	–
Переходные на коллекторе, $\Delta P_{кол}/P_n, \%$	0,25	–
Потери в стали, $\Delta P_{маг}/P_n, \%$	1,13	1,02
Механические потери, $\Delta P_{мех}/P_n, \%$	0,36	0,42
Потери на возбуждение, $\Delta P_{в}/P_n, \%$	1,08	1,69
Суммарные потери, $\Delta P/P_n, \%$	12,6	7,97

Приведенные данные показывают, что относительные значения суммарных потерь и их составляющих в двигателях находятся в полученных с помощью разработанных в ходе работы математических моделей определения потерь пределах с учетом доверительного интервала, что говорит о достоверности результатов.

Итак, в данном пункте на основании проведенного количественного анализа предложены математические модели потерь в существующих прокатных двигателях в виде уравнений регрессии второго порядка. При этом среднеквадратичные отклонения истинных значений от регрессионных зависимостей не превышали допустимых ($s_{d_{\max}} = 1,01$), расчетные значения квантиля Стьюдента не превышали критического ($t_{\text{КРИТ}} = 1,66$) с вероятностью 0,95.

С использованием метода наименьших квадратов получены в функции величины номинального момента двигателя обобщенные (усредненные) зависимости общей величины суммарных потерь в электродвигателях и их составляющих. Они позволили обоснованно выделить главные составляющие потерь и тем самым указать наиболее эффективные пути снижения общих потерь.

Наибольшие потери в двигателях наблюдались в цепи якоря. При этом суммарные потери в якорной цепи двигателя постоянного тока больше, чем в обмотке статора СД в 2-3 раз, а потери в обмотке собственно якоря ДПТ и обмотке статора СД близки между собой. Резкое преобладание суммарных потерь в якорной цепи ДПТ следует объяснить наличием компенсационной обмотки и обмотки добавочных полюсов, чего нет в СД.

2.3. Синтез регрессионной модели определения потерь синхронного реактивного двигателя независимого возбуждения

Прямые данные по составляющим потерь в СРДНВ отсутствуют, однако на основании описания конструкции и принципа работы ДПТ и СД (п. 2.1) 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 [40, 48, 127, 171, 174, 180]. Магнитная система и корпус статора конструктивно могут быть

выполнены, как в СД. Результаты анализа конструктивного и функционального соответствия некоторых особенностей рассматриваемых в работе электромеханических преобразователей приведены в табл. 2.1 (см. п. 2.1).

Сходства конструктивного исполнения магнитной системы, а также обмоток статора СРДНВ, якоря ДПТ и статора СД (обмотки распределенного типа, идентичные зубцовые зоны, особенно на большие мощности) позволили заключить, что потери в статоре СРДНВ можно принять близкими потерям в обмотке статора СД и собственно якоря ДПТ. При этом обмотка якоря (статора) СРДНВ имеет многофазное исполнение, что позволяет не надеяться, а утверждать, что потери в ней будут несколько меньше, чем в обмотке статора СД [17, 18].

В отличие от СД и тем более ДПТ, где активно работает только та часть обмотки якоря, которая в данный момент времени находится напротив полюса, а витки обмотки якоря, попадающие в межполюсный промежуток, током якоря обтекаются, но полезной работы не выполняют, в СРДНВ эффективно работает вся обмотка: витки статора, расположенные напротив полюса, создают активный момент, а расположенные напротив межполюсного промежутка – создают поток возбуждения, не требуя для этой цели специальной обмотки возбуждения, как в СД или ДПТ. С позиций экономии электроэнергии это оборачивается исчезновением одной составляющей потерь.

Магнитная система и корпус статора СРДНВ конструктивно могут быть выполнены, как в СД. Рассматриваемые в работе электромеханические преобразователи станов пилигримовой группы имеют тихоходное исполнение, следовательно, скорость вращения ротора и частота перемагничивания магнитопровода в СРДНВ будут близкими существующим прокатным двигателям. Поэтому постоянные потери (магнитные и механические) могут быть приняты на основании количественной оценки этих

составляющих потерь в СД.

Физическая природа добавочных потерь описана в п. 2.1. Эту составляющую при проектировании традиционных электромеханических преобразователей оценивают по имеющимся эмпирическим данным. На основании сравнительного анализа конструкций и функционирования рассматриваемых существующих прокатных двигателей и СРДНВ можно заключить, что добавочные потери также будут близки.

На основании проведенного в п. 2.1 анализа физической природы происхождения составляющих потерь в двигателях постоянного тока и синхронных, а также определенных сходств в конструктивном исполнении ряда узлов и функционировании, общее уравнение потерь в СРДНВ можно представить в алгебраической форме:

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

В табл. 2.10 приведена классификация составляющих потерь в электрических двигателях разного типа.

Таблица 2.10

Разделение по группам составляющих потерь в электрических двигателях

Тип электрического двигателя	Предлагаемые группы составляющих потерь в электрических двигателях						
	1	2	3	4	5	6	7
Двигатель постоянного тока	$\Delta P_{\text{як}}$	$\Delta P_{\text{ко}}$	$\Delta P_{\text{дп}}$	$\Delta P_{\text{ов}}$	$\Delta P_{\text{маг}}$	$\Delta P_{\text{мех}}$	$\Delta P_{\text{доб}}$
Синхронный двигатель	$\Delta P_{\text{ст}}$	-	-	$\Delta P_{\text{ов}}$	$\Delta P_{\text{маг}}$	$\Delta P_{\text{мех}}$	$\Delta P_{\text{доб}}$
Синхронный реактивный двигатель независимого возбуждения	$\Delta P_{\text{ст}}$	-	-	-	$\Delta P_{\text{маг}}$	$\Delta P_{\text{мех}}$	$\Delta P_{\text{доб}}$

$\Delta P_{\text{як}}$ – потери в якорной обмотке; $\Delta P_{\text{ко}}$ – потери в компенсационной обмотке; $\Delta P_{\text{дп}}$ – потери в обмотке дополнительных полюсов; $\Delta P_{\text{ов}}$ – потери в обмотке возбуждения; $\Delta P_{\text{ст}}$ – потери в обмотке статора; $\Delta P_{\text{маг}}$ – магнитные потери; $\Delta P_{\text{мех}}$ – механические потери; $\Delta P_{\text{доб}}$ – добавочные потери.

На основании принятого уравнения суммарных потерь в СРДНВ, проведенной количественной оценки для ДПТ и СД, пользуясь описанной в п. 2.2 методикой [82], математическую модель прогнозирования потерь в синхронном реактивном двигателе независимого возбуждения можно представить в виде уравнения нелинейной регрессии второго порядка:

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

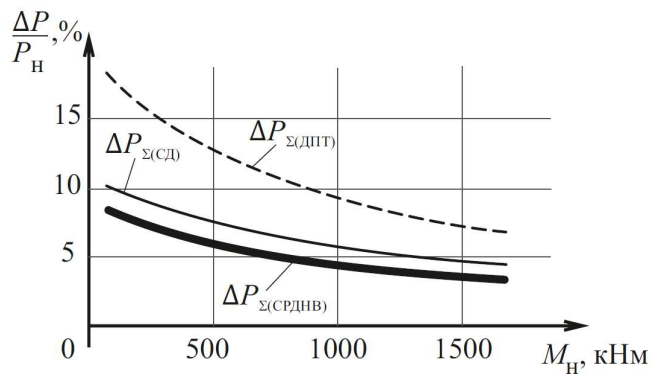


Рис. 2.10. Регрессионная зависимость прогнозирования суммарных потерь от номинального момента в СРДНВ

На основании этого уравнения построена регрессионная зависимость прогнозирования суммарных потерь в синхронных реактивных двигателях независимого возбуждения (см. рис. 2.10).

Статистическая оценка достоверности суммарных потерь в СРДНВ проводилась на основании принятых ранее методик в п. 2.2 с учетом допустимого доверительного интервала. При этом стандартное отклонение $s_d = 0,02$, а доверительный интервал находился в пределах от $-0,1$ до $0,08$.

Полученная в ходе работы математическая модель прогнозирования потерь в СРДНВ, основанная на качественном сравнительном анализе конструкции и функционирования рассматриваемых электромеханических преобразователей и количественной оценке величин составляющих потерь, позволила заключить, что суммарные потери в СРДНВ предполагаются несколько ниже, чем в существующих прокатных двигателях (см. рис. 2.10). Суммарные потери лежат в пределах от 3 до 8 % для принятого диапазона номинальных моментов.

В теории электропривода [69, 70] суммарные потери в электродвигателях чаще представляют в виде суммы постоянных K и переменных V потерь [64]:

$$\Delta P = K + V.$$

При этом к постоянным потерям относят не зависящие от нагрузки: магнитные, механические и добавочные. Переменные потери определяются нагрузкой: потери в обмотках двигателя при протекании по ним токов. С учетом сказанного, потери в СРДНВ будут классифицироваться следующим образом:

$$K = \Delta P_{\text{маг}} + \Delta P_{\text{мех}} + \Delta P_{\text{доб}};$$

$$V = \Delta P_{\text{ст}}.$$

Сопоставление общих потерь и их составляющих в электроприводах пилигримовых станов, характеризующихся очень неравномерным графиком нагрузки, показало, что электроприводы переменного тока с СД имеют существенно меньшие потери, чем электроприводы с ДПТ. Вместе с тем с точки зрения экономии электроэнергии и реализации больших перегрузок по моменту электроприводы с СРДНВ оказываются серьезными конкурентами электроприводам с СД в тяжело нагруженных агрегатах.

Предложен новый подход к анализу составляющих потерь существующих прокатных двигателей, позволяющий обоснованно прогнозировать особенности энергетических характеристик нового типа двигателя СРДНВ.

Предложена математическая модель прогнозирования потерь в СРДНВ в виде уравнения регрессии второго порядка. При этом среднеквадратичное отклонение истинных значений от регрессионных зависимостей не превышало

0,02, расчетное значение квантиля Стьюдента 1,58 не превышало критического 1,66 с вероятностью 0,95, доверительный интервал лежал в пределах от -0,1 и до 0,08.

С использованием метода наименьших квадратов получены в функции величины номинального момента двигателя обобщенные (усредненные) зависимости общей величины суммарных потерь в СРДНВ.

Выводы

С использованием методов математической статистики предложен и обоснован алгоритм прогнозирования составляющих потерь в СРДНВ. Он включает в себя следующие этапы.

1. Чтобы решить задачу определения суммарных потерь и их составляющих в электроприводах прокатных станов с синхронным реактивным двигателем независимого возбуждения, была предложена математическая модель. Показано, что эту модель целесообразно иметь в виде уравнения математической регрессии. Коэффициенты регрессии вычислялись на основании составляющих потерь, которые содержатся в подробных технических данных на двигатели (клиентских формулярах) заводоизготовителей. Это позволило при синтезе модели максимально учесть особенности конструирования, изготовления и эксплуатации существующих прокатных двигателей.

2. С использованием метода наименьших квадратов получены в функции величины номинального момента двигателя обобщенные зависимости величины суммарных потерь и их составляющих в электродвигателях разного типа, что позволило обоснованно выделить главные составляющие потерь и тем самым указать наиболее эффективные пути снижения общих потерь. При этом среднеквадратичные отклонения истинных значений от регрессионных зависимостей не превышали $s_{d\text{макс}} = 1,01$, расчетное значение квантиля Стьюдента не превышало

критического $t_{\text{КРИТ}} = 1,66$ с вероятностью 0,95.

3. Предложенная методика выделения главных составляющих потерь в ДПТ и СД позволяет обоснованно прогнозировать особенности энергетических характеристик нового типа двигателя – СРДНВ. При этом численные значения составляющих потерь в СРДНВ целесообразно прогнозировать в два этапа: сначала ориентироваться на составляющие потерь существующих двигателей (ДПТ, СД) с учетом близости конструкции и технологии изготовления их узлов, а затем уточнять результаты прогноза, используя методы математической статистики.

ГЛАВА 3. СИНТЕЗ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПРОКАТНОГО СТАНА с ПОЗИЦИЙ ОЦЕНКИ ВЕЛИЧИНЫ ПОТЕРЬ

В этой главе обсуждается **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 [35, 37, 51, 73, 105, 121, 164].

Отсутствие реальных методик проектирования и практических рекомендаций при разработке новых типов электромеханических преобразователей обуславливает необходимость учета распределенного характера параметров системы [53, 109, 110]. 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.

В настоящей главе анализируется математическая модель электропривода с СРДНВ с позиций энергосбережения. Перечень основных

коэффициентов и их величин, используемых для определения составляющих потерь, уточнялись с учетом результатов, изложенных в предыдущей главе.

Имеющиеся математические модели электропривода с СРДНВ описывают и уточняют или принцип работы двигателя с учетом особенностей магнитных полей в электрической машине [171-174], или особенности регулирования показателей электропривода с СРДНВ, в частности, когда от него требуется повышенное быстродействие [8, 43].

С учетом сказанного в данной главе решаются следующие задачи:

- описать математические модели существующих электроприводов постоянного тока и синхронных, которые являются типовыми решениями для станов рассматриваемой группы, чтобы их можно было взять за эталонные при последующей оценке экономической эффективности;

- разработать математическую модель оценки показателей энергоэффективности электропривода с СРДНВ и обосновать ее корректность;

- разработать программу расчета суммарных потерь и их составляющих в СРДНВ на основании алгоритма прогнозирования потерь в электроприводе.

Станы пилиgrimовой группы принципиально отличаются между собой по назначению и картине распределения усилий в зоне прокатки (обжатия), тем не менее это – станы, имеющие ряд схожих принципиальных особенностей: непрерывный нереверсивный режим работы с резко выраженной неравномерностью момента статической нагрузки (режим S6), близкие значения скорости прокатки и мощности приводных двигателей (см. пп. 1.1 и 1.2). Поэтому синтез математической модели был выполнен для электропривода только одного из станов пилиgrimовой группы – стана холодной прокатки труб ХПТ-450.

3.1. Математические модели электроприводов стана холодной прокатки труб ХПТ-450

Разрабатываемые в работе математические модели содержат следующие узлы: механическую часть системы (кривошипно-шатунный механизм, редуктор, шестеренная клеть); электромеханические преобразователи (двигатель постоянного тока, синхронный двигатель, СРДНВ); полупроводниковые преобразователи (тиристорный преобразователь постоянного тока, преобразователь частоты, многофазный полупроводниковый преобразователь), узел вычисления составляющих потерь.

Подробное описание приведено ниже.

Математическая модель механической части стана холодной прокатки труб ХПТ-450

Математическое описание механизмов и технология прокатки на станах пилигримовой группы достаточно глубоко изложены в [1, 2, 14, 15, 49, 78, 79, 158, 159]. По этой причине в настоящей работе используются готовые модели механической части, описанные в [158, 159]. В общем виде (см. рис. 3.1 а) они состоят из двух основных блоков: механического преобразователя (кривошипно-шатунного механизма, редуктора, шестеренной клетки) и блока формирования нагрузочных диаграмм (БФНД).

Момент статической нагрузки определялся следующим образом:

$$M_c = q \cdot \gamma \cdot r_{кр} \frac{M_{\Sigma пр(об)}}{\rho_{ш} \cdot \eta_{кпд}};$$
$$M_{\Sigma пр} = P_{ср} \cdot \rho_B \left(n_Q + \eta_3 \sqrt{\frac{1,4 \cdot \Delta t_{ср}}{\rho_B}} \right);$$
$$M_{\Sigma об} = 0,85 P_{ср} \cdot \rho_B \left(\eta_3 \sqrt{\frac{0,6 \cdot \Delta t_{ср}}{\rho_B}} - n_Q \right),$$

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.

Математическая модель механической части стана холодной прокатки труб ХПТ-450 показана на рис. 3.1. Она представлена в виде двух основных блоков: кривошипно-шатунный механизм (I) и блок формирования нагрузочных диаграмм (II). Блок I описывает процессы в КШМ, учитывая переменное передаточное число. Блок II на основании исходных данных маршрута прокатки трубы формирует нагрузочную диаграмму электропривода, а также обеспечивает согласование моментов с углом поворота прокатного инструмента.

Здесь $k_1 \dots k_4$ – коэффициенты, зависящие от параметров КШМ; $\alpha_m, \Delta\alpha_m, \alpha_{обр}, M_{пр.х.}, M_{обр.х.}$ – параметры, которые определяют амплитуду и углы приложения моментов нагрузки.

Исходные данные (величины моментов прокатки и холостого хода, длительность рабочего и холостого хода, время цикла) для формирования нагрузочных диаграмм стана холодной прокатки труб ХПТ-450 были получены от представителей электротехнических служб ПАО «Челябинский трубопрокатный завод».

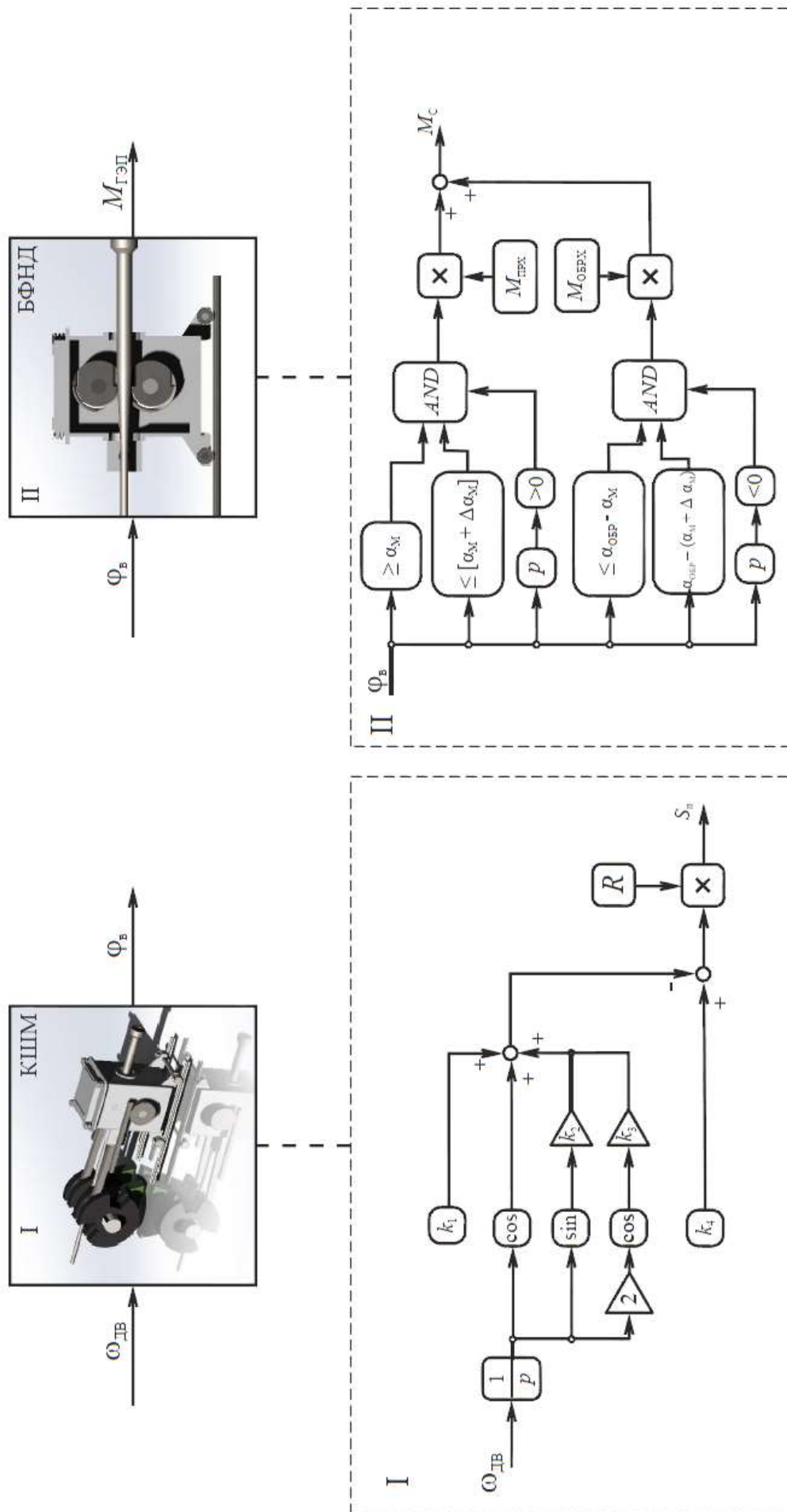


Рис. 3.1. Математическая модель механической части стана холодной прокатки труб ХПТ-450

Математическая модель электропривода постоянного тока на примере стана холодной прокатки труб ХПТ-450

На рис. 3.2 приведена упрощенная функциональная схема подчиненного регулирования на базе электродвигателя постоянного тока. Этот вариант системы управления принят в качестве базисного (исходного), так как представляет собой типовую схему регулируемого привода постоянного тока, которая широко известна и в данный момент реализована на станах рассматриваемой в работе группы. Электроприводы постоянного тока на сегодняшний день достаточно хорошо изучены и подробно описаны в ряде работ [16, 94, 103, 121, 122, 140, 163].

Силовые цепи преобразователя, для наглядности, изображаются однолинейно. Вентильные группы выполнены по встречно параллельной схеме подключения. Широкое применение в электроприводах постоянного тока, в настоящее время, нашли реверсивные тиристорные преобразователи с раздельным управлением выпрямительных групп. В этом случае импульсы, отпирающие тиристоры, подаются на управляющие входы только той из групп, по которой протекает ток якоря. Другая вентильная группа при этом полностью закрыта. Для применения раздельного управления требуется высококачественная настройка работы системы импульсно-фазового управления каждой из групп, так как достаточно трудно согласовать их характеристики вблизи зоны переключения групп и высокого быстродействия датчиков тока вентильных групп.

Для согласования номинальных значений напряжений двигателя и преобразователя необходимо использовать трансформатор. Это позволяет получить при минимальном угле управления тиристорными группами преобразователя наибольшее якорное напряжение двигателя, при этом электропривод имеет максимальный коэффициент мощности.

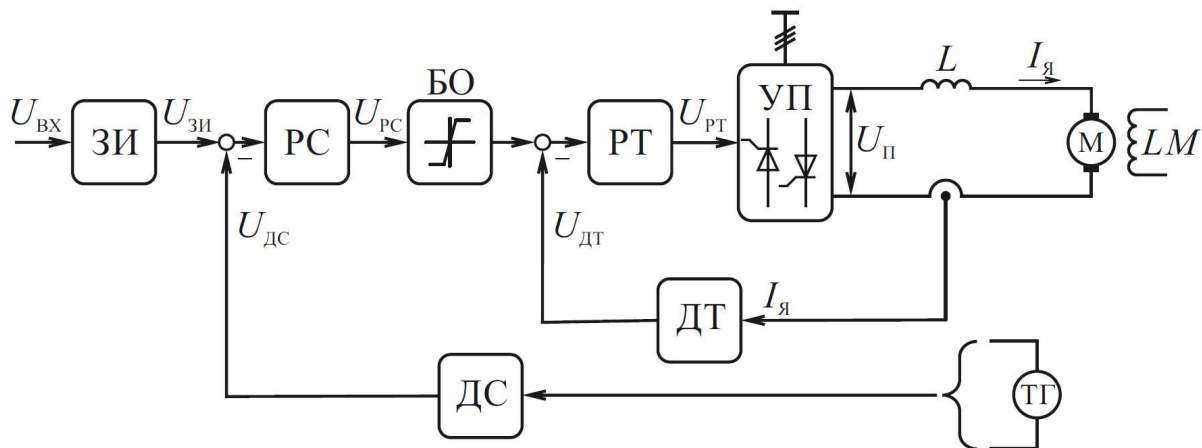


Рис. 3.2. Функциональная схема подчиненного регулирования на базе электродвигателя постоянного тока

Скорость нарастания тока, протекающего в вентильях, ограничивается индуктивностью рассеяния в фазных цепях трансформатора, так как в аварийных режимах значение тока может превысить допустимую величину. Значение напряжения короткого замыкания трансформатора характеризует величину индуктивности рассеяния. Преобразователи для электроприводов средних и больших мощностей зачастую подключены к сети с напряжением 6 или 10 кВ. Трансформатор позволяет потенциально разделить якорные цепи двигателя и высоковольтные цепи питания, а также снизить уровень помех.

Для улучшения условий коммутации якорного тока двигателя и сглаживания пульсаций используют дроссель. Уменьшение пульсаций тока якоря снижает вибрации и шум в машине и благоприятно сказывается на нагреве.

Система управления электропривода выполнена по подчиненной структуре и состоит из двух контуров регулирования: внешний контур регулирования скорости двигателя КРС и внутренний контур регулирования тока якоря КРТ.

Структура системы управления выполнена с отрицательной обратной связью по току якоря двигателя. Датчик тока ДТ и шунт позволяют проводить измерение тока. С помощью регулятора тока РТ осуществляют

настройку контура регулирования тока якоря. Схема названа одноканальной, так как на напряжение обеих групп тиристорного преобразователя воздействует один регулятор. Регуляторы тока, применяемые в большинстве промышленных схем, имеют пропорционально-интегральное исполнение.

Быстродействие контура регулирования тока возможно увеличить благодаря применению пропорционального канала, что упрощает последующий процесс настройки внешнего контура регулирования скорости и ограничивает в переходных процессах скачки тока якоря, превышающие допустимые значения при резких перегрузках привода.

Регулятором скорости РС настраивается внешний контур регулирования скорости. Датчиком скорости ДС, подключенным через потенциометр к якорю тахогенератора, измеряется скорость вращения двигателя.

В цепи обратной связи регулятора РС имеется блок ограничения БО, позволяющий получить зону насыщения статической характеристики регулятора скорости, которая ограничивает допустимую величину тока якоря. Для удобства и безопасности настройки электропривода уставка блока ограничения БО выполняется регулируемой.

Математическая модель системы «Электропривод – прокатная клеть» на базе электродвигателя постоянного тока, реализованная в программном пакете *Matlab Simulink*, представляет собой типовую схему подчиненного регулирования и показана на рис. 3.3.

Модель содержит трёхфазный источник питания, двигатель постоянного тока, регуляторы скорости и тока пропорционально-интегрального типа, датчики скорости и тока, узел вычисления составляющих потерь, механическую часть прокатного стана, выпрямление и регулирование выходного напряжения осуществляется трёхфазным тиристорным мостом, управление тиристорным преобразователем осуществляется блоком СИФУ.

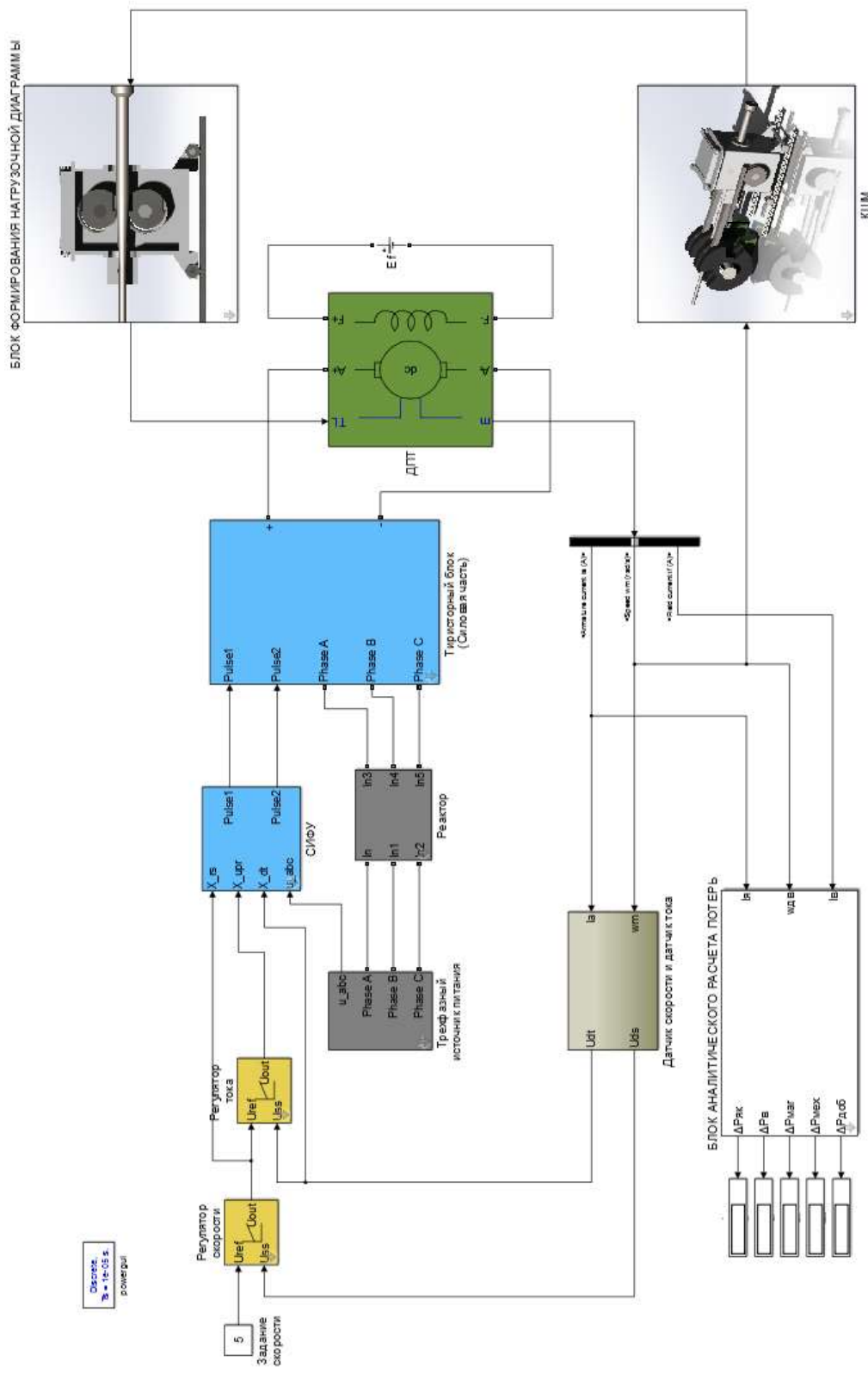


Рис. 3.3. Математическая модель «Электропривод – прокатная клеть» на базе электродвигателя постоянного тока в программном пакете

Matlab Simulink

Тиристорный мост представляет трёхфазную мостовую схему включения тиристоров. Данная схема стандартного исполнения и была использована при моделировании [121].

Блок аналитического расчета потерь реализован на основании уравнений, приведенных в [74, 155]:

$$\Delta P_{\text{ДПТ}} = \Delta P_{\text{як}} + \Delta P_{\text{ко}} + \Delta P_{\text{дп}} + \Delta P_{\text{ов}} + \Delta P_{\text{маг}} + \Delta P_{\text{мех}} + \Delta P_{\text{доб}};$$

$$\Delta P_{\text{яц}} = I_{\text{я}}^2 \cdot r_{\text{яц}};$$

$$\Delta P_{\text{ов}} = I_{\text{в}}^2 \cdot r_{\text{в}};$$

$$\Delta P_{\text{маг}} = 2,3 \rho_{\frac{1,0}{50}} \left(\frac{f}{50} \right)^{\beta} \cdot (B_z^2 m_z + B_j^2 m_j);$$

$$\Delta P_{\text{мех}} = \Delta P_{\text{тщ}} + \Delta P_{\text{вент}} + \Delta P_{\text{тп}};$$

$$\Delta P_{\text{тщ}} = 7,5 \sum S_{\text{щ}} v_{\text{к}};$$

$$\Delta P_{\text{доб}} = k_{\text{доб}} \cdot \Delta P_{\text{н}}.$$

Где $\Delta P_{\text{ДПТ}}$ – суммарные потери двигателя постоянного тока; $\Delta P_{\text{яц}}$ – электрические потери в якорной цепи; $\Delta P_{\text{ов}}$ – электрические потери в обмотке возбуждения; $\Delta P_{\text{маг}}$ – магнитные потери; $\Delta P_{\text{мех}}$ – суммарные механические потери; $\Delta P_{\text{доб}}$ – добавочные потери; $\Delta P_{\text{тщ}}$ – потери на трение щеток о коллектор; $\Delta P_{\text{вент}} + \Delta P_{\text{тп}}$ – потери на вентиляцию и трение в подшипниках; $S_{\text{щ}}$ – суммарная площадь контакта всех щеток; $v_{\text{к}}$ – окружная скорость коллектора; $k_{\text{доб}}$ – коэффициент добавочных потерь; $\Delta P_{\text{н}}$ – суммарные потери в номинальном режиме.

Математическая модель синхронного электропривода на примере стана холодной прокатки труб ХПТ-450

На рис. 3.4 приведена упрощенная функциональная схема подчиненного регулирования на базе синхронного электродвигателя.

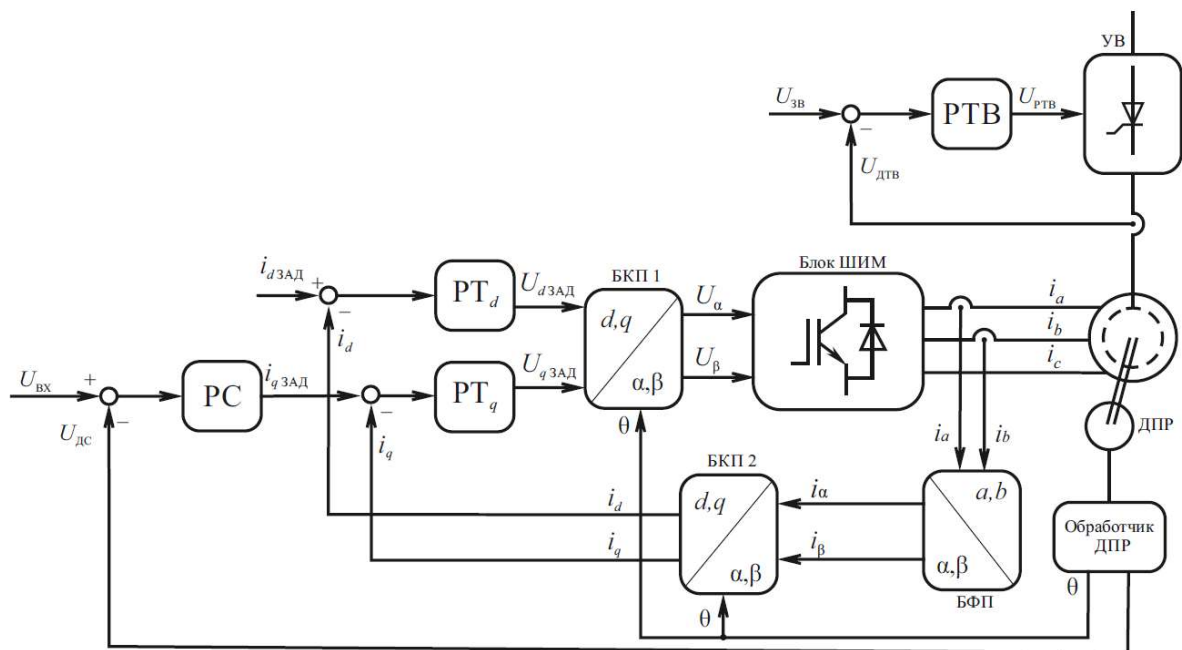


Рис. 3.4. Функциональная схема подчиненного регулирования на базе синхронного электродвигателя

Векторное управление реализуется на основании информации о текущем положении ротора. С этой целью устанавливают датчик положения на вал ротора. Измерение токов в координатах α и β осуществляется с помощью датчиков токов фаз. Элементы регулирования в системе векторного управления на сегодняшний день реализуется в виде программы на микроконтроллере. Поддержание тока обеспечивается микроконтроллером, для этого используется программный пропорционально-интегральный регулятор тока и преобразователь на основе широтно-импульсной модуляции (ШИМ).

Также на функциональной схеме присутствуют еще два блока – БКП1 и БКП2: блоки координатных преобразований. Их предназначение заключается в повороте вектора на входе на заданный угол: БКП1 осуществляет поворот на $+\theta$, а БКП2 – на $-\theta$. В англоязычной литературе такие преобразования называются преобразованиями Парка [67]. БКП2 осуществляет преобразование координат для токов: от неподвижных осей α и β , привязанных к статору двигателя, к вращающимся осям d и q , привязанным к

ротору двигателя (используя для этого угол положения ротора Θ); БКП1 – обратное преобразование, от задания напряжения по осям d и q делает переход к осям α и β . Уравнения, которые описывают подобные преобразования подробно описаны в [34, 67, 160]. Реализуемый в схеме векторного управления подход обеспечивает работу регуляторов в статическом режиме.

Для регулирования скорости электропривода в схеме присутствует еще один ПИ-регулятор – регулятор скорости (РС). На вход подано задание скорости, а на выходе получаем задание на контур момента. Так как ток оси q пропорционален моменту, то для упрощения выход регулятора скорости подан сразу на вход регулятора тока оси q . Задатчик интенсивности, плавно изменяет $U_{ВХ}$, чтобы двигатель разогнался с нужным темпом. Текущая частота вращения ω взята с датчика положения ротора.

Математическая модель системы «Электропривод – прокатная клеть» на базе синхронного двигателя, реализованная в программном пакете *Matlab Simulink*, представляет собой типовую схему векторного регулирования и подробно описана, например, в [26, 117, 118, 121, 156]. Данная схема стандартного исполнения и использована при моделировании. Блок аналитического расчета потерь реализован на основании уравнений, приведенных в [74, 155]:

$$\Delta P_{СД} = \Delta P_{ст} + \Delta P_{ов} + \Delta P_{маг} + \Delta P_{мех} + \Delta P_{доб};$$

$$\Delta P_{ст} = m \cdot I_{\phi}^2 \cdot r_1;$$

$$\Delta P_{ов} = I_{в}^2 \cdot r_{в};$$

$$\Delta P_{маг} = \Delta P_{маг_ст} + \Delta P_{маг_з};$$

$$\Delta P_{маг_ст} = k_{ст} \cdot \rho_{\frac{1,0}{50}} \left(\frac{f}{50} \right)^{1,3} \cdot B_{ст}^2 m_{ст};$$

$$\Delta P_{маг_з} = k_{з} \cdot \rho_{\frac{1,0}{50}} \left(\frac{f}{50} \right)^{1,3} \cdot B_{з}^2 m_{з};$$

$$\Delta P_{\text{мех}} = 3,68 \cdot p \cdot \left(\frac{V_p}{40}\right) \sqrt{I_1};$$

$$\Delta P_{\text{доб}} = k_{\text{доб}} \cdot \Delta P_{\text{н}}.$$

Где $\Delta P_{\text{СД}}$ – суммарные потери синхронного двигателя; $\Delta P_{\text{ст}}$ – электрические потери в статоре; $\Delta P_{\text{ов}}$ – электрические потери в обмотке возбуждения; $\Delta P_{\text{маг}}$ – магнитные потери; $\Delta P_{\text{мех}}$ – суммарные механические потери; $\Delta P_{\text{доб}}$ – добавочные потери; V_p – окружная скорость ротора; $k_{\text{доб}}$ – коэффициент добавочных потерь; $\Delta P_{\text{н}}$ – суммарные потери в номинальном режиме.

Математическая модель синхронного реактивного электропривода независимого возбуждения на примере стана холодной прокатки труб ХПТ-450

На рис. 3.5 приведена упрощенная функциональная схема на базе синхронного реактивного электродвигателя независимого возбуждения с пропорциональным управлением потоком и током якоря.

Для более полного описания работы приведенной схемы управления полезно обратить внимание на принцип работы СРДНВ. В рассматриваемом электромеханическом преобразователе роль обмотки возбуждения выполняет обмотка, размещенная в пазах статора. Если по обмоткам 1 – 1' и 2 – 2' (рис. 3.6 (а)) пропустить ток, то он создаст поток по продольной магнитной оси машины. Если теперь по обмоткам 3 – 3', 4 – 4', 5 – 5' и 6 – 6', расположенным над полюсами ротора, пропустить ток, то создается электромагнитный момент.

В описываемом реактивном (с явно выраженными полюсами) двигателе при вращении ротора каждая обмотка (пара диаметрально расположенных проводников) работает попеременно или как обмотка возбуждения, или как обмотка якоря (создает вращающий момент).

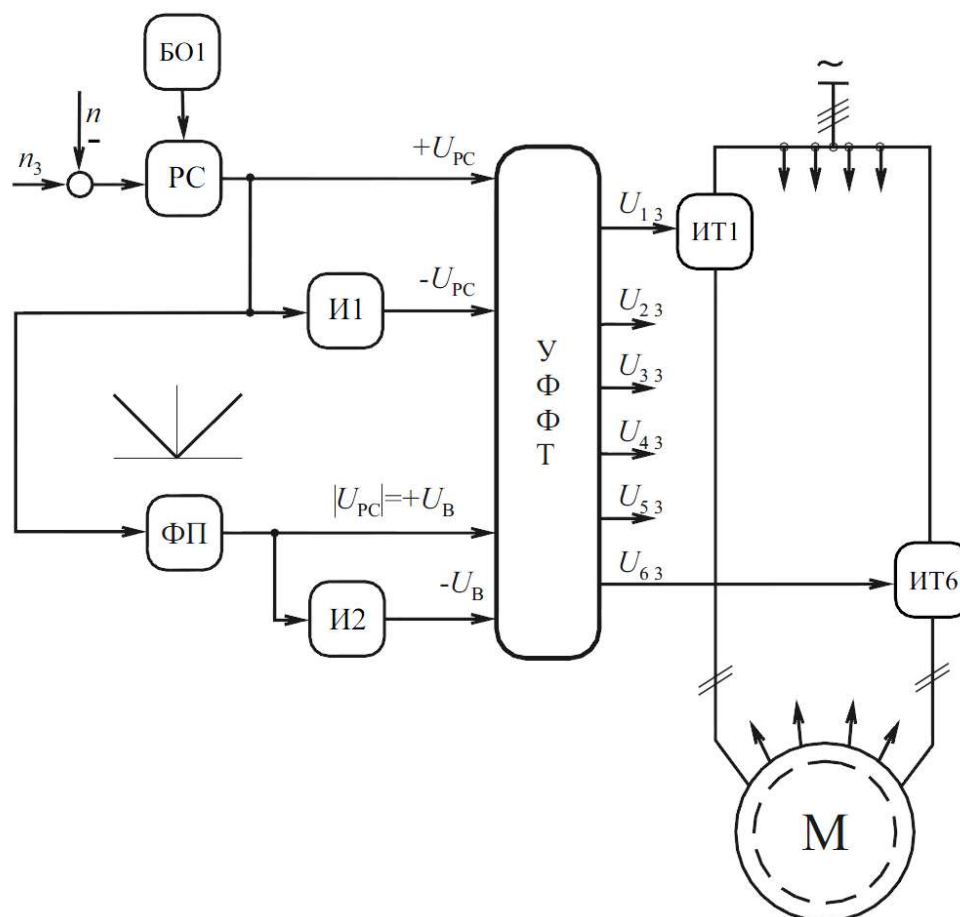
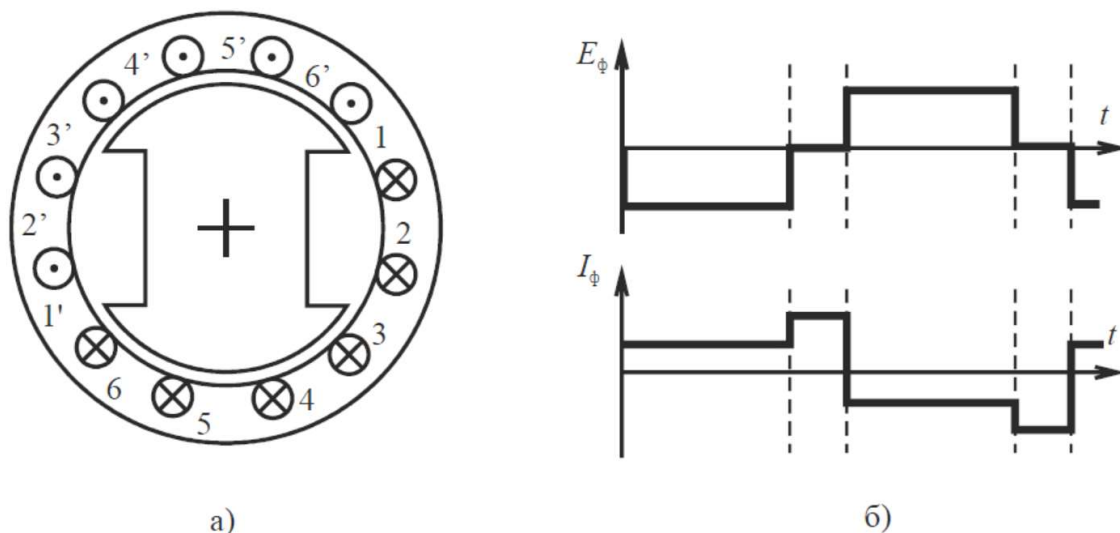


Рис. 3.5. Функциональная схема «Электропривод – прокатная клеть» на базе синхронного реактивного электродвигателя независимого возбуждения

Токи в обмотках возбуждения, расположенных над межполюсными промежутками ротора, и токи в якорных обмотках, расположенных над полюсами ротора, могут регулироваться независимо и переключаться в функции положения ротора. По этим обмоткам нет необходимости пропускать синусоидальный ток. Более эффективной оказывается прямоугольная форма тока, как в секциях обмотки двигателя постоянного тока. На рис. 3.6 (б) изображены упрощенные диаграммы тока и ЭДС одной фазы такого двигателя. Электроприводы с синхронными реактивными двигателями (FRRM) требуют датчиков положения ротора, но схемы управления отличаются крайней простотой реализации.



а) б)
 Рис. 3.6. Сечение СРДНВ (а) и идеальные диаграммы
 тока и ЭДС фазы статора (б)

Статорные обмотки питаются от шести независимых источников тока, которые могут быть выполнены на транзисторных или тиристорных преобразователях. Задание на ток якорных обмоток (напряжения $+U_{PC}$ и $-U_{PC}$) подается с выходов регулятора скорости РС и инвертора И1 через узел формирования фазных токов УФФТ. Желаемое значение скорости n_3 вращения электропривода поддерживается с помощью контура регулирования скорости, который настраивается на заданные показатели качества регулятором скорости РС. Допустимое значение тока фазных обмоток двигателя (и электромагнитного момента) ограничивается максимальным напряжением на выходе РС, которое устанавливается блоком ограничения БО, как в обычной схеме подчиненного регулирования.

УФФТ управляет токами источников тока в цепях фазных обмоток в функции угла поворота вала ротора α_r так, чтобы были реализованы диаграммы токов (рис. 3.6 (б)). Датчик положения ротора позволяет в функции положения переключать четыре управляющих сигнала ($+U_B$ и $-U_B$, $+U_{PC}$ и $-U_{PC}$), подавая их в заданной последовательности на управляющие входы источников тока в цепях обмоток статора.

В электроприводах с ударным характером момента нагрузки возможно включение синхронного реактивного двигателя по схеме двигателя с последовательным возбуждением (рис. 3.5). В этом случае ток возбуждения изменяется пропорционально абсолютной величине напряжения U_{PC} , для чего применен функциональный преобразователь ФП, напряжение на выходе которого пропорционально модулю U_{PC} . Тем самым достигается два эффекта. В зоне малых моментов нагрузки достигается снижение потерь в электроприводе за счет снижения тока возбуждения. В зоне же перегрузок ослаблено размагничивающее влияние реакции якоря, а двигатель способен выдерживать кратковременные перегрузки по моменту.

Отсутствие реальных методик проектирования и практических рекомендаций при разработке новых типов электромеханических преобразователей обуславливает необходимость учета распределенного характера параметров системы [109]. Существующие математические модели электропривода с СРДНВ не позволяют оценить возможности электротехнического комплекса с позиции энергосбережения. Данное обстоятельство приводит к тому, что в рамках работы необходимо ставить задачу синтеза математической модели электропривода с СРДНВ, которая позволит производить расчет потерь как в статических, так и в динамических режимах работы электропривода. Математическая модель электропривода с СРДНВ приведена на рис. 3.7.

Работая с электромеханическим преобразователем нетипового исполнения стоит учитывать характер распределения линий магнитной индукции как в зоне перегрузок, так и при номинальных значениях нагрузки. Чтобы это учесть магнитопровод электрического двигателя разбивается на элементы. Каждый участок рассматривается отдельно и для него записывается система дифференциальных уравнений на основании уравнений Максвелла. Используя метод конечных разностей и метод конечных элементов (МКЭ) можно выполнить расчет системы дифференциальных уравнений с

распределенными параметрами [53, 83, 116].

В настоящее время, производить расчеты электромагнитной системы используя метод конечных элементов могут множество программных продуктов (FEMLAB, ANSYS, ELCUT и др.). Разработчику математической модели нужно лишь задать геометрию электрического двигателя, выбрать и установить граничные условия, определить вид и количество конечных элементов, так как данные программные продукты имеют готовые алгоритмы расчета. Если пользователю необходимо рассчитать переменные значения (токи, напряжения, момент), которые зависят от совокупности управляющих воздействий и параметров электромеханического преобразователя, задача усложняется. При выборе программного продукта для синтеза математической модели учитывались: наличие модуля расчета электромагнитного момента методом тензора напряжений Максвелла, возможность корректной оценки суммарных потерь и их составляющих как стандартными средствами самой программы, так и по алгоритмам пользователя.

Математическая модель системы «Электропривод – прокатная клеть» на базе СРДНВ, реализованная в программном пакете *Ansys Simplorer/Maxwell* приведена на рис. 3.7. Математическая модель «Электропривод – прокатная клеть» на базе СРДНВ содержит следующие блоки: РС – регулятор скорости; ДС – датчик скорости; ХПТ-450 – модель механической части прокатного стана ХПТ-450; БП – блок преобразования угла поворота вала двигателя; ДП – датчик положения; УФФТ – узел формирования фазных токов; РТ1...РТ6 – регуляторы токов фаз; а также модель магнитной системы электромеханического преобразователя и узел определения составляющих потерь. Узел определения составляющих потерь реализован в модели в виде программного кода на языке программирования *APDL*, на который получены свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ №2017613431, №2015662880, №2013619100.

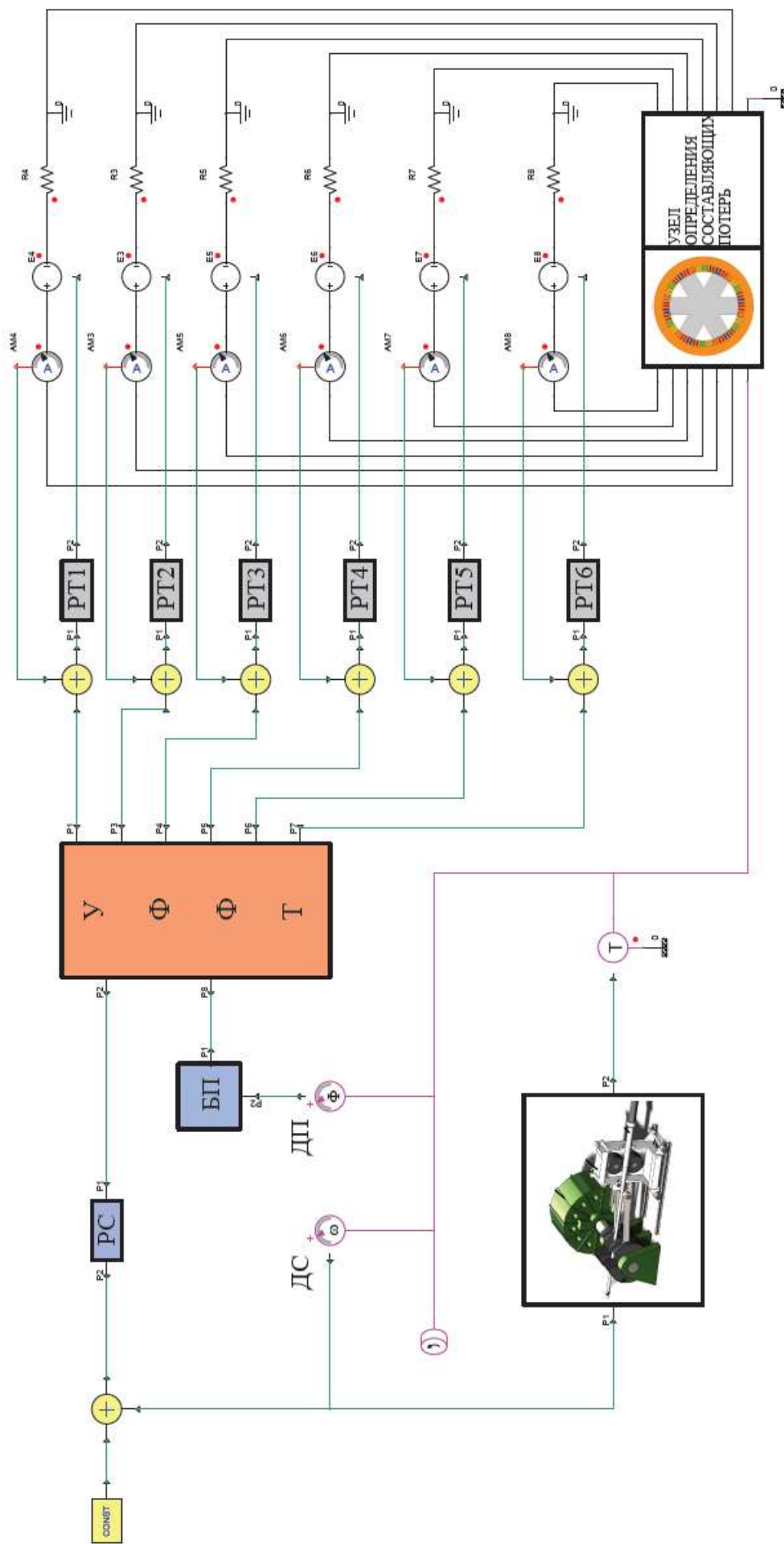


Рис. 3.7. Математическая модель «Электропривод – прокатная клеть» на базе синхронного реактивного электродвигателя независимого возбуждения в программном пакете *Ansys Simpler/Maxwell*

3.2. Оценка адекватности математической модели электропривода стана холодной прокатки труб ХПТ-450

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 на основании выборки из 30 экспериментальных осциллограмм тока якоря главного электропривода, полученных на действующем объекте, была построена регрессионная зависимость, описывающая переходный процесс тока на участке прокатки. Затем результаты математического моделирования сопоставлялись с экспериментальными данными, представленными в виде регрессионной модели. Результаты приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Оценка корректности математической модели электропривода стана холодной прокатки труб ХПТ-450

Параметр	$I_{\text{эксп}}, \text{о.е.}$	$I_{\text{расч}}, \text{о.е.}$	ΔI	ΔI^2
Номер осциллограммы				
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
$s_d = \sqrt{\frac{\sum d^2 - \frac{(\sum d)^2}{n}}{n-1}}$	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; $\Delta I, \Delta I^2$ – 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.

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.

Выводы

1. На основании предложенной автором математической модели разработана программа расчета суммарных потерь и их составляющих в СРДНВ в конечно-элементном продукте *Ansys Maxwell*. Получены свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ №2017613431, №2015662880, №2013619100.

2. Впервые поставлена задача определения отдельных составляющих потерь в СРДНВ, для решения которой разработана математическая модель оценки показателей энергоэффективности электропривода 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. При этом среднеквадратичное отклонение истинных значений от регрессионных зависимостей не превышало 0,03, расчетное значение квантиля Стьюдента ($t = 1,5$) не превышало критического ($t_{\text{крит}} = 2,04$) с вероятностью 0,95.

ГЛАВА 4. КОМПЛЕКСНОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ЭКОНОМИИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРОПРИВОДАХ ПИЛИГРИМОВЫХ СТАНОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

В этой главе обсуждается **четвертое научное положение**.

В предыдущих главах была рассмотрена кинематика станов пилигримовой группы, предложена и обоснована обобщенная нагрузочная диаграмма, проведен подробный обзор литературы по техническим решениям в области энергосбережения, получены количественные оценки составляющих потерь в прокатных двигателях, предложена и проверена математическая модель электропривода с синхронным реактивным двигателем независимого возбуждения как инструмент для количественных расчетов энергетических характеристик электропривода. Это позволяет перейти к главной задаче всей работы – к выявлению наилучших решений по выбору типа электропривода (электропривод постоянного тока, синхронный электропривод, электропривод с синхронным реактивным двигателем независимого возбуждения) и законов управления, способствующих наибольшей экономии электроэнергии.

При расчете энергетической эффективности электроприводов пилигримовых станов решались следующие задачи:

– определялись за каждый цикл $T_{ц}$ суммарные потери электроэнергии для разного типа электроприводов (электроприводы постоянного тока, синхронные электроприводы, электроприводы с синхронными реактивными двигателями независимого возбуждения);

– сопоставлялись по критерию энергетической эффективности возможные структуры системы управления: схема подчиненного регулирования, электропривод с двухзонным регулированием скорости, схема

с пропорциональным управлением потоком и током якоря;

– оценивался экономический эффект реализации рассматриваемых решений.

В данной главе приведены расчеты для стана холодной прокатки труб ХПТ-450. Для других станов пилигримовой группы приведены только результаты оценки экономии электроэнергии в электроприводах разного типа (электропривод постоянного тока, синхронный электропривод, электропривод с синхронным реактивным двигателем независимого возбуждения).

Для трубопрокатных агрегатов пилигримовой группы характерна существенная неравномерность момента нагрузки, моделирование проводилось на основании единой нагрузочной диаграммы (см. п. 1.2), что позволило сопоставить энергоэффективность электроприводов разного типа (электропривод постоянного тока, синхронный электропривод, электропривод с синхронным реактивным двигателем независимого возбуждения).

4.1. Потери в электроприводе с прокатными двигателями постоянного тока

Электроприводы с прокатными двигателями постоянного тока работают давно и показали себя с хорошей стороны. На сегодняшний день физически не устарели и независимо от того, какой тип привода мы считаем наилучшим, речи о замене этих приводов идти не может в силу экономической нецелесообразности. Своего физического ресурса электроприводы с двигателями постоянного тока не отработали и, хотя морально и экономически себя окупали, средств на капитальную модернизацию сегодня нет.

На примере электропривода постоянного тока наиболее выразительно можно показать целесообразность тех или иных способов управления электроприводом, чтобы потом экстраполировать эти решения на другие более сложные, но экономически более целесообразные электроприводы, например, переменного тока. По этой причине электропривод постоянного

тока в работе рассматривался как эталон, который сегодня успешно реализован, многократно проверен и может быть рекомендован как базовый вариант для сравнения с наиболее прогрессивными современными решениями.

С учетом сказанного анализировались энергосберегающие режимы в электроприводе постоянного тока на примере стана ХПТ-450. Основные параметры стана, паспортные данные электрической машины приведены в главе 1 (п. 1.2), функциональная схема электропривода в главе 3 (п. 3.1).

4.1.1. Потери электроэнергии в типовом электроприводе с подчиненным регулированием

В данное время стан ХПТ-450 работает на электроприводе постоянного тока, реализованном по схеме подчиненного регулирования скорости. Суммарные потери электроэнергии и их составляющие определялись с использованием разработанной в главе 3 математической модели (см. п. 3.1). Расчет проводился с использованием весовых коэффициентов составляющих потерь, полученных при выполнении регрессионного анализа (см. п. 2.2 в главе 2). В табл. 4.1 приведены численные значения параметров нагрузочных диаграмм различных маршрутов прокатки для рассматриваемых типов станов, полученные от представителей электротехнических служб ПАО «ЧТПЗ» и используемые нами при количественной оценке экономии электроэнергии.

Таблица 4.1

Параметры нагрузочных диаграмм станов пилигримовой группы

Тип стана	Параметр нагрузочной диаграммы и численное значение				
	$T_{ц}$	$T_{пр}$	T_{xx}	M_{\max}	M_{xx}
Прошивной	300	60	240	530,7	32,4
Пильгерстан	2,8	1,1	1,7	1007,5	59
ХПТ-450	2	0,7	1,3	443	66,5

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, кНм.

Для трубопрокатных агрегатов пилигримовой группы характерна существенная неравномерность момента нагрузки (см. п. 1.2). Полезно обратить внимание на численные значения параметров нагрузочных диаграмм рассматриваемых станов. Пилгерстан и ХПТ-450 имеют достаточно близкие значения времени рабочих циклов и времени холостого хода – в пределах, не превышающих несколько секунд. Времена прокатки и паузы на прошивном стане значительно больше – сотни секунд ($T_{пр} = 60$ с, $T_{хх} = 240$ с).

На основании технических данных двигателей [3] и с использованием методики, изложенной в [134], была построена зависимость относительных суммарных потерь в электроприводах разного типа (электропривод постоянного тока, синхронный электропривод, электропривод с синхронным реактивным двигателем независимого возбуждения) при постоянном потоке возбуждения от момента статической нагрузки (см. рис. 4.1).

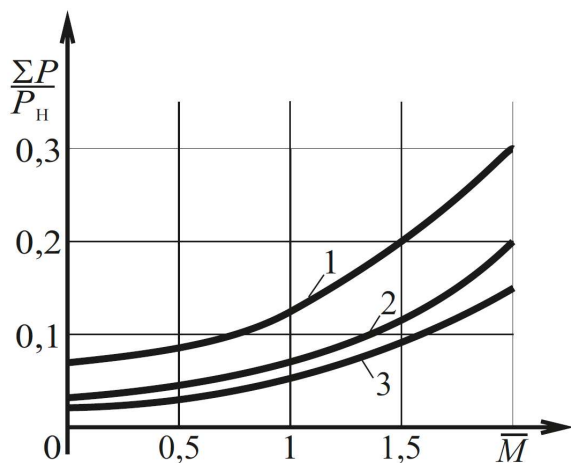


Рис. 4.1. Относительная величина потерь в зависимости от момента нагрузки при постоянном потоке возбуждения в двигателях постоянного тока (1), в синхронных двигателях (2), в СРДНВ (3)

Полученные зависимости имеют квадратичный характер изменения величины относительных потерь от момента. Это обусловлено таким же характером изменения переменных электрических потерь в электродвигателях (потери в якорной цепи двигателя постоянного тока, потери в цепи статора синхронного и синхронного

реактивного двигателя независимого возбуждения). Зависимости показывают, что наименьшая усредненная относительная величина потерь в рассматриваемом диапазоне изменения момента статической нагрузки (от 0 до $2M_n$) получена для электропривода с синхронным реактивным двигателем независимого возбуждения. Данное обстоятельство обусловлено прежде всего конструктивными особенностями в рассматриваемых типах электроприводов, например, отсутствие в синхронном реактивном двигателе независимого возбуждения обмоток возбуждения, компенсационной и дополнительных полюсов и, как следствие, соответствующих составляющих потерь (см. п. 2.1). По сравнению с синхронным реактивным двигателем независимого возбуждения в синхронном двигателе суммарные потери за цикл прокатки несколько выше, разница потерь объясняется наличием потерь в обмотке возбуждения.

На первом этапе с использованием обобщенной нагрузочной диаграммы стана ХПТ-450 с учетом полученных зависимостей была определена величина суммарных потерь и их составляющих за цикл прокатки в электроприводе постоянного тока для исходного случая структуры подчиненного регулирования.

Расчет суммарных потерь и их составляющих за цикл прокатки в электроприводе на базе двигателя постоянного тока для стана ХПТ-450 (маршрут 406 – 351) на основании обобщенных зависимостей позволил получить следующие результаты: $\Delta P_{яц} = 123,4$ кВт; $\Delta P_{ов} = 14,7$ кВт; $\Delta P_{маг} = 14,9$ кВт; $\Delta P_{мех} = 7,5$ кВт; $\Delta P_{доб} = 7,3$ кВт; $\Delta P_{\Sigma} = 167,8$ кВт.

Реализованный подход основан на статистических обобщенных зависимостях относительных потерь от момента нагрузки и не учитывает насыщение магнитной системы двигателя, электромагнитную и механическую инерцию электропривода. Данное обстоятельство обуславливает необходимость скорректировать полученные результаты с учетом кривой намагничивания, конкретных переходных процессов в электроприводе,

характеризующихся его типом, особенностями структур и параметров систем управления.

Расчет с учетом принятых ранее допущений проводился на математической модели электропривода стана ХПТ-450 в схеме подчиненного регулирования двигателем постоянного тока (рис. 3.3 в главе 3). Модель позволила учесть влияние насыщения магнитной системы двигателя, электромагнитную и механическую инерцию электропривода на величину потерь. Технические данные двигателя П-21-125-9К и кривая намагничивания были заимствованы из альбома технических данных [3]. Параметры оборудования (датчиков, регуляторов и механической части технологического объекта) были получены от представителей электротехнических служб ПАО «ЧТПЗ» и приведены в табл. 4.2.

Таблица 4.2

Исходные данные для математического моделирования электропривода постоянного тока в схеме подчиненного регулирования

	Тип	Параметр	Обозначение, ед. изм.	Значение
Двигатель	П-21-125-9К	Мощность	P_n , кВт	1300
		Напряжение якоря	U_n , В	620
		Ток якоря	I_n , А	2340
		Номинальная скорость	ω_n , рад/с	4,2
		Максимальный ток	$I_{\text{макс}}$, А	4680
		Момент инерции	J_d , кгм ²	19875
		Сопротивление якорной цепи	R_y , Ом	0,018
		Индуктивность якорной обмотки	L_y , Гн	0,006
		Индуктивность компенсационной обмотки и добавочных полюсов	$L_{\text{копд}}$, Гн	0,004
		Ток возбуждения	I_b , А	143,5
Датчики	—	Коэф. датчика тока	$K_{\text{дт}}$, В/А	0,002
		Коэф. датчика скорости	$K_{\text{дс}}$, В·с/рад	2,2

Регуляторы	Пропорционально-интегральный регулятор тока	Коэф. пропорционального канала	$K_{рт}$	0,2
		Постоянная времени интегрального канала	$T_{рт}$	0,1
	Пропорционально-интегральный регулятор скорости	Коэф. пропорционального канала	$K_{рс}$	10
		Постоянная времени интегрального канала	$T_{рс}$	0,07
КШМ	–	Радиус кривошипа	$R_{кр}, м$	0,61
		Длина шатуна	$L_{ш}, м$	4,61
		Дезаксиал	$e, м$	0,06
БФНД	–	Радиус прокатных валков	$R_{в}, м$	0,67
		Момент прокатки при прямом ходе клетки	$M_{пр}, кНм$	443
		Момент прокатки при обратном ходе клетки	$M_{обр}, кНм$	310
		Момент холостого хода	$M_{хх}, кНм$	66,5

КШМ – кривошипно-шатунный механизм;

БФНД – блок формирования нагрузочной диаграммы.

На рис. 4.2 приведены осциллограммы переходных процессов в электроприводе постоянного тока, полученные с использованием математической модели, реализованной в программе *MatLab Simulink* (см. п. 3.1). Здесь представлены зависимости токов якорной цепи и возбуждения, моментов статической нагрузки и двигателя, угловой скорости вращения от времени.

Расчет проводился блоком аналитического расчета потерь, позволяющим в соответствии с уравнениями (см. п. 3.1) на основании полученных кривых переходных процессов выделить составляющие потерь в электроприводе постоянного тока. Такой подход позволил повысить достоверность расчетов в процессе моделирования.

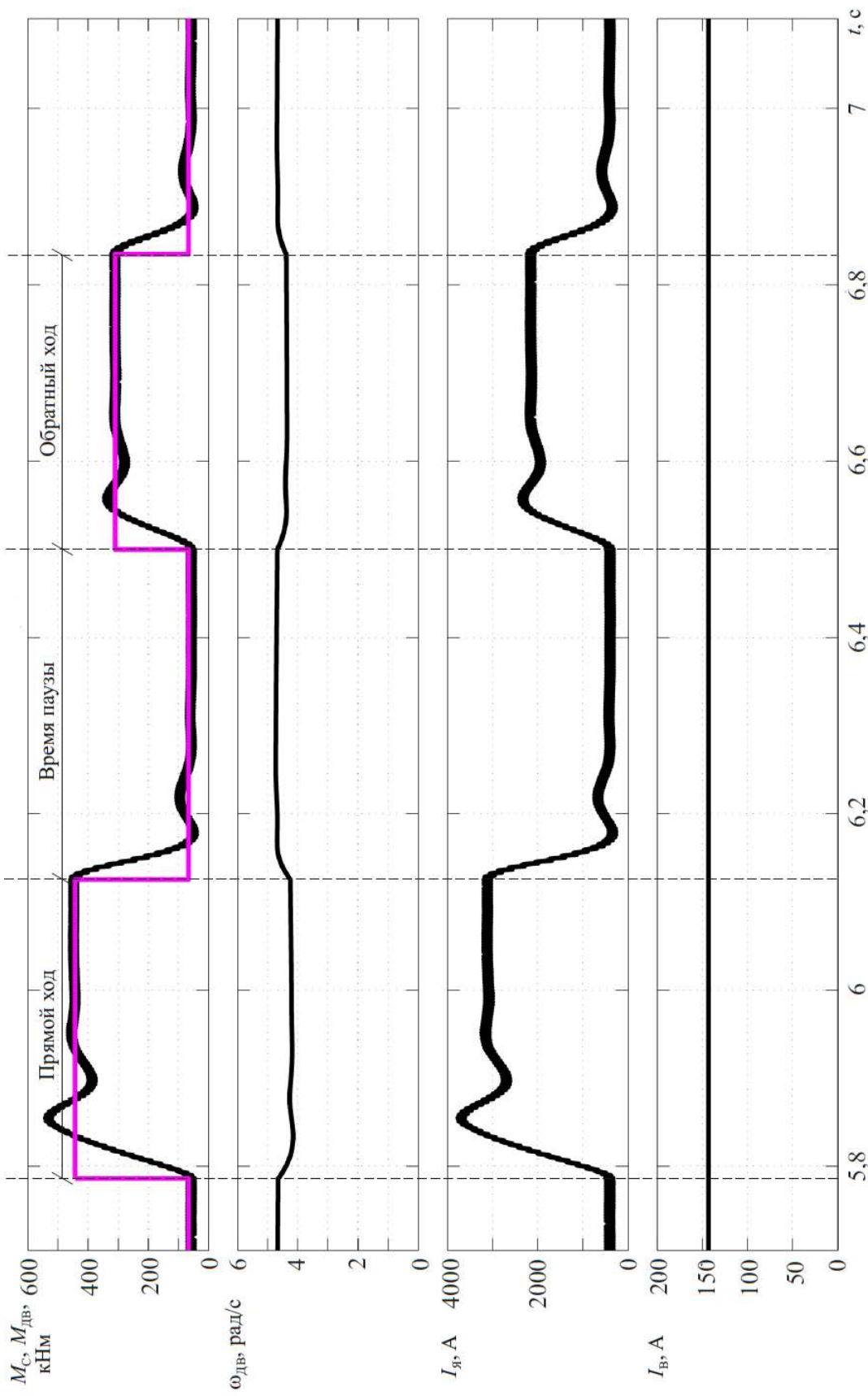


Рис. 4.2. Переходные процессы в электроприводе подчиненного регулирования стана ХПТ-450 на базе двигателя постоянного тока

На приведенных осциллограммах присутствует разделение на участки: прямой и обратный ход прокатной клетки и время, отведенное на вспомогательные операции (холостой ход). При движении клетки вперед максимальный момент двигателя составил $M_{дв.макс} = 532$ кНм; максимальный бросок тока – $I_{макс} = 3,8$ кА; динамическое падение скорости – $n_{дин} = 0,6$ рад/с. При возвратном движении прокатной клетки максимальный момент двигателя составил $M_{дв.макс} = 325$ кНм; максимальный бросок тока – $I_{макс} = 2,4$ кА; динамическое падение скорости – $n_{дин} = 0,35$ рад/с. При этом за цикл прокатки: среднеквадратичный момент двигателя – $M_{дв.срkv} = 269$ кНм; среднеквадратичное значение тока якоря – $I_{срkv} = 1,98$ кА; среднее значение тока якоря – $I_{ср} = 1,6$ кА; среднее значение скорости – $n_{ср} = 4,4$ рад/с.

Обращает на себя внимание превышение приблизительно на 30% среднеквадратичного тока над средним. Это говорит о том, что есть определенные резервы снижения загрузки электропривода.

Расчет суммарных потерь и их составляющих за цикл прокатки в электроприводе подчиненного регулирования на базе двигателя постоянного тока для стана ХПТ-450 (маршрут 406 – 351) с использованием математической модели позволил получить следующие результаты: $\Delta P_{яц} = 117,2$ кВт; $\Delta P_{об} = 13,9$ кВт; $\Delta P_{маг} = 14,2$ кВт; $\Delta P_{мех} = 7,2$ кВт; $\Delta P_{доб} = 6,9$ кВт; $\Delta P_{\Sigma} = 159,4$ кВт.

Полученные величины отличаются от значений предварительного анализа, основанного на среднеквадратичных оценках потерь за цикл прокатки. Расхождения обусловлены учетом при математическом моделировании кривой намагничивания, инерционностей обмоток и механической части электропривода. На рис. 4.3 приведена соответствующая диаграмма распределения составляющих относительных потерь в электроприводе подчиненного регулирования стана ХПТ-450 на базе двигателя постоянного тока. В данном случае составляющие приведены в процентах относительно суммарных потерь.

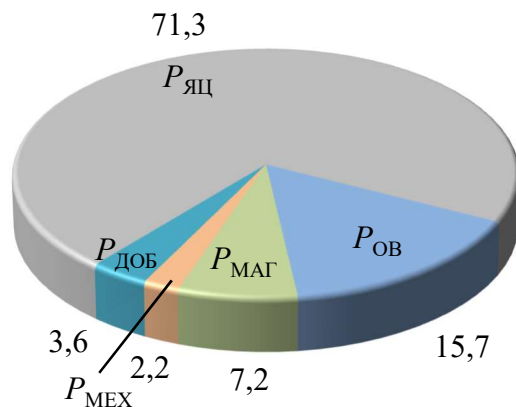


Рис. 4.3. Диаграмма распределения составляющих относительных потерь в электроприводе подчиненного регулирования стана ХПТ-450 на базе двигателя постоянного тока

Существенную часть суммарных потерь составляют потери в якорной цепи (71,3 %). В отечественной литературе обращается внимание на приближительное равенство постоянных и переменных потерь в общепромышленном электроприводе [64]. Как показывают результаты

математического моделирования и статистическая обработка технических данных прокатных двигателей, распределение потерь в индивидуальных электроприводах меняется. Доля переменных потерь в этом случае преобладает (см. рис. 4.3).

4.1.2. Способы снижения потерь электроэнергии в моделируемых электроприводах постоянного тока

Снижение потерь электроэнергии за счет маховика

Чтобы полнее использовать кинетическую энергию вращающихся частей электропривода на снижение электрических потерь можно пойти по пути, который в течение десятилетий афишируется в литературе и реализуется на практике – это установка маховика. В работе проведена оценка возможностей в плане экономии электрической энергии различных вариантов маховичного электропривода, которые рассматривались в трудах Н.Н. Дружинина [56], В.Ф. Бурьянова [23], В.А. Юдина [170].

Одним из способов экономии электроэнергии в электроприводе и снижения пиковых значений момента является установка маховика. На участках цикла, соответствовавших времени паузы, маховые массы

формировали запас кинетической энергии, которая расходовалась при прокатке. Выбор момента инерции маховика и расчет мощности электродвигателей для разного типа прокатных станов освещен в [56].

На заводах раньше, да и сейчас существует точка зрения, что в электроприводах с явно выраженным неравномерным моментом статической нагрузки маховик полезен, так как позволяет выровнять график кривой тока якоря и приблизить среднеквадратичный момент к среднему. Например, на пильгерстане установлен маховик весом 120 т, диаметром 9 м, что не только утяжеляет электропривод, снижает надежность, но и увеличивает потери холостого хода. Ориентировочно предельные возможности маховичного электропривода можно оценить, пользуясь следующим предположением. Допустим, что электропривод имеет суммарный момент инерции J , номинальный момент M_H , начальную скорость n_0 , соответствующую скорости идеального холостого хода. Тогда запас кинетической энергии в электроприводе

$$A_{\text{мех}} = J \frac{n_0^2}{2} = \frac{1}{2} J \cdot \frac{n_0}{M_H} \cdot n_0 M_H = \frac{T_d}{2} \cdot P_H.$$

Здесь T_d – механическая постоянная времени, P_H – номинальная мощность двигателя.

В течение цикла работу, затрачиваемую на прокатку металла, можно записать в виде выражения

$$A_{\text{пр}} = M_{\text{пр}} \cdot \alpha_{\text{пр}},$$

где $M_{\text{пр}}$ – усредненное значение момента прокатки при повороте валков на рабочем участке на угол $\alpha_{\text{пр}}$.

Выясним, каким был бы перепад скорости электропривода Δn , чтобы, используя только энергию маховика, обеспечить прокатку за цикл. Тогда без учета добавочных потерь в механизме электропривода

$$A_{\text{мех}} = A_{\text{пр}},$$

или

$$\frac{T_d}{2} \cdot n_0 M_H = M_{пр} \cdot \alpha_{пр},$$

откуда при $M_{пр} = M_H$ необходимый перепад скорости

$$\Delta n = \frac{2\alpha_{пр}}{T_d}.$$

В качестве примера рассматривался электропривод клетки стана ХПТ, который имеет следующие данные: мощность двигателя постоянного тока $P_H = 1300$ кВт, номинальный ток якоря $I_H = 2340$ А, скорость идеального холостого хода $n_0 = 4,5$ рад/с, механическая постоянная времени $T_d = 0,3$ с, угол поворота валков при заполненных калибрах $\alpha_{пр} = 1$ рад. Если принять $M_{пр} = M_H$, то $\Delta n \approx 7$ рад/с, или $\frac{\Delta n}{n_0} = 1,6$, что значительно превышает все разумные пределы. По этой причине на долю маховика обычно в разомкнутых системах электропривода отводили не более 15-25 % энергии, необходимой для прокатки, что снижало пик момента двигателя на 10-15 % [170].

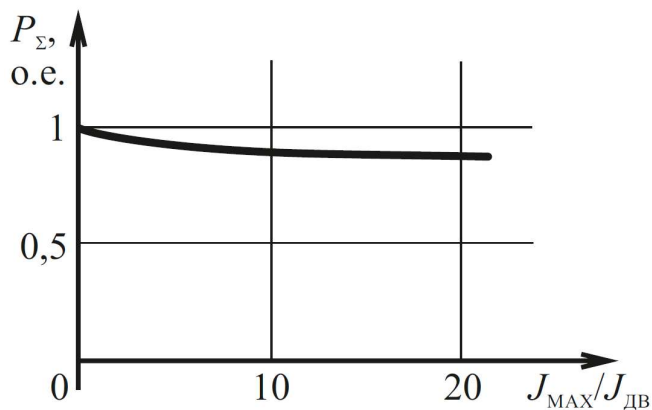


Рис. 4.4. Зависимость суммарных потерь от относительного значения момента инерции маховика

На рис. 4.4 показана зависимость суммарных потерь от относительного значения момента инерции маховика для электропривода на базе двигателя постоянного тока на примере стана ХПТ-450.

Расчет суммарных потерь и их составляющих за цикл прокатки в электроприводе подчиненного регулирования на базе двигателя постоянного тока для стана ХПТ-450 (маршрут 406 – 351) с применением маховика дал следующие результаты: $\Delta P_{яц} = 95,5$ кВт; $\Delta P_{об} = 25$ кВт; $\Delta P_{маг} = 11,5$ кВт; $\Delta P_{мех} = 6,3$ кВт; $\Delta P_{доб} = 5,4$ кВт; $\Delta P_{\Sigma} = 143,7$ кВт.

На рис. 4.5 приведена диаграмма распределения составляющих относительных потерь в электроприводе подчиненного регулирования стана ХПТ-450 на базе двигателя постоянного тока с применением маховика по сравнению с существующим на сегодняшний день решением.

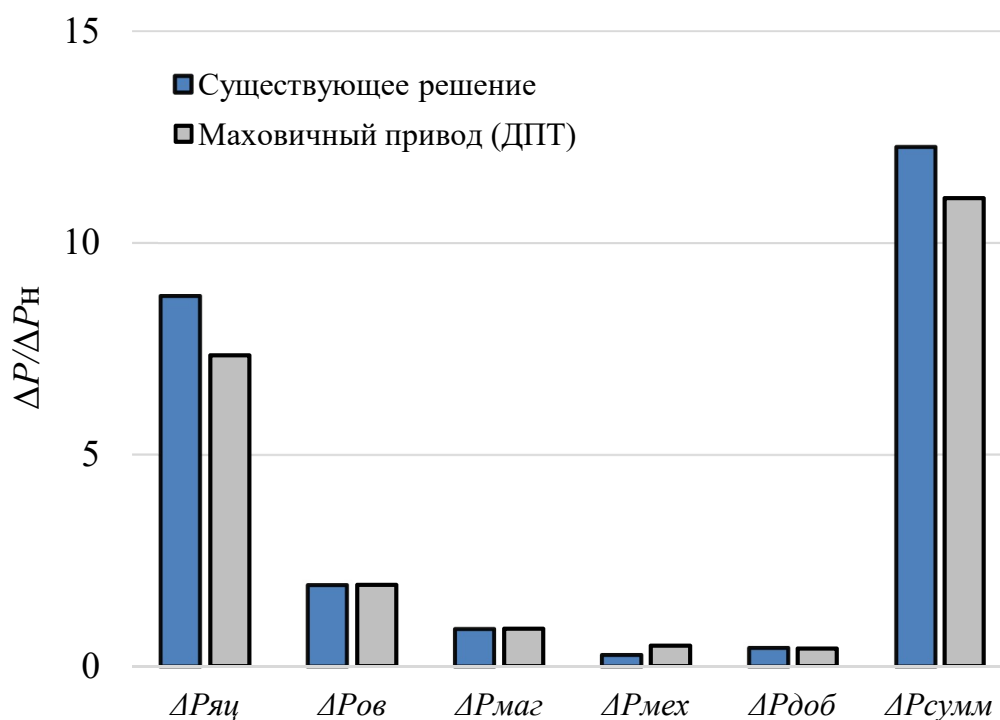


Рис. 4.5. Диаграмма составляющих относительных потерь в электроприводе подчиненного регулирования стана ХПТ-450 на базе двигателя постоянного тока с применением маховика

Показано, что для электропривода стана ХПТ-450 применение маховика позволяет снизить суммарные потери в электроприводе на 10 %. Следует обратить внимание, что снижение среднеквадратичного тока якоря одновременно приводит к увеличению механических потерь в электроприводе, в результате уменьшается общий эффект в плане экономии электрической энергии. Вместе с тем проявляются неблагоприятные побочные явления данного способа: резко увеличивается материалоемкость электропривода, растут габариты, увеличиваются потери в подшипниках на трение и трение о воздух, снижается надежность при эксплуатации подшипниковых узлов.

Смягчение механической характеристики обратными связями

В качестве второго способа использования энергии маховых масс для прокатки трубы рассматривалось смягчение механической характеристики электропривода в схеме подчиненного регулирования с целью уменьшения бросков тока якоря. До появления замкнутых систем смягчение достигалось введением добавочных резисторов в цепь якоря двигателя постоянного тока или в цепь ротора асинхронного двигателя с фазным ротором – агрегаты Ильгнера. Этот способ получил распространение в электроприводах реверсивных станов горячей прокатки (например, блюмингах, слябингах). В настоящее время с появлением полупроводниковых управляемых преобразователей смягчение характеристики проще и экономичнее получить введением и усилением отрицательной обратной связи по току якоря.

Идея данного способа заключается в том, чтобы обеспечить возможность часть энергии, затрачиваемой на деформацию металла, взять от маховых масс привода, тем самым повысить равномерность тока якоря в течение цикла прокатки и снизить величину потерь.

На рис. 4.6 приведены упрощенные осциллограммы скорости двигателя и тока якоря. Энергия маховых масс привода может быть определена как

$$W_{\text{мах}} = J \frac{n_0^2 - n_d^2}{2},$$

где $W_{\text{мах}}$ – энергия маховых масс; n_0 – скорость идеального холостого хода двигателя; n_d – величина динамического падения скорости; J – момент инерции привода. Экономия электроэнергии будет тем значительнее, чем большую часть энергии $W_{\text{пр}}$, необходимой для прокатки, удастся покрыть за счет энергии маховых масс привода. Упрощенные осциллограммы (рис. 4.6, (1)) тока и скорости соответствуют исходному случаю механической характеристики замкнутой системы электропривода. Смягчение этой характеристики позволяет приблизить среднеквадратичный ток якоря к среднему значению (рис. 4.6 (2)), тем самым снизить величину электрических

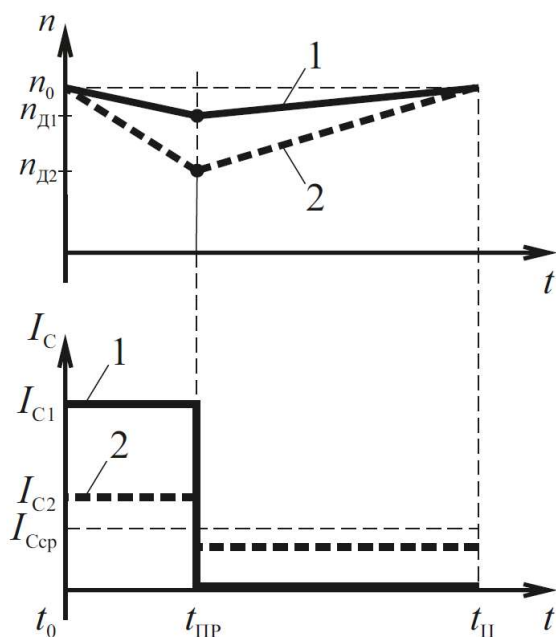


Рис. 4.6. Упрощенные осциллограммы скорости двигателя и тока якоря

потерь в якорной цепи.

Оценка снижения среднеквадратичного тока проводилась на математической модели «Электропривод – прокатная клеть» стана холодной прокатки бесшовных труб ХПТ-450, которая включала в себя: главный электропривод прокатной клетки, выполненный по схеме подчиненного регулирования; механическую часть, учитывающую механические

передачи в системе; блок формирования нагрузочных диаграмм; блок аналитического расчета потерь. Исходные данные для математического моделирования приведены в п. 4.1.1 (табл. 4.2).

Смягчение механической характеристики производилось снижением коэффициента усиления пропорционального регулятора скорости $K_{РС}$. На рис. 4.7 приведены осциллограммы скорости и тока якорной цепи прокатного двигателя постоянного тока при различных значениях $K_{РС}$.

Для $K_{РС} = 10$ при движении клетки вперед максимальный момент двигателя составил $M_{дв.макс} = 475$ кНм; максимальный бросок тока – $I_{макс} = 3,3$ кА; динамическое падение скорости – $n_{дин} = 0,7$ рад/с. При возвратном движении прокатной клетки максимальный момент двигателя составил $M_{дв.макс} = 330$ кНм; максимальный бросок тока – $I_{макс} = 2,3$ кА; динамическое падение скорости – $n_{дин} = 0,5$ рад/с. При этом за цикл прокатки: среднеквадратичный момент двигателя – $M_{дв.срkv} = 267$ кНм; среднеквадратичное значение тока якоря – $I_{срkv} = 1,84$ кА; среднее значение тока якоря – $I_{ср} = 1,59$ кА; среднее значение скорости – $n_{ср} = 4,2$ рад/с.

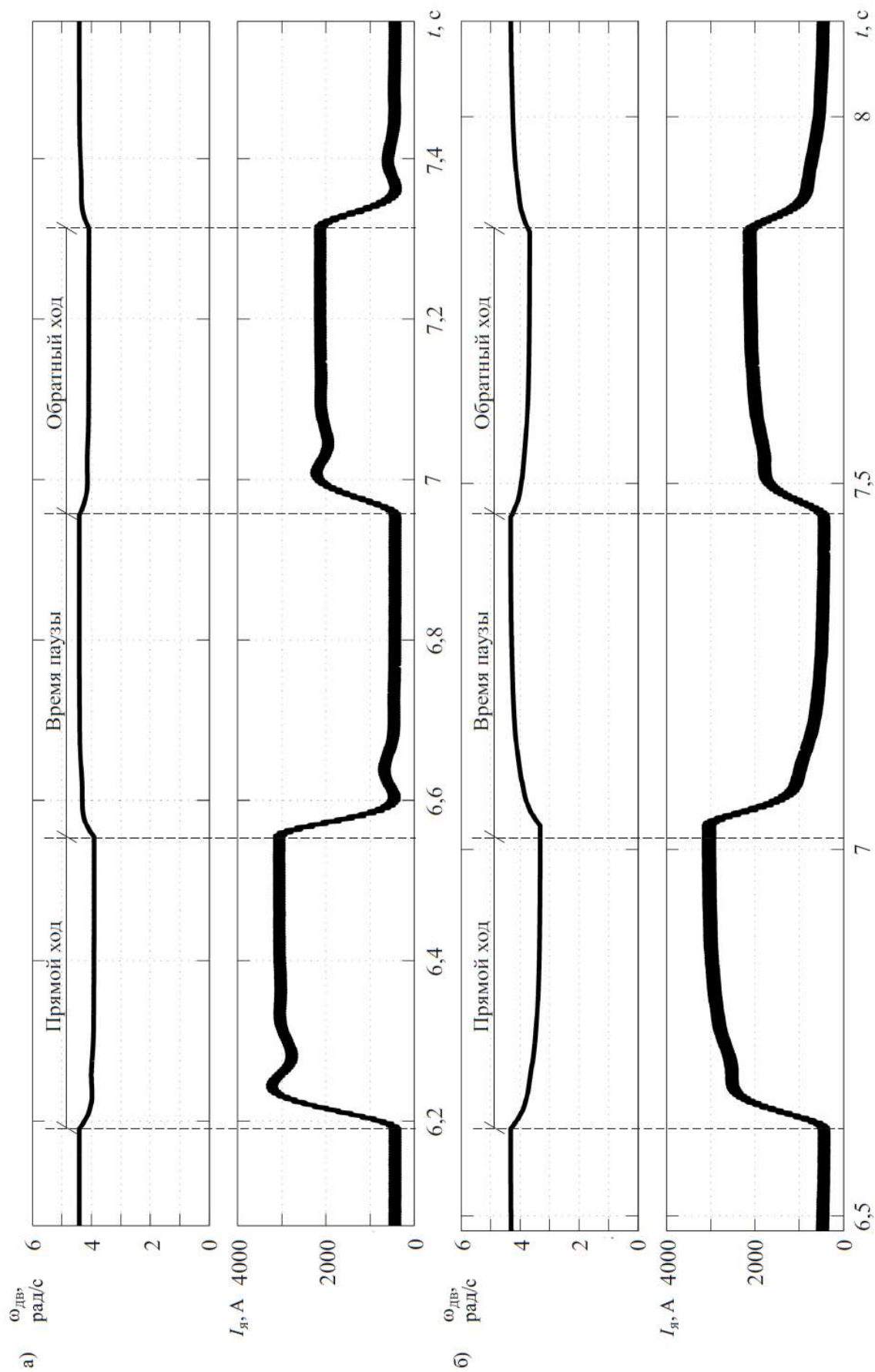


Рис. 4.7. Переходные процессы в электроприводе стана ХПТ-450 на базе двигателя постоянного тока: а) при $K_{rc} = 10$; б) при $K_{rc} = 5$

Для $K_{PC} = 5$ при движении клетки вперед максимальный момент двигателя составил $M_{дв.макс} = 440$ кНм; максимальный бросок тока – $I_{макс} = 3,02$ кА; динамическое падение скорости – $n_{дин} = 1,3$ рад/с. При возвратном движении прокатной клетки максимальный момент двигателя составил $M_{дв.макс} = 308$ кНм; максимальный бросок тока – $I_{макс} = 2,1$ кА; динамическое падение скорости – $n_{дин} = 0,9$ рад/с. При этом за цикл прокатки: среднеквадратичный момент двигателя – $M_{дв.срkv} = 259$ кНм; среднеквадратичное значение тока якоря – $I_{срkv} = 1,76$ кА; среднее значение тока якоря – $I_{ср} = 1,56$ кА; среднее значение скорости – $n_{ср} = 3,9$ рад/с.

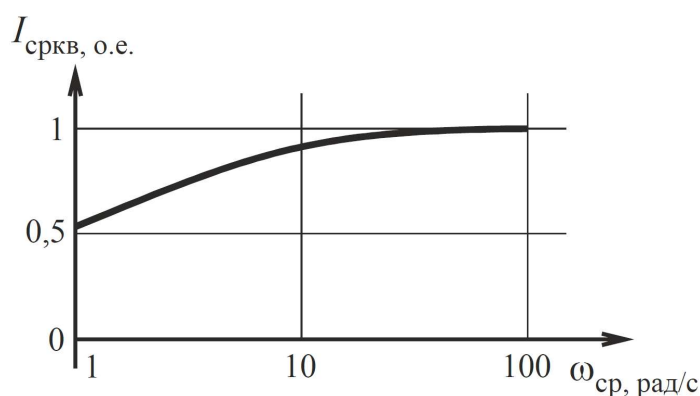


Рис. 4.8. Зависимость среднеквадратичного тока якоря от частоты среза контура регулирования скорости

Располагая характеристикой процессов, удалось построить зависимость, которая оценивает влияние наклона механической характеристики на величину среднеквадратичного тока якоря. Анализ характеристик, приведенных на рис. 4.8,

показывает, что экономический эффект наблюдается во всем рассмотренном диапазоне снижения K_{PC} .

На рис. 4.8 приведена зависимость среднеквадратичного тока якоря от частоты среза контура регулирования скорости. За базовое значение принято среднеквадратичное значение тока якоря при параметрах последовательных корректирующих устройств, принятых на сегодняшний день как оптимальные. Если выбрать частоту среза 10 рад/с, то величина среднеквадратичного тока снижается на 9 %.

Расчет суммарных потерь и их составляющих за цикл прокатки в электроприводе подчиненного регулирования на базе двигателя постоянного

тока для стана ХПТ-450 (маршрут 406 – 351) при $\omega_{\text{КРС}} = 10$ рад/с дал следующие результаты: $\Delta P_{\text{ЯЦ}} = 88,7$ кВт; $\Delta P_{\text{ОВ}} = 25$ кВт; $\Delta P_{\text{МАГ}} = 11,5$ кВт; $\Delta P_{\text{МЕХ}} = 3,5$ кВт; $\Delta P_{\text{ДОБ}} = 4,5$ кВт; $\Delta P_{\Sigma} = 133,2$ кВт.

На рис. 4.9 приведена диаграмма распределения составляющих относительных потерь в электроприводе подчиненного регулирования стана ХПТ-450 на базе двигателя постоянного тока при $\omega_{\text{КРС}} = 10$ рад/с по сравнению с существующим на сегодняшний день решением.

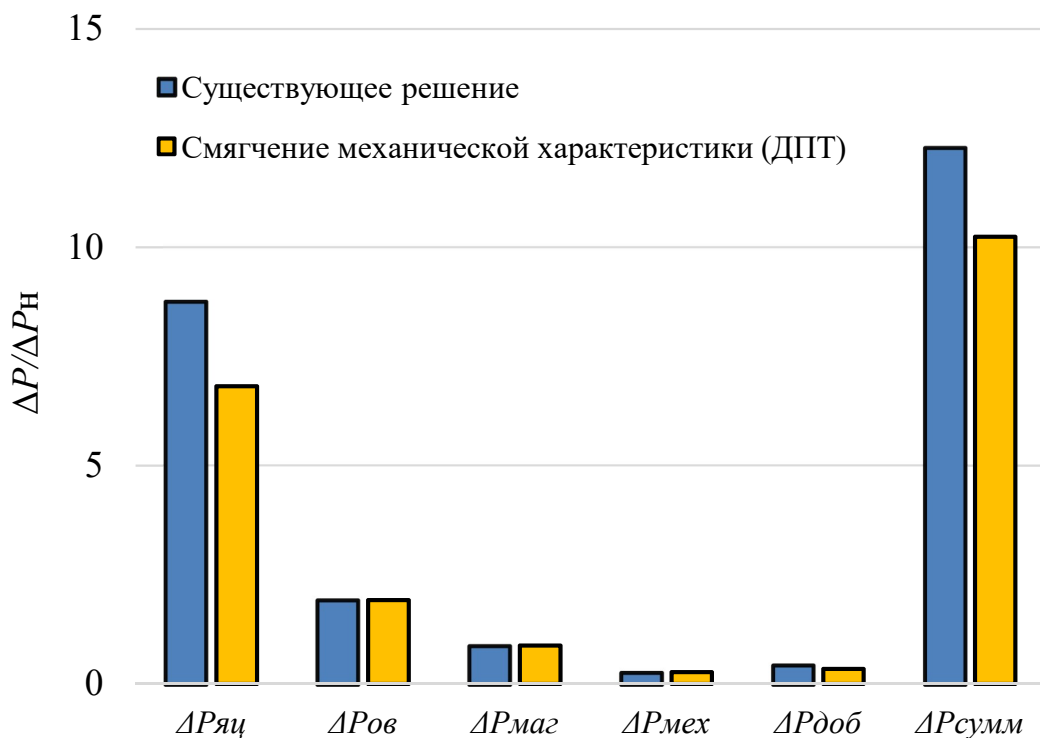


Рис. 4.9. Диаграмма распределения составляющих относительных потерь в электроприводе подчиненного регулирования стана ХПТ-450 на базе двигателя постоянного тока при $\omega_{\text{КРС}} = 10$ рад/с

Показано, что для электропривода стана ХПТ-450 смягчение механической характеристики позволяет снизить суммарные потери в электроприводе на 16 %. Заметное снижение среднеквадратичного тока (до 50 %) достигается только при малых частотах среза и значительных просадках скорости, которые в реальных системах допускать нельзя.

Как показывает рис. 4.8, наибольшая экономия электрических потерь наблюдается в зоне низких значений K_{PC} , однако при этом значительно уменьшается средняя скорость прокатки, что влечет за собой увеличение времени цикла и, как следствие, снижение производительности стана (рис. 4.10). Например, при $\omega_{KPC} = 1$ рад/с наблюдается снижение производительности практически в два раза, время цикла увеличивается до 3,6 с. В результате на единицу продукции экономия электроэнергии

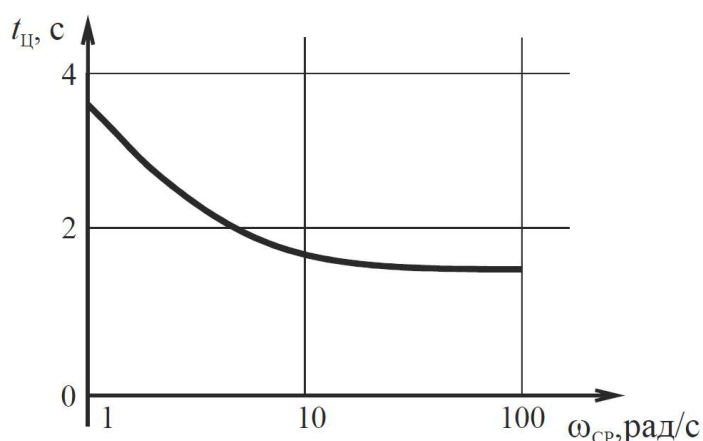


Рис. 4.10. Зависимость времени цикла прокатки от частоты среза контура регулирования скорости

получается незначительной. Данное обстоятельство применительно к стану ХПТ-450 связано с тем, что время прокатки $t_{пр}$ относительно большое, порядка 40 % от всего цикла $t_{ц}$. Маховые массы привода будут работать лучше, если время прокатки будет значительно меньше времени всего цикла.

Предварительное ослабление магнитного потока двигателя перед рабочим ходом

Чтобы не допустить снижения средней скорости на непрерывных станах горячей прокатки применяется преднамеренное перед моментом входа металла в валки принудительное за счет предварительного ослабления магнитного потока двигателя кратковременное увеличение скорости идеального холостого хода с целью снижения суммарных потерь в электроприводе [4, 38].

Идея данного способа экономии электроэнергии заключается в том, чтобы, используя большой перепад скорости Δn_d на этапе приложения

момента нагрузки, не допустить существенного снижения средней скорости прокатки (рис. 4.11). Это возможно, если на участке цикла, когда металла в валках нет, поднять скорость электропривода заметно выше скорости идеального холостого хода двигателя при номинальном значении напряжения на якоре, т.е. ценой предварительного ослабления поля в начале рабочего хода.

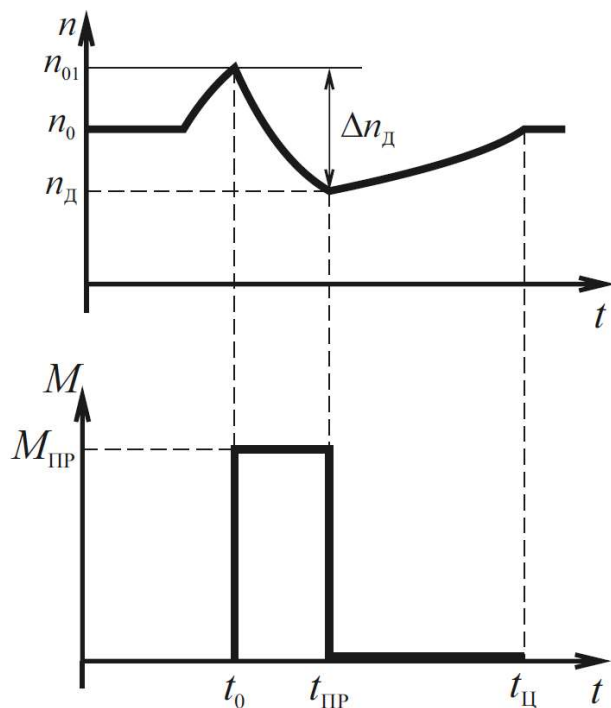


Рис. 4.11. Упрощенные осциллограммы тока якоря и момента прокатки

Перед каждым циклом прокатки скорость привода искусственно увеличивается до n_{01} ослаблением поля двигателя, тем самым достигается увеличение среднего значения скорости за цикл. В работе на примере стана ХПТ-450 рассматривалось влияние степени ослабления потока двигателя Φ (начального превышения скорости n_{01}) на среднеквадратичный ток якоря и производительность стана. При этом предельное значение

скорости должно устанавливаться прокатчиками, исходя из условий ограничения ударных нагрузок в механическом оборудовании при захвате металла. Т.к. процесс ослабления поля происходит в динамике, то важно также выбрать моменты подачи и прекращения импульса на ослабление поля. Задача разворачивалась в функции угла поворота валков, т.к. все переменные состояния удобнее и нагляднее привязывать именно к этому параметру.

Предварительный анализ, проведенный без учета насыщения магнитной системы двигателя, инерционностей обмоток и механической части дал следующие результаты. Полученная зависимость, которая оценивает влияние начального угла поворота валков $\alpha_{нач}$, соответствующего подаче

управляющего сигнала на ослабление поля, на величину среднеквадратичного тока якорной цепи приведена на рис. 4.12.

Наибольший эффект экономии электроэнергии для стана холодной прокатки труб ХПТ-450 получен при потоке двигателя $\Phi = 78\%$ от номинального значения, $\alpha_{\text{нач}} = 0,75$ рад и составил порядка 25 %.

Чтобы учесть принятые ранее допущения и оценить их влияние на величину суммарных потерь, рассмотренный способ управления реализовывался в структуре двухзонного регулирования скорости (см. рис. 4.13). Математическая модель учитывает влияние кривой намагничивания электромеханического преобразователя, инерционность обмоток якорной

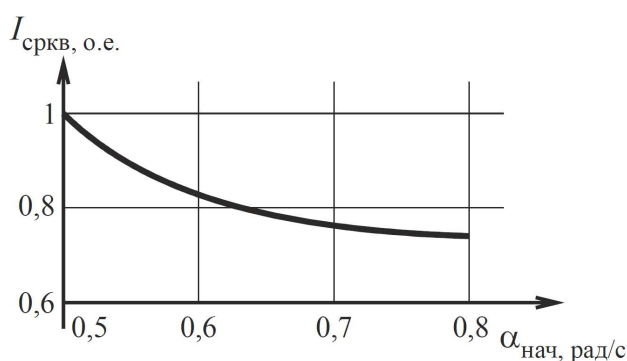


Рис. 4.12. Зависимость среднеквадратичного тока якоря от угла поворота валков, соответствующего началу подачи импульса на ослабление поля (до $\Phi = 78\%$)

цепи и возбуждения, инерционность механической части электропривода. Суммарные потери определялись блоком аналитического расчета потерь (см. главу 3). Осциллограммы переходных процессов угла поворота прокатного инструмента, моментов статической нагрузки и двигателя, скорости, тока якорной

цепи для прямого хода клетки в электроприводе, реализующем описанный выше способ управления, приведены на рис. 4.14.

Расчет суммарных потерь и их составляющих за цикл прокатки в электроприводе двухзонного регулирования на базе двигателя постоянного тока для стана ХПТ-450 (маршрут 406 – 351) при степени ослабления потока $\Phi = 78\%$ от номинального значения, $\alpha_{\text{нач}} = 0,75$ рад дал следующие результаты: $\Delta P_{\text{яц}} = 109,1$ кВт; $\Delta P_{\text{ОВ}} = 24,5$ кВт; $\Delta P_{\text{МАГ}} = 11,4$ кВт; $\Delta P_{\text{МЕХ}} = 3,5$ кВт; $\Delta P_{\text{ДОБ}} = 5,5$ кВт; $\Delta P_{\Sigma} = 154$ кВт.

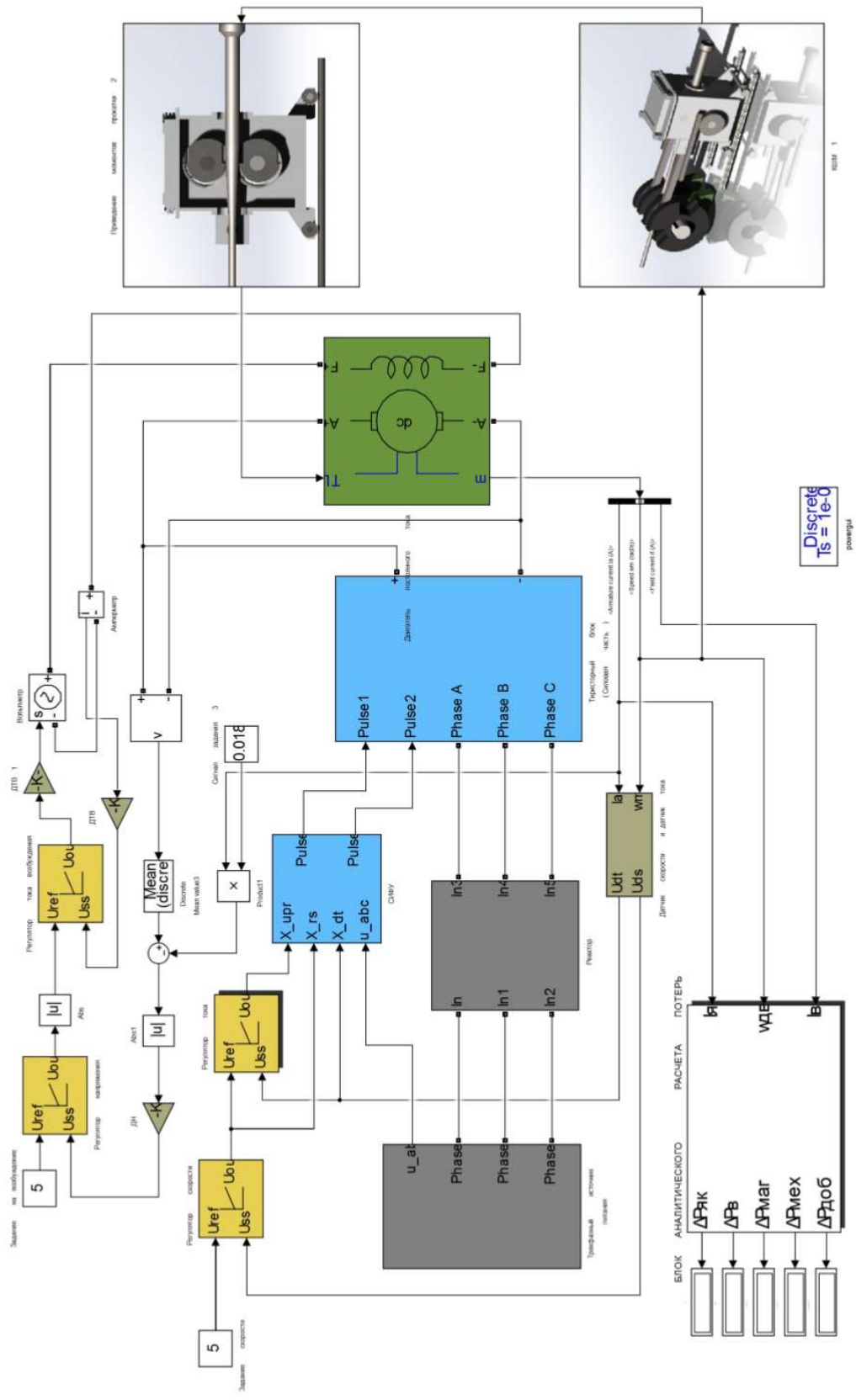


Рис. 4.13. Математическая модель двухзонного регулирования скорости электропривода стана ХПТ-450 на базе двигателя постоянного тока

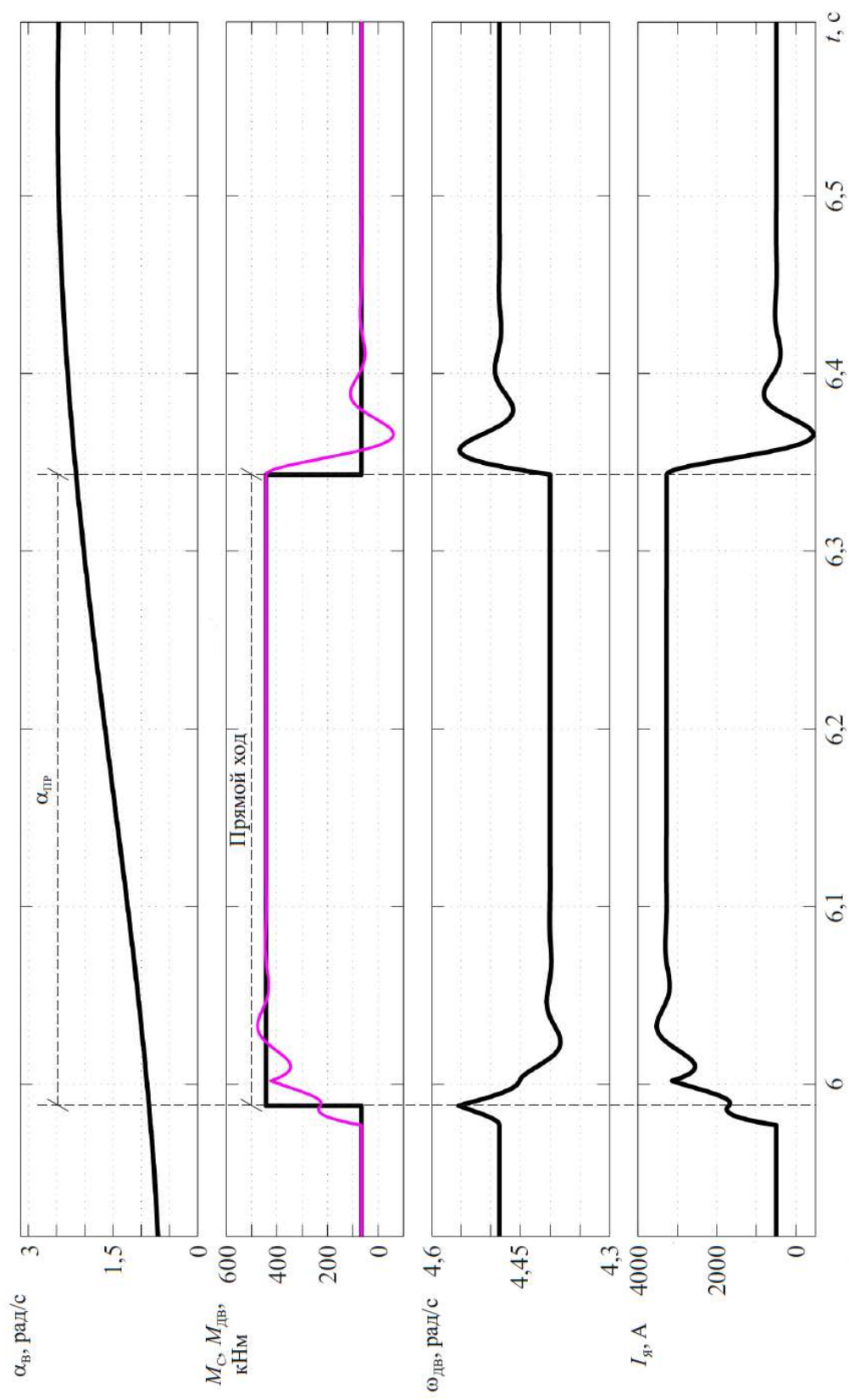


Рис. 4.14. Переходные процессы в электроприводе двухзонного регулирования скорости стана ХПТ-450 на базе двигателя постоянного тока

На рис. 4.15 приведена диаграмма распределения составляющих относительных потерь в электроприводе двухзонного регулирования стана ХПТ-450 на базе двигателя постоянного тока при степени ослабления потока $\Phi = 78\%$ от номинального значения, $\alpha_{\text{нач}} = 0,75$ рад по сравнению с существующим на сегодняшний день решением.

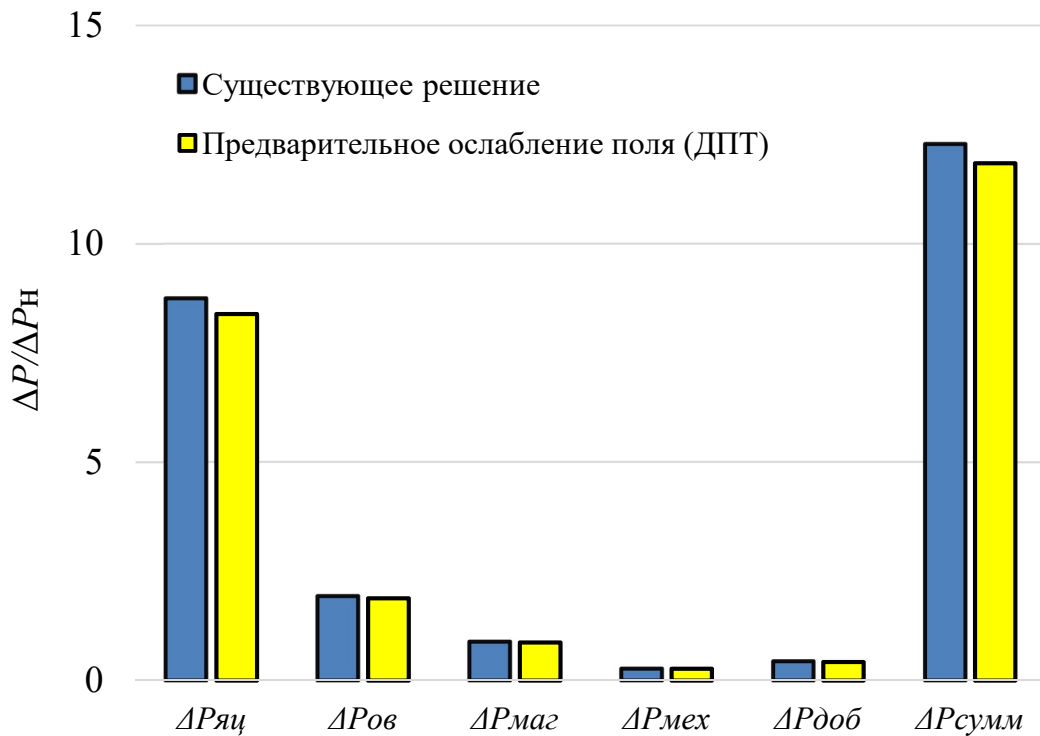


Рис. 4.15. Диаграмма распределения составляющих относительных потерь в электроприводе двухзонного регулирования стана ХПТ-450 на базе двигателя постоянного тока при степени ослабления потока $\Phi = 78\%$ от номинального значения, $\alpha_{\text{нач}} = 0,75$ рад

Показано, что для электропривода стана ХПТ-450 предварительное ослабление поля перед прокаткой позволяет снизить суммарные потери в электроприводе на 3 %. Значительное снижение эффекта экономии электроэнергии по сравнению с предварительной оценкой следует объяснить существенной величиной постоянной времени обмотки возбуждения (для электропривода стана ХПТ-450 $T_{\text{ОВ}} = 6$ с). Данное обстоятельство не позволяет на фоне относительно короткого цикла ($T_{\text{Ц}} = 2$ с) обеспечить ослабление поля до необходимого значения.

Потери в электроприводе с пропорциональным управлением токами якоря и возбуждения двигателя

В настоящее время стан ХПТ-450 работает на электроприводе постоянного тока, реализованном по схеме подчиненного регулирования скорости. В публикации [134] обращается внимание на эффективность в плане экономии электроэнергии пропорционального управления потоком и током якоря для механизмов с ударным характером момента статической нагрузки. В работе проведена оценка энергоэффективности реализации данного способа

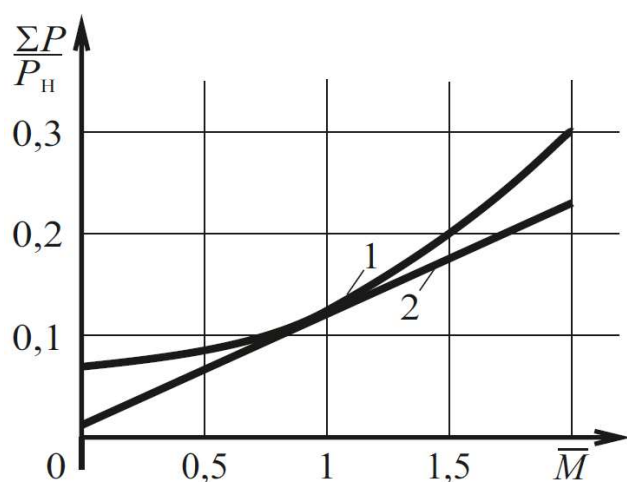


Рис. 4.16. Относительная величина потерь в зависимости от момента нагрузки в двигателях постоянного тока при постоянном потоке (1), при пропорциональном управлении потоком и током якоря (2)

управления применительно к стану ХПТ-450.

На рис. 4.16 приведены зависимости относительной величины суммарных потерь в двигателях постоянного тока при разных способах управления. Эффект энергосбережения в системе пропорционального управления потоком и током якоря проявляется в том, чтобы электропривод работал при нагрузках, соответствующих

крайним участкам графика $\Delta P/P_n = f(M)$. Тогда в режиме холостого хода полнее используется минимизация постоянных потерь в электроприводе, а при перегрузках меньше сказываются среднеквадратичные потери от тока в якорной цепи.

На основании технических данных двигателей [3] и с использованием методики, изложенной в [134], была построена зависимость относительных суммарных потерь в электроприводах разного типа (электропривод постоянного тока, синхронный электропривод, электропривод с синхронным

реактивным двигателем независимого возбуждения) при пропорциональном управлении потоком и током якоря в функции момента статической нагрузки (см. рис. 4.17).

Полученные зависимости имеют практически линейный характер изменения величины относительных потерь от момента, что обусловлено пропорциональностью изменения переменных электрических потерь в электродвигателях и момента нагрузки при реализованном способе управления (потери в якорной цепи двигателя постоянного тока, потери в цепи статора синхронного и синхронного реактивного двигателя независимого возбуждения). Зависимости показывают, что наименьшая усредненная относительная величина потерь в рассматриваемом диапазоне изменения момента статической нагрузки (от 0 до $2M_H$) получена, как и в случае структуры подчиненного регулирования, для электропривода с синхронным реактивным двигателем независимого возбуждения. Данное обстоятельство обусловлено прежде всего конструктивными различиями (см. п. 2.1).

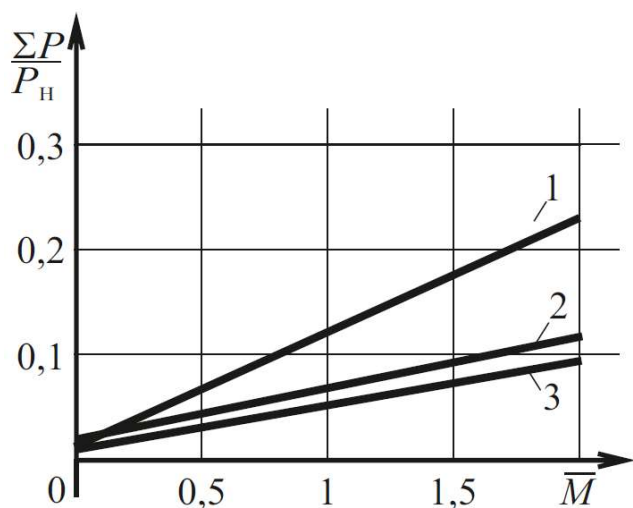


Рис. 4.17. Относительная величина потерь в зависимости от момента нагрузки при пропорциональном управлении потоком и током якоря в двигателях постоянного тока (1), в синхронных двигателях (2), в СРМНВ (3)

На первом этапе с использованием обобщенной нагрузочной диаграммы стана ХПТ-450 с учетом полученных зависимостей была определена величина суммарных потерь и их составляющих за цикл прокатки в электроприводах с двигателями постоянного тока, синхронными двигателями и синхронными реактивными двигателями независимого возбуждения для структуры

пропорционального управления потоком и током якоря. Но при оценке величины потерь на основании предлагаемого подхода не учитывалось возможное влияние инерционностей цепей возбуждения.

Расчет суммарных потерь и их составляющих за цикл прокатки в электроприводе на базе двигателя постоянного тока для стана ХПТ-450 (маршрут 406 – 351) при пропорциональном управлении потоком и током якоря дал следующие результаты: $\Delta P_{\text{яц}} = 92,8$ кВт; $\Delta P_{\text{ОВ}} = 16,1$ кВт; $\Delta P_{\text{МАГ}} = 7,8$ кВт; $\Delta P_{\text{МЕХ}} = 3,7$ кВт; $\Delta P_{\text{ДОБ}} = 4,7$ кВт; $\Delta P_{\Sigma} = 125,1$ кВт.

Реализованный подход основан на статистических обобщенных зависимостях относительных потерь от момента нагрузки и не учитывает насыщение магнитной системы двигателя, электромагнитную и механическую инерцию электропривода. Данное обстоятельство обуславливает необходимость скорректировать полученные результаты с учетом кривой намагничивания, конкретных переходных процессов в электроприводе, характеризующиеся его типом, особенностями структур и параметров систем управления.

Расчет с учетом принятых ранее допущений проводился на математической модели электропривода стана ХПТ-450 в схеме пропорционального управления потоком и током якоря двигателем постоянного тока (рис. 4.18). Модель позволила учесть влияние насыщения магнитной системы двигателя, электромагнитную и механическую инерцию электропривода на величину потерь в электроприводе. Технические данные двигателя П-21-125-9К и кривая намагничивания были заимствованы из альбома технических данных [3].

Параметры оборудования (датчиков, регуляторов и механической части технологического объекта) были получены от представителей электротехнических служб ПАО «ЧТПЗ» и приведены в табл. 4.3.

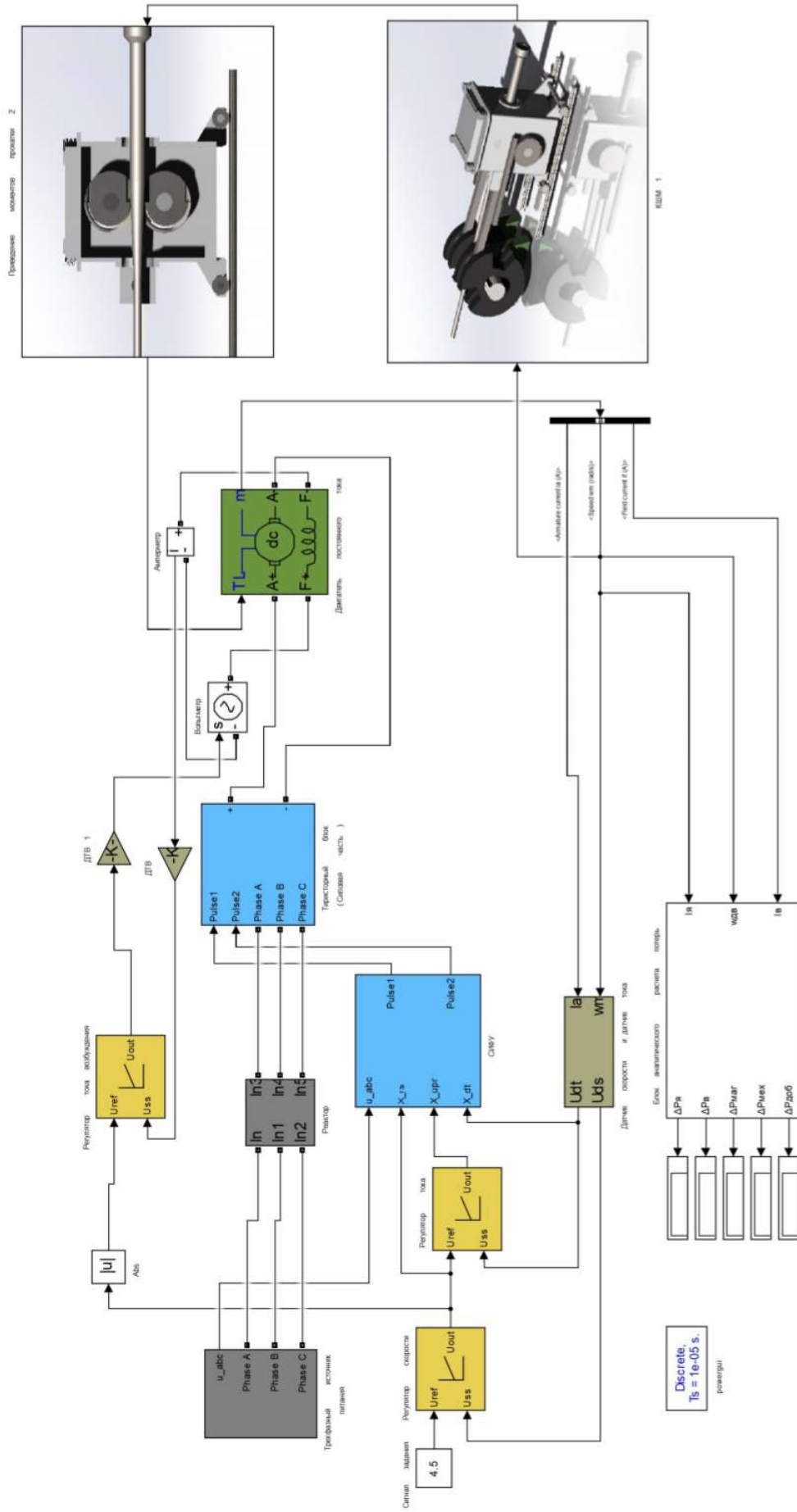


Рис. 4.18. Математическая модель пропорционального управления потоком и током якоря в электроприводе стана ХПП-450 на базе двигателя постоянного тока

Таблица 4.3

Исходные данные для математического моделирования электропривода постоянного тока
в схеме пропорционального управления

	Тип	Параметр	Обозначение, ед. изм.	Значение
Двигатель	П-21-125-9К	Мощность	P_n , кВт	1300
		Напряжение якоря	U_n , В	620
		Ток якоря	I_n , А	2340
		Номинальная скорость	ω_n , рад/с	4,2
		Максимальный ток	I_{\max} , А	4680
		Момент инерции	J_d , кгм ²	19875
		Сопротивление якорной цепи	R_y , Ом	0,018
		Индуктивность якорной обмотки	L_y , Гн	0,006
		Индуктивность компенсационной обмотки и добавочных полюсов	$L_{\text{коп.}}$, Гн	0,004
		Механическая постоянная времени	T_d , с	0,29
		Ток возбуждения	I_v , А	143,5
Датчики	—	Коэф. датчика тока	$K_{дт}$, В/А	0,002
		Коэф. датчика скорости	$K_{дс}$, В·с/рад	2,2
		Коэф. датчика тока возбуждения	$K_{дтв}$, В/А	0,04
Регуляторы	Пропорционально-интегральный регулятор тока	Коэф. пропорционального канала	$K_{рт}$	0,2
		Постоянная времени интегрального канала	$T_{рт}$	0,1
	Пропорционально-интегральный регулятор скорости	Коэф. пропорционального канала	$K_{рс}$	10
		Постоянная времени интегрального канала	$T_{рс}$	0,5
	Пропорционально-интегральный регулятор тока возбуждения	Коэф. пропорционального канала	$K_{ртв}$	50
		Постоянная времени интегрального канала	$T_{ртв}$	0,33
КШМ	—	Радиус кривошипа	$R_{кр}$, м	0,61
		Длина шатуна	$L_{ш}$, м	4,61
		Дезаксиал	e , м	0,06

БФНД	–	Радиус прокатных валков	$R_v, \text{ м}$	0,67
		Момент прокатки при прямом ходе клетки	$M_{пр}, \text{ кНм}$	443
		Момент прокатки при обратном ходе клетки	$M_{обр}, \text{ кНм}$	310
		Момент холостого хода	$M_{хх}, \text{ кНм}$	66,5

КШМ – кривошипно-шатунный механизм;

БФНД – блок формирования нагрузочной диаграммы.

На рис. 4.19 приведены осциллограммы переходных процессов в электроприводе постоянного тока, полученные с использованием математической модели, реализованной в программе *MatLab Simulink* (см. рис. 4.18). Здесь представлены зависимости токов якорной цепи и возбуждения, моментов статической нагрузки и двигателя и угловой скорости вращения от времени. Расчет проводился блоком аналитического расчета потерь, позволяющим в соответствии с уравнениями (см. п. 3.1) на основании полученных кривых переходных процессов выделить составляющие потерь в электроприводе постоянного тока. Такой подход позволил повысить достоверность расчетов в процессе моделирования. Предварительный расчет проведен методом среднеквадратичных оценок. Сравнение моментов статической нагрузки и двигателя показывает, что реальный переходный процесс не повторяет исходный вид нагрузочной диаграммы (см. рис. 4.19). Различия обуславливаются учетом при математическом моделировании механической и электромагнитной инерции. Поэтому требуется уточнение величины потерь с учетом работы системы управления.

Расчет суммарных потерь и их составляющих за цикл прокатки в электроприводе пропорционального управления потоком и током якоря на базе двигателя постоянного тока для стана ХПТ-450 (маршрут 406 – 351) дал следующие результаты: $\Delta P_{яц} = 116 \text{ кВт}$; $\Delta P_{ОВ} = 21,3 \text{ кВт}$; $\Delta P_{МАГ} = 9,8 \text{ кВт}$; $\Delta P_{МЕХ} = 3,5 \text{ кВт}$; $\Delta P_{ДОБ} = 5,9 \text{ кВт}$; $\Delta P_{\Sigma} = 156,3 \text{ кВт}$.

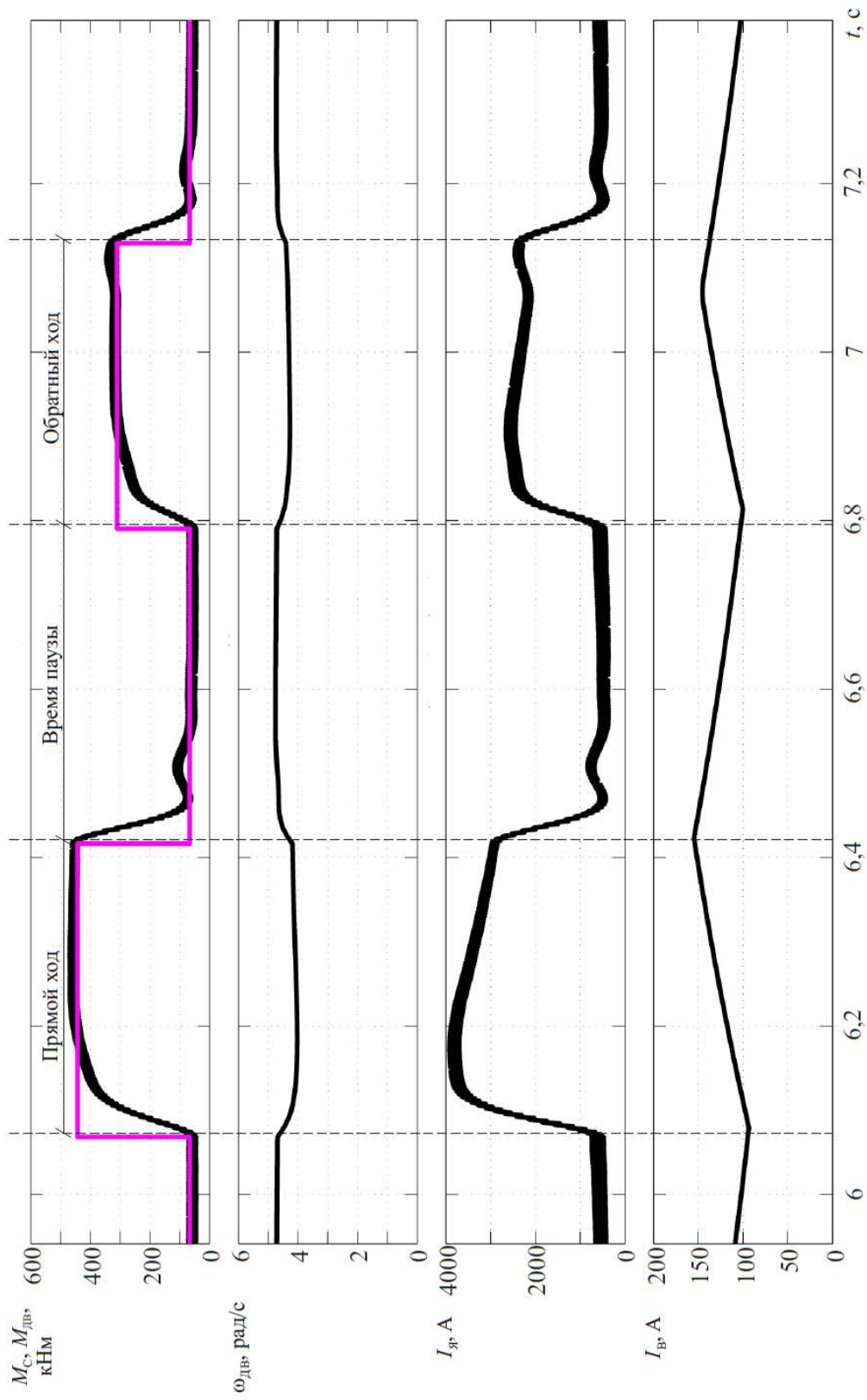


Рис. 4.19. Переходные процессы в электроприводе стана ХПТ-450 на базе двигателя постоянного тока при пропорциональном управлении потоком и током якоря

На рис. 4.20 приведена диаграмма распределения составляющих относительных потерь в электроприводе пропорционального управления потоком и током якоря стана ХПТ-450 на базе двигателя постоянного тока по сравнению с существующим на сегодняшний день решением.

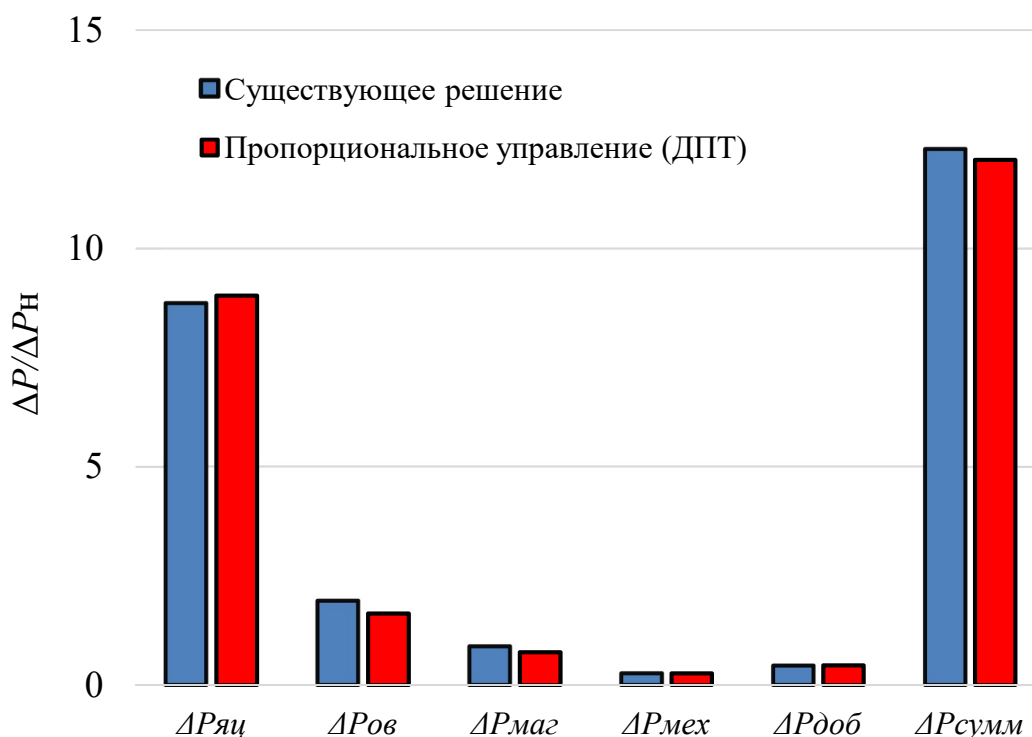


Рис. 4.20. Диаграмма распределения составляющих относительных потерь в электроприводе пропорционального управления потоком и током якоря стана ХПТ-450 на базе двигателя постоянного тока

Показано, что для электропривода стана ХПТ-450 пропорциональное управление потоком и током якоря позволяет снизить суммарные потери в электроприводе на 2 %. Полученные в результате расчета величины отличаются от значений предварительного анализа, основанного на среднеквадратичных оценках потерь за цикл прокатки. Расхождения обусловлены, в первую очередь, учетом влияния инерционности цепи возбуждения, которая заставляет электропривод все время рабочего цикла оставаться в средней части диапазона кривых $\Delta P/P_n = f(M)$, где разные способы управления с точки зрения энергосбережения почти

равноценны. Наиболее выразительно данное обстоятельство может проявляться в тех случаях, когда постоянная времени обмотки возбуждения двигателя $T_{ОВ}$ и постоянная времени рабочего цикла прокатки $T_{РЦ}$ между собой близки. На рис. 4.21 приведена зависимость влияния $T_{ОВ}$ на потери в обмотке

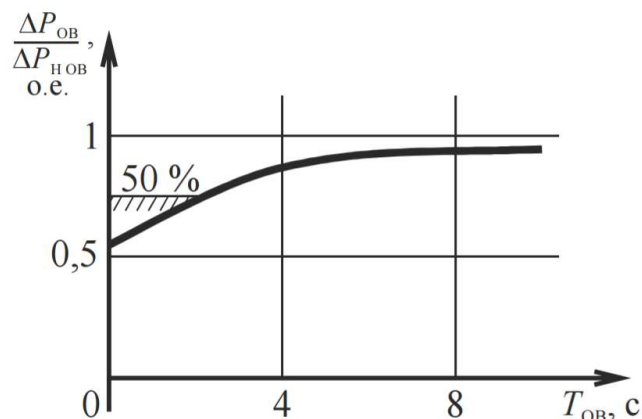


Рис. 4.21. Относительная величина суммарных потерь в зависимости от постоянной времени цепи возбуждения при пропорциональном управлении потоком и током якоря в двигателе постоянного тока с ограничением минимального потока до 50 %

постоянных потерь, а при перегрузках меньше сказываются среднеквадратичные потери от тока в якорной цепи.

4.2. Потери в электроприводах с прокатными синхронными двигателями

4.2.1. Потери электроэнергии в синхронном электроприводе с нерегулируемым возбуждением

Оценка энергоэффективности синхронного электропривода проводилась в стандартной схеме векторного управления. Суммарные потери электроэнергии и их составляющие определялись с использованием разработанной в главе 3 математической модели (см. п. 3.1). Расчет проводился с использованием весовых коэффициентов составляющих потерь,

возбуждения в электроприводе.

Максимально возможная экономия электроэнергии достигается при постоянных времени значительно меньше времени цикла прокатки ($T_{Ц} = 2$ с). При малых постоянных времени в электроприводе, работающем при нагрузках, соответствующих крайним участкам графика $\Delta P/P_n = f(M)$, в режиме холостого хода полнее используется минимизация

полученных при выполнении регрессионного анализа (см. п. 2.2 в главе 2). В табл. 4.1 (п. 4.1.1) приведены численные значения параметров нагрузочных диаграмм различных маршрутов прокатки для рассматриваемых типов станов, полученные от представителей электротехнических служб ПАО «ЧТПЗ» и используемые нами при количественной оценке экономии электроэнергии.

С использованием обобщенной нагрузочной диаграммы стана ХПТ-450 с учетом полученных зависимостей была определена величина суммарных потерь и их составляющих за цикл прокатки в синхронном электроприводе для структуры векторного управления.

Расчет суммарных потерь и их составляющих за цикл прокатки в электроприводе на базе синхронного двигателя для стана ХПТ-450 (маршрут 406 – 351) на основании обобщенных зависимостей позволил получить следующие результаты: $\Delta P_{\text{ЯЦ}} = 36,4$ кВт; $\Delta P_{\text{ОВ}} = 29,6$ кВт; $\Delta P_{\text{МАГ}} = 13,2$ кВт; $\Delta P_{\text{МЕХ}} = 6,6$ кВт; $\Delta P_{\text{ДОБ}} = 6,4$ кВт; $\Delta P_{\Sigma} = 92,1$ кВт.

Реализованный подход основан на статистических обобщенных зависимостях относительных потерь от момента нагрузки и не учитывал насыщение магнитной системы двигателя, электромагнитную и механическую инерцию электропривода. Поэтому полученные результаты были скорректированы с учетом кривой намагничивания, конкретных переходных процессов в электроприводе, характеризующихся его типом, особенностями структур и параметров систем управления.

Расчет с учетом принятых допущений проводился на математической модели электропривода стана ХПТ-450 в схеме векторного регулирования синхронным двигателем (рис. 3.4 в главе 3). Модель позволила учесть влияние насыщения магнитной системы двигателя, электромагнитную и механическую инерцию электропривода на величину потерь.

Исходные данные двигателя СДП 320-31-60 и кривая намагничивания были заимствованы из альбома технических данных [3]. Параметры механической части технологического объекта были получены от

представителей электротехнических служб ПАО «ЧТПЗ» и приведены в табл. 4.4.

Таблица 4.4

Исходные данные для математического моделирования синхронного электропривода
в схеме векторного управления

	Тип	Параметр	Обозначение, ед. изм.	Значение
Двигатель	СДП 320-31-60	Мощность	P_n , кВт	1250
		Номинальное напряжение	U_n , В	6000
		Номинальный ток статора	I_n , А	146
		$\cos \varphi$		0,9
		Момент инерции	J_d , кгм ²	25000
		Активное сопротивление фазы при 15 °С	R_ϕ , Ом	0,328
		Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора	L_p , о.е.	0,123
		Индуктивное сопротивление обмотки статора	L_b , о.е.	0,139
		Ток возбуждения при номинальных нагрузке и $\cos \varphi$	I_b , А	275
Датчики	–	Кэф. датчика скорости	$K_{дс}$, В·с/рад	2,2
Регуляторы	Пропорционально-интегральный регулятор скорости	Кэф. пропорционального канала	$K_{рс}$	5
		Постоянная времени интегрального канала	$T_{рс}$	0,01
КШМ	–	Радиус кривошипа	$R_{кр}$, м	0,61
		Длина шатуна	$L_{ш}$, м	4,61
		Дезаксиал	e , м	0,06
БФНД	–	Радиус прокатных валков	R_b , м	0,67
		Момент прокатки при прямом ходе клетки	$M_{пр}$, кНм	443
		Момент прокатки при обратном ходе клетки	$M_{обр}$, кНм	310
		Момент холостого хода	$M_{хх}$, кНм	66,5

На рис. 4.22 приведены осциллограммы переходных процессов в синхронном электроприводе, полученные с использованием математической модели, реализованной в программе *MatLab Simulink* (см. п. 3.1). Здесь представлены зависимости токов статора, моментов статической нагрузки и двигателя, угловой скорости вращения от времени.

Расчет проводился блоком аналитического расчета потерь, позволяющим в соответствии с уравнениями (см. п. 3.1) на основании полученных кривых переходных процессов выделить составляющие потерь в синхронном электроприводе. Такой подход позволил повысить достоверность расчетов в процессе моделирования.

Расчет суммарных потерь и их составляющих за цикл прокатки в схеме векторного управления в электроприводе на базе синхронного двигателя для стана ХПТ-450 (маршрут 406 – 351) с использованием математической модели позволил получить следующие результаты: $\Delta P_{\text{яц}} = 34,9$ кВт; $\Delta P_{\text{ОВ}} = 28,4$ кВт; $\Delta P_{\text{МАГ}} = 12,6$ кВт; $\Delta P_{\text{МЕХ}} = 6,3$ кВт; $\Delta P_{\text{ДОБ}} = 6,1$ кВт; $\Delta P_{\Sigma} = 88,4$ кВт.

Полученные величины отличаются от значений предварительного анализа, основанного на среднеквадратичных оценках потерь за цикл прокатки. Расхождения обусловлены учетом при математическом моделировании кривой намагничивания, инерционностей обмоток и механической части электропривода. На рис. 4.23 приведена соответствующая диаграмма распределения составляющих относительных потерь в схеме векторного управления в электроприводе стана ХПТ-450 на базе синхронного двигателя. В данном случае составляющие приведены в процентах относительно суммарных потерь. По сравнению с электроприводом постоянного тока существенную долю составляют относительные потери на возбуждение (см. рис. 4.23). Это связано прежде всего со значительной величиной воздушного зазора [30]. Такое решение принималось при проектировании синхронных двигателей в качестве основного для компенсации реакции якоря [29].

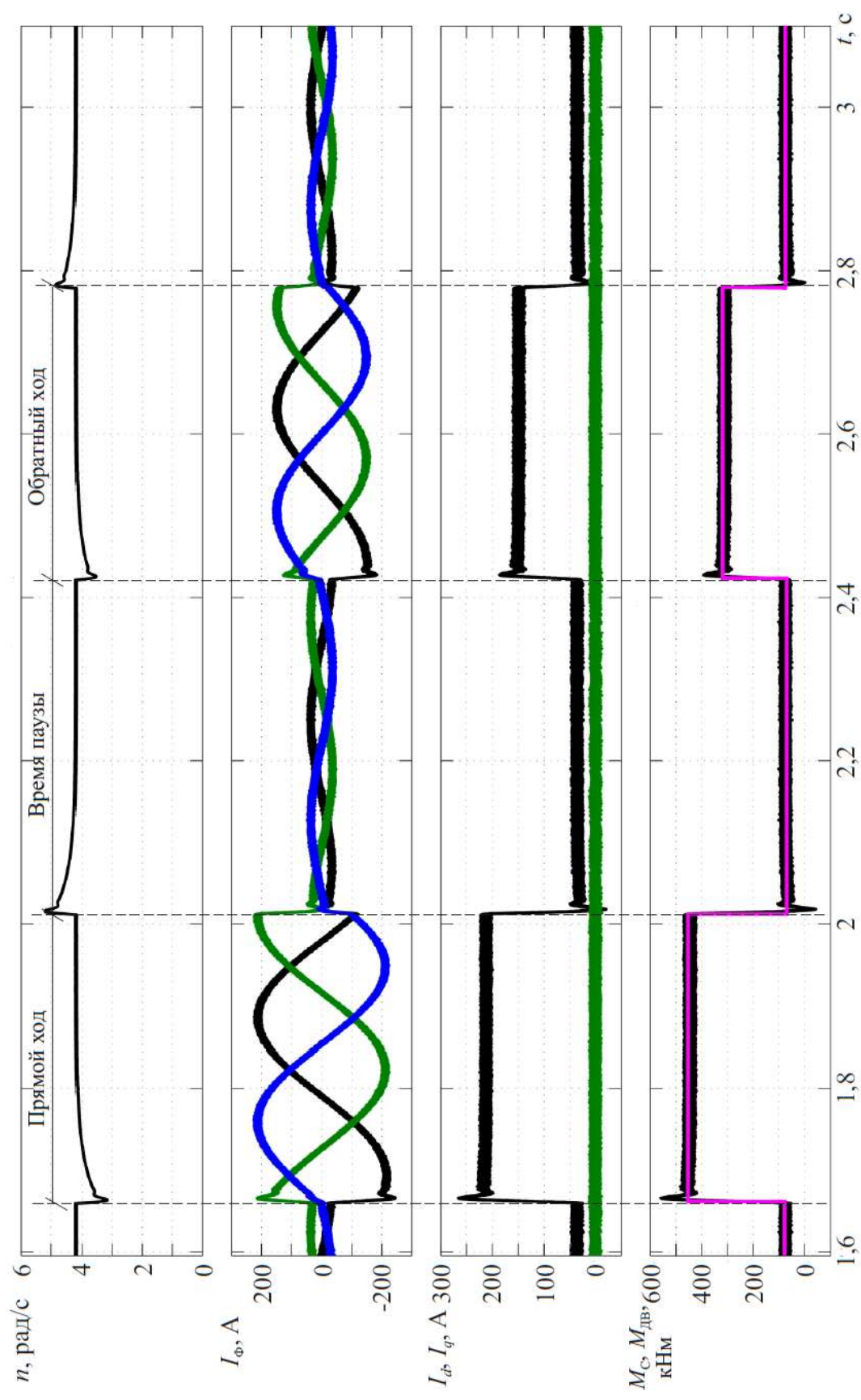


Рис. 4.22. Переходные процессы в схеме векторного управления в электроприводе стана ХПТ-450 на базе синхронного двигателя

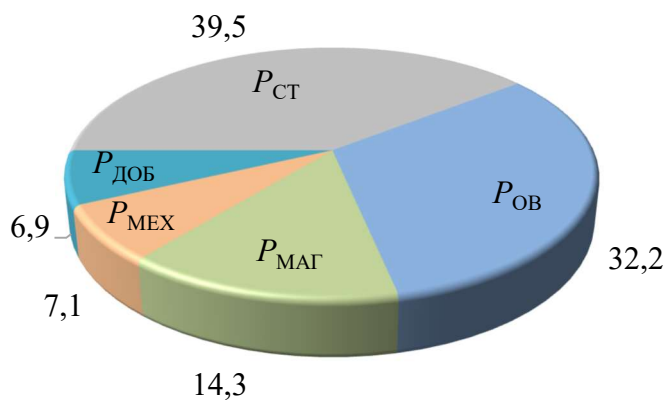


Рис. 4.23. Диаграмма распределения составляющих относительных потерь в схеме векторного управления в электроприводе стана ХПТ-450 на базе синхронного двигателя

На рис. 4.24 приведена диаграмма распределения составляющих относительных потерь в схеме векторного управления в электроприводе стана ХПТ-450 на базе синхронного двигателя по сравнению с существующим на сегодняшний день решением.

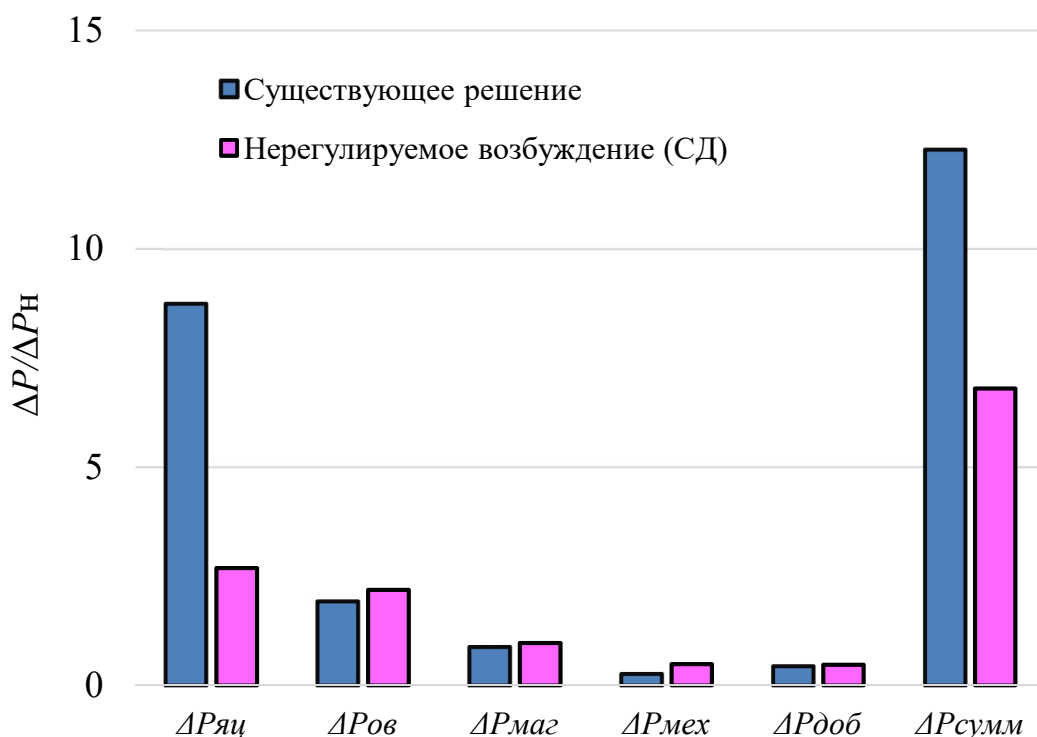


Рис. 4.24. Диаграмма распределения составляющих относительных потерь в схеме векторного управления в электроприводе стана ХПТ-450 на базе синхронного двигателя

Результаты расчета показывают, что суммарные потери в синхронном электроприводе на 45 % ниже по сравнению с существующим на сегодняшний день

день решением (стандартная схема подчиненного регулирования с постоянным током возбуждения). Экономия объясняется значительно меньшими потерями в якоре (34,9 кВт за цикл прокатки, по сравнению с 117,2 кВт в схеме подчиненного регулирования двигателя постоянного тока).

4.2.2. Потери электроэнергии в электроприводе с пропорциональным управлением токами якоря и возбуждения синхронного двигателя

В настоящее время стан ХПТ-450 работает на электроприводе постоянного тока, реализованном по схеме подчиненного регулирования скорости. В публикации [134] обращается внимание на эффективность в плане экономии электроэнергии пропорционального управления потоком и током якоря для механизмов с ударным характером момента статической нагрузки. В работе проведена оценка энергоэффективности реализации данного способа управления применительно к стану ХПТ-450.

На основании технических данных двигателей [3] и с использованием методики, изложенной в [134], была построена зависимость относительных суммарных потерь в электроприводах разного типа (электропривод постоянного тока, синхронный электропривод, электропривод с синхронным реактивным двигателем независимого возбуждения) при пропорциональном управлении потоком и током якоря в функции момента статической нагрузки (см. рис. 4.17, п. 4.1.2).

На первом этапе с использованием обобщенной нагрузочной диаграммы стана ХПТ-450 с учетом полученных зависимостей была определена величина суммарных потерь и их составляющих за цикл прокатки в электроприводах синхронными двигателями для структуры пропорционального управления потоком и током якоря. Но при оценке величины потерь на основании предлагаемого подхода не учитывалось возможное влияние инерционностей цепей возбуждения.

Расчет суммарных потерь и их составляющих за цикл прокатки в

электроприводе на базе синхронного двигателя для стана ХПТ-450 (маршрут 406 – 351) дал следующие результаты: $\Delta P_{\text{ЯЦ}} = 36,4$ кВт; $\Delta P_{\text{ОВ}} = 10,6$ кВт; $\Delta P_{\text{МАГ}} = 8,1$ кВт; $\Delta P_{\text{МЕХ}} = 6,6$ кВт; $\Delta P_{\text{ДОБ}} = 6,4$ кВт; $\Delta P_{\Sigma} = 68,1$ кВт.

Реализованный подход основан на статистических обобщенных зависимостях относительных потерь от момента нагрузки и не учитывает насыщение магнитной системы двигателя, электромагнитную и механическую инерцию электропривода. Данное обстоятельство обуславливает необходимость скорректировать полученные результаты с учетом кривой намагничивания, конкретных переходных процессов в электроприводе, характеризующиеся его типом, особенностями структур и параметров систем управления.

Расчет с учетом принятых допущений проводился на математической модели электропривода стана ХПТ-450 в схеме пропорционального управления потоком и током якоря синхронного двигателя. Модель позволила учесть влияние насыщения магнитной системы двигателя, электромагнитную и механическую инерцию электропривода на величину потерь.

Исходные данные двигателя и кривая намагничивания СДП 320-31-60 были заимствованы из альбома технических данных [3]. Параметры механической части технологического объекта были получены от представителей электротехнических служб ПАО «ЧТПЗ» и приведены в табл. 4.4.

Расчет проводился блоком аналитического расчета потерь, позволяющим в соответствии с уравнениями (см. п. 3.1) на основании полученных кривых переходных процессов выделить составляющие потерь в электроприводе постоянного тока. Такой подход позволил повысить достоверность расчетов в процессе моделирования.

Расчет суммарных потерь и их составляющих за цикл прокатки в электроприводе на базе синхронного двигателя для стана ХПТ-450 (маршрут 406 – 351) с использованием математической модели позволил получить

следующие результаты: $\Delta P_{\text{яц}} = 39,2$ кВт; $\Delta P_{\text{ов}} = 22,6$ кВт; $\Delta P_{\text{маг}} = 9,5$ кВт; $\Delta P_{\text{мех}} = 6,3$ кВт; $\Delta P_{\text{доб}} = 6,6$ кВт; $\Delta P_{\Sigma} = 84,2$ кВт.

Эффект энергосбережения в системе пропорционального управления потоком и током якоря управления проявляется в том, чтобы электропривод работал при нагрузках, соответствующих крайним участкам графика $\Delta P/P_n = f(M)$. Тогда в режиме холостого хода полнее используется минимизация постоянных потерь в электроприводе, а при перегрузках меньше сказываются среднеквадратичные потери от тока в якорной цепи.

На рис. 4.25 приведена диаграмма распределения составляющих относительных потерь в электроприводе пропорционального управления потоком и током якоря стана ХПТ-450 на базе синхронного двигателя по сравнению с существующим на сегодняшний день решением.

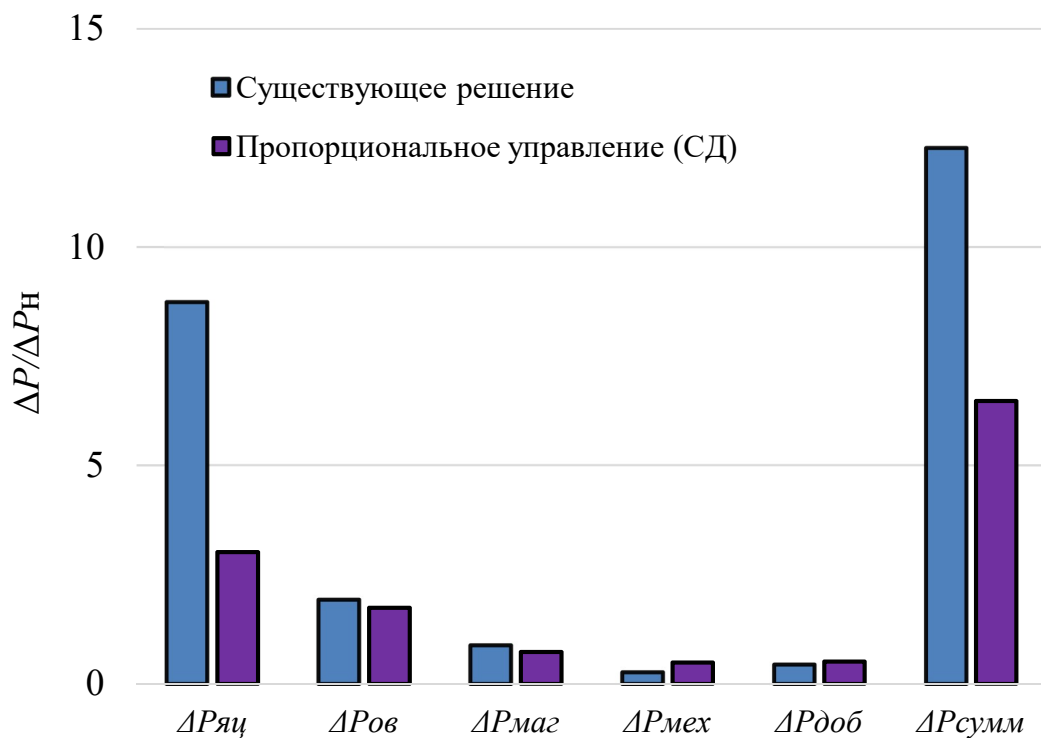


Рис. 4.25. Диаграмма распределения составляющих относительных потерь в электроприводе пропорционального управления потоком и током якоря стана ХПТ-450 на базе синхронного двигателя

Показано, что для электропривода стана ХПТ-450 пропорциональное управление потоком и током якоря относительно существующего на сегодняшний день решения в плане экономии электроэнергии не имеет преимуществ перед стандартной схемой векторного управления.

Полученные в результате расчета величины отличаются от значений предварительного анализа, основанного на среднеквадратичных оценках потерь за цикл прокатки. Расхождения обусловлены, в первую очередь, учетом влияния инерционности цепи возбуждения, которая заставляет электропривод все время рабочего цикла оставаться в средней части диапазона кривых $\Delta P/P_n = f(M)$, где разные способы управления с точки зрения энергосбережения почти равноценны. Наиболее выразительно данное обстоятельство может проявляться в тех случаях, когда постоянная времени обмотки возбуждения двигателя $T_{ОВ}$ и постоянная времени рабочего цикла прокатки $T_{Ц}$ между собой близки.

4.3. Потери в электроприводе с прокатными синхронными реактивными двигателями независимого возбуждения

На основании полученных в главе 2 регрессионных зависимостей, в основу которых положены особенности конструкции и функционирования существующих электроприводов прокатных станов с тихоходными синхронными и двигателями постоянного тока, синхронный реактивный двигатель независимого возбуждения имеет наименьшие суммарные потери из рассматриваемых в работе типов электромеханических преобразователей (см. рис. 2.10). В данном пункте определялись за каждый цикл прокатки $T_{Ц}$ суммарные потери электроэнергии и их составляющие, и сопоставлялись по критерию энергетической эффективности возможные структуры системы управления. Основные параметры стана приведены в главе 1 (пп. 1.1 и 1.2), функциональная схема электропривода с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения в главе 3 (п. 3.1).

4.3.1. Потери электроэнергии в электроприводе с нерегулируемым возбуждением двигателя

На первом этапе проводилась оценка энергоэффективности синхронного реактивного электропривода независимого возбуждения для структуры с поддержанием постоянства потока. Суммарные потери электроэнергии и их составляющие определялись с использованием разработанной в главе 3 математической модели (см. п. 3.1). Расчет проводился с использованием весовых коэффициентов составляющих потерь, полученных при выполнении регрессионного анализа (см. п. 2.2 в главе 2). В табл. 4.1 (п. 4.1.1) приведены численные значения параметров нагрузочных диаграмм различных маршрутов прокатки для рассматриваемых типов станов, полученные от представителей электротехнических служб ПАО «ЧТПЗ» и используемые нами при количественной оценке экономии электроэнергии.

С использованием обобщенной нагрузочной диаграммы стана ХПТ-450 с учетом полученных зависимостей была определена величина суммарных потерь и их составляющих за цикл прокатки в синхронном реактивном электроприводе независимого возбуждения.

Расчет суммарных потерь и их составляющих за цикл прокатки в электроприводе на базе синхронного реактивного двигателя независимого возбуждения для стана ХПТ-450 при постоянном потоке (маршрут 406 – 351) на основании обобщенных зависимостей позволил получить следующие результаты: $\Delta P_{\text{Я}} = 38,8$ кВт; $\Delta P_{\text{ОВ}} = 0$ кВт; $\Delta P_{\text{МАГ}} = 13,9$ кВт; $\Delta P_{\text{МЕХ}} = 6,5$ кВт; $\Delta P_{\text{ДОБ}} = 6,9$ кВт; $\Delta P_{\Sigma} = 66,1$ кВт.

Реализованный подход основан на статистических обобщенных зависимостях относительных потерь от момента нагрузки и не учитывает насыщение магнитной системы двигателя, электромагнитную и механическую инерцию электропривода. Данное обстоятельство обуславливает необходимость скорректировать полученные результаты с учетом кривой

намагничивания, конкретных переходных процессов в электроприводе, характеризующихся его типом, особенностями структур и параметров систем управления.

Расчет с учетом принятых допущений проводился на математической модели электропривода стана ХПТ-450 в схеме с поддержанием постоянства потока с синхронным реактивным двигателем независимого возбуждения. Модель позволила учесть влияние насыщения магнитной системы двигателя, электромагнитную и механическую инерцию электропривода на величину потерь. Синхронный реактивный двигатель независимого возбуждения был выполнен в статоре синхронного двигателя СДП 320-31-60, геометрические размеры, необходимые для расчета технические данные, кривая намагничивания были заимствованы из альбома технических данных [3]. Параметры механической части технологического объекта были получены от представителей электротехнических служб ПАО «ЧТПЗ» и приведены в табл. 4.5.

Таблица 4.5

Исходные данные для математического моделирования синхронного реактивного электропривода независимого возбуждения

	Тип	Параметр	Обозначение, ед. изм.	Значение
Двигатель	СДП 320-31-60	Число пазов статора	Z_1	324
		Активное сопротивление фазы при 15 °С	$R_{\text{ф}}$, Ом	0,328
		Размер провода	$l_{\text{пр}} \times h_{\text{пр}}$, мм x мм	1,68 x 6,8
		Внешний диаметр статора	$D_{\text{внеш}}$, мм	5600
		Внутренний диаметр статора	$D_{\text{внутр}}$, мм	3940
		Полная длина активного железа	l , мм	310
		Воздушный зазор	δ , мм	5
Датчики	–	Коэф. датчика скорости	$K_{\text{дс}}$, В·с/рад	2,2

Регуляторы	Пропорционально-интегральный регулятор скорости	Коэф. пропорционального канала	K_{pc}	2
		Постоянная времени интегрального канала	T_{pc}	1
	Пропорционально-интегральный регулятор тока фазы	Коэф. пропорционального канала	K_{pt}	0,25
		Постоянная времени интегрального канала	T_{pt}	3
КШМ	–	Радиус кривошипа	$R_{кр}$, м	0,61
		Длина шатуна	$L_{ш}$, м	4,61
		Дезаксиал	e , м	0,06
БФНД	–	Радиус прокатных валков	R_v , м	0,67
		Момент прокатки при прямом ходе клетки	$M_{пр}$, кНм	443
		Момент прокатки при обратном ходе клетки	$M_{обр}$, кНм	310
		Момент холостого хода	$M_{хх}$, кНм	66,5

На рис. 4.26 и 4.27 приведены осциллограммы переходных процессов в синхронном реактивном электроприводе независимого возбуждения, полученные с использованием математической модели, реализованной в программе *Ansys Simplorer/Maxwell* (см. п. 3.1). Здесь представлены зависимости тока фазы статора, моментов статической нагрузки и двигателя, угловой скорости вращения от времени. Расчет проводился блоком аналитического расчета потерь, позволяющим в соответствии с уравнениями (см. п. 3.1) на основании полученных кривых переходных процессов выделить составляющие потерь в синхронном реактивном электроприводе независимого возбуждения. Такой подход позволил повысить достоверность расчетов в процессе моделирования. Расчет суммарных потерь и их составляющих за цикл прокатки в схеме с поддержанием постоянства потока в электроприводе на базе синхронного реактивного двигателя независимого возбуждения для стана ХПТ-450 (маршрут 406 – 351) с использованием математической модели позволил получить следующие результаты: $\Delta P_{ЯЦ} = 38$ кВт; $\Delta P_{ОВ} = 0$ кВт; $\Delta P_{МАГ} = 14,3$ кВт; $\Delta P_{МЕХ} = 6,3$ кВт; $\Delta P_{ДОБ} = 6,7$ кВт; $\Delta P_{\Sigma} = 65,3$ кВт.

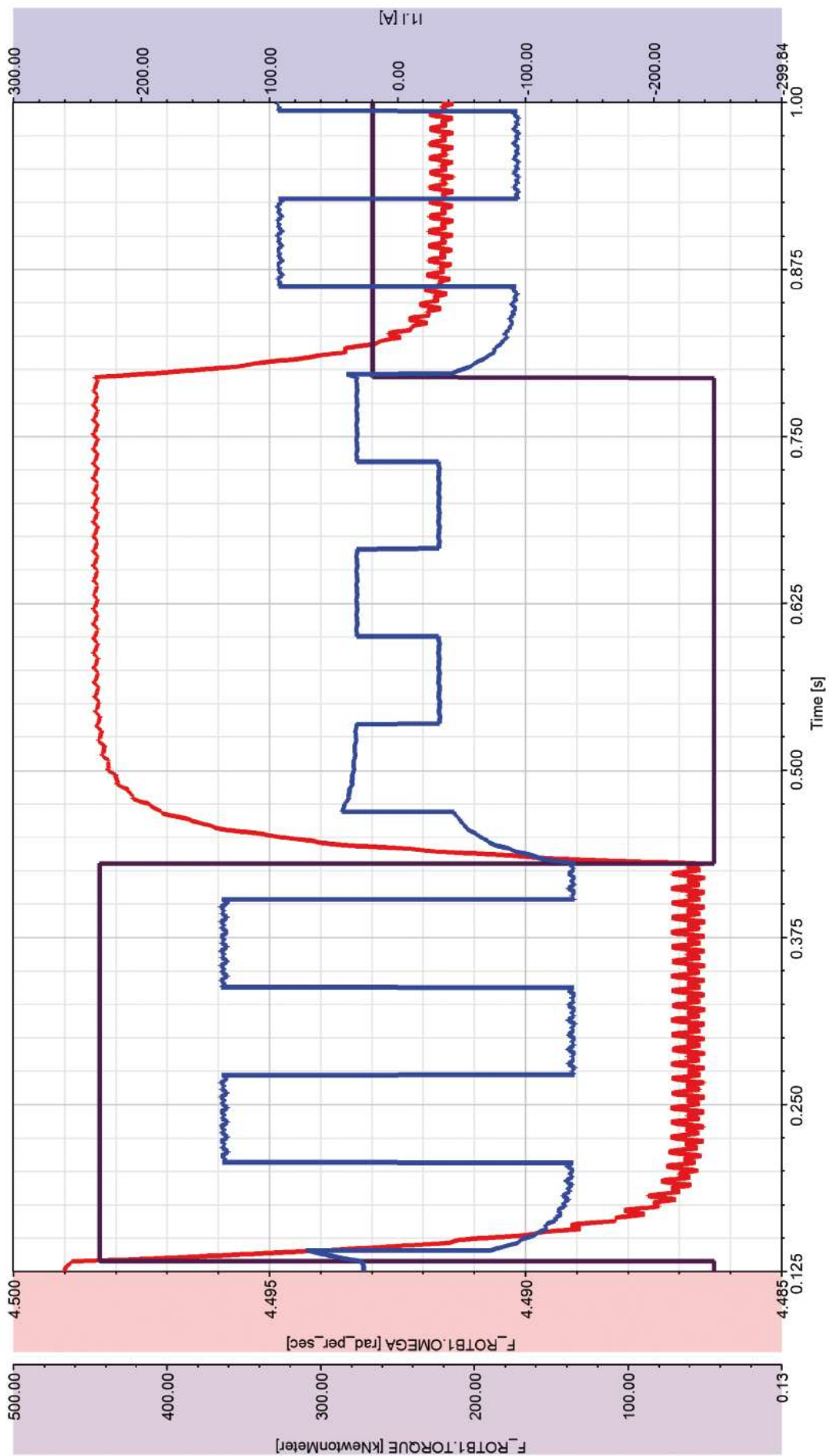


Рис. 4.26. Переходные процессы в электроприводе стана ХПТ-450 на базе синхронного реактивного двигателя независимого возбуждения

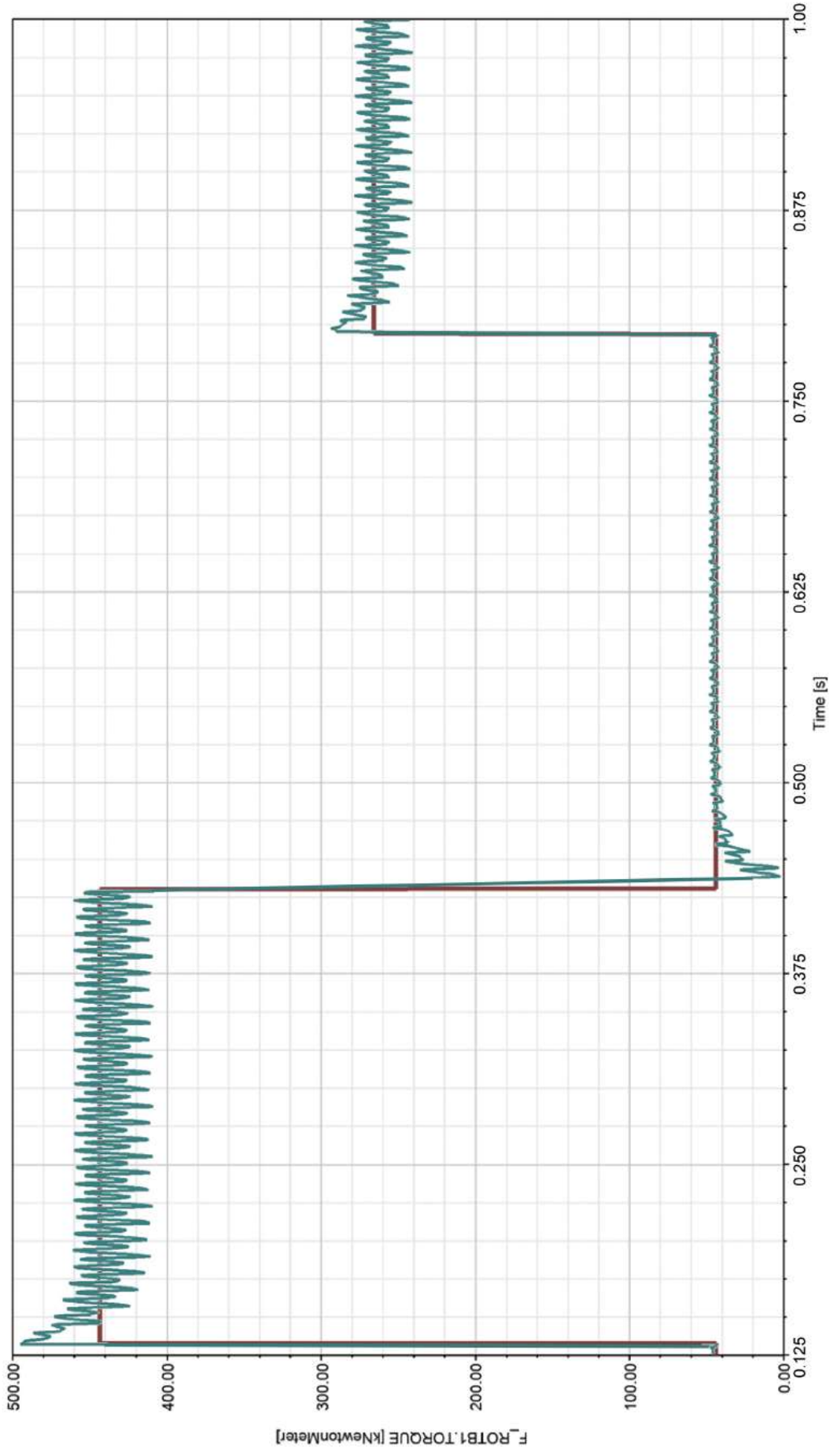


Рис. 4.27. Переходные процессы в электроприводе стана ХПТ-450 на базе синхронного реактивного двигателя независимого возбуждения

Полученные величины отличаются от значений предварительного анализа, основанного на среднеквадратичных оценках потерь за цикл прокатки. Расхождения обусловлены учетом при математическом моделировании кривой намагничивания, инерционностей обмоток и механической части электропривода. На рис. 4.28 приведена соответствующая диаграмма распределения составляющих относительных потерь в схеме с поддержанием постоянства потока в электроприводе стана ХПТ-450 на базе синхронного реактивного двигателя независимого возбуждения. В данном

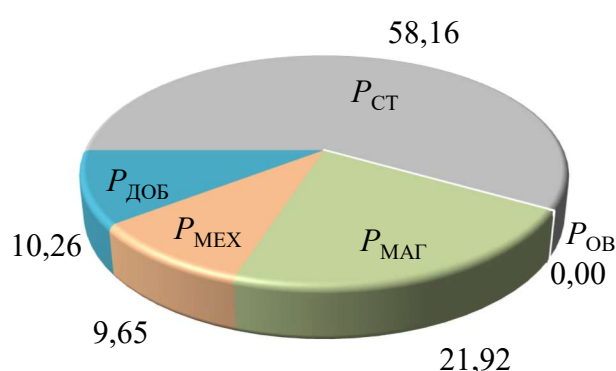


Рис. 4.28 Диаграмма распределения составляющих относительных потерь в схеме с поддержанием постоянства потока в электроприводе стана ХПТ-450 на базе синхронного реактивного двигателя независимого возбуждения

случае составляющие приведены в процентах относительно суммарных потерь.

Следует обратить внимание на отсутствие составляющей потерь на возбуждение в синхронном реактивном двигателе независимого возбуждения (рис. 4.28). На рис. 4.29 приведена диаграмма распределения составляющих относительных потерь в рассматриваемом электроприводе. Результаты расчета показывают, что суммарные потери в синхронном реактивном электроприводе независимого возбуждения на 59 % ниже по сравнению с существующим на сегодняшний день решением (стандартная схема подчиненного регулирования на базе двигателя постоянного тока с постоянным током возбуждения). Экономия объясняется значительно меньшими электрическими потерями (38 кВт за цикл прокатки, по сравнению с 117,2 кВт в схеме подчиненного регулирования двигателя постоянного тока), а также полным отсутствием составляющей потерь на возбуждение.

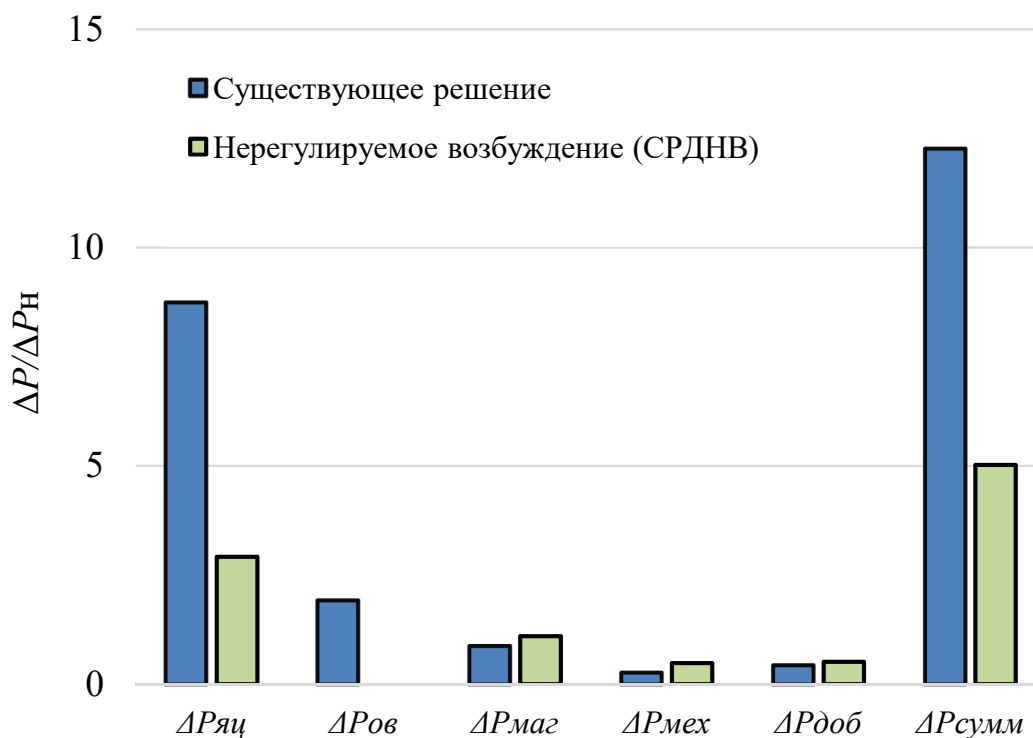


Рис. 4.29. Диаграмма распределения составляющих относительных потерь в схеме с поддержанием постоянства потока в электроприводе стана ХПТ-450 на базе синхронного реактивного двигателя независимого возбуждения

4.3.2. Потери электроэнергии в электроприводе с пропорциональным управлением токами якоря и возбуждения

В публикации [134] обращается внимание на эффективность в плане экономии электроэнергии пропорционального управления потоком и током якоря для механизмов с ударным характером момента статической нагрузки. В работе проведена оценка энергоэффективности реализации данного способа управления применительно к стану ХПТ-450.

На первом этапе с использованием обобщенной нагрузочной диаграммы стана ХПТ-450 с учетом полученных зависимостей была определена величина суммарных потерь и их составляющих за цикл прокатки в синхронном

реактивном электроприводе независимого возбуждения при пропорциональном управлении потоком и током якоря. Но при оценке величины потерь на основании предлагаемого подхода не учитывалось возможное влияние инерционностей цепей возбуждения.

Расчет суммарных потерь и их составляющих за цикл прокатки в электроприводе на базе синхронного реактивного двигателя независимого возбуждения для стана ХПТ-450 при пропорциональном управлении потоком и током якоря (маршрут 406 – 351) дал следующие результаты: $\Delta P_{\text{ЯЦ}} = 17,9$ кВт; $\Delta P_{\text{ОВ}} = 0$ кВт; $\Delta P_{\text{МАГ}} = 12,8$ кВт; $\Delta P_{\text{МЕХ}} = 6,3$ кВт; $\Delta P_{\text{ДОБ}} = 6,0$ кВт; $\Delta P_{\Sigma} = 43$ кВт.

Реализованный подход основан на статистических обобщенных зависимостях относительных потерь от момента нагрузки и не учитывает насыщение магнитной системы двигателя, электромагнитную и механическую инерцию электропривода. Данное обстоятельство обуславливает необходимость скорректировать полученные результаты с учетом кривой намагничивания, конкретных переходных процессов в электроприводе, характеризующиеся его типом, особенностями структур и параметров систем управления.

Расчет с учетом принятых допущений проводился на математической модели электропривода стана ХПТ-450 в схеме пропорционального управления потоком и током якоря синхронного реактивного двигателя независимого возбуждения (рис. 3.7). Модель позволила учесть влияние насыщения магнитной системы двигателя, электромагнитную и механическую инерцию электропривода на величину потерь.

Исходные данные двигателя и кривая намагничивания СДП 320-31-60 были заимствованы из альбома технических данных [3]. Параметры механической части технологического объекта были получены от представителей электротехнических служб ПАО «ЧТПЗ» и приведены в табл. 4.5.

Расчет проводился с помощью узла определения составляющих потерь в среде *Ansys Maxwell*, позволяющим в соответствии с уравнениями (см. п. 3.1) на основании полученных кривых переходных процессов выделить составляющие потерь в электроприводе с СРДНВ. Такой подход позволил повысить достоверность расчетов в процессе моделирования. Расчет суммарных потерь и их составляющих за цикл прокатки в электроприводе на базе синхронного реактивного двигателя независимого возбуждения для стана ХПТ-450 (маршрут 406 – 351) с использованием математической модели позволил получить следующие результаты: $\Delta P_{\text{яц}} = 18,7$ кВт; $\Delta P_{\text{ОВ}} = 0$ кВт; $\Delta P_{\text{МАГ}} = 13,3$ кВт; $\Delta P_{\text{МЕХ}} = 6,3$ кВт; $\Delta P_{\text{ДОБ}} = 6,1$ кВт; $\Delta P_{\Sigma} = 44,4$ кВт.

Эффект энергосбережения в системе пропорционального управления потоком и током якоря управления проявляется в том, чтобы электропривод работал при нагрузках, соответствующих крайним участкам графика $\Delta P/P_n = f(M)$. Тогда в режиме холостого хода полнее используется минимизация постоянных потерь в электроприводе, а при перегрузках меньше сказываются среднеквадратичные потери от тока в якорной цепи.

На рис. 4.30 приведена диаграмма распределения составляющих относительных потерь в электроприводе пропорционального управления потоком и током якоря стана ХПТ-450 на базе синхронного реактивного двигателя независимого возбуждения по сравнению с существующим на сегодняшний день решением. Показано, что для электропривода стана ХПТ-450 пропорциональное управление потоком и током якоря относительно существующего на сегодняшний день решения имеет значительное преимущество в плане экономии электроэнергии (суммарные потери в электроприводе снижаются на 72 %). Дополнительная экономия по сравнению со схемой управления при постоянном потоке объясняется тем обстоятельством, что в режиме холостого хода полнее используется минимизация постоянных потерь в электроприводе, а при перегрузках меньше сказываются среднеквадратичные потери от тока в якоре.

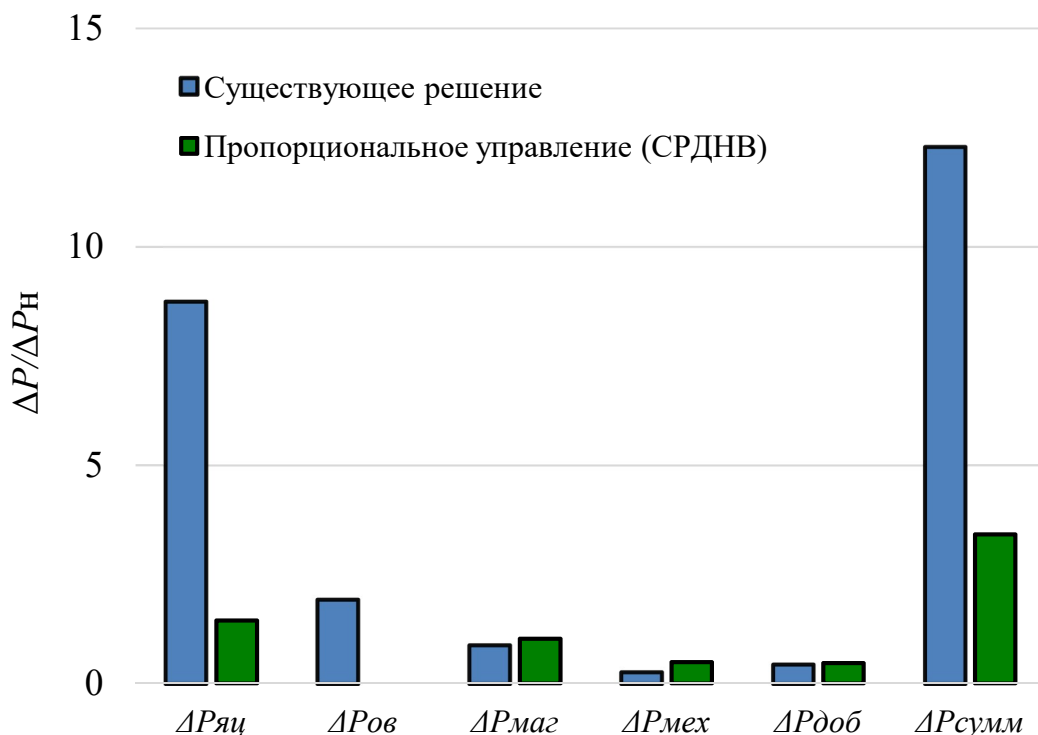


Рис. 4.30. Диаграмма распределения составляющих относительных потерь в электроприводе пропорционального управления потоком и током якоря стана ХПТ-450 на базе синхронного реактивного двигателя независимого возбуждения

Полученные в результате расчета величины отличаются от значений предварительного анализа, основанного на среднеквадратичных оценках потерь за цикл прокатки. Расхождения обусловлены наличием инерционности цепи возбуждения. Следует обратить внимание, что в электроприводе с синхронным реактивным двигателем независимого возбуждения функцию создания потока выполняет якорная обмотка, которая имеет относительно малое значение постоянной времени. За счет этого электропривод все время рабочего цикла работает в необходимом диапазоне кривой $\Delta P/P_n = f(M)$, позволяя пропорциональному управлению потоком и током якоря раскрыть себя в полной мере с точки зрения энергосбережения.

4.3.3. Сравнительный анализ величины потерь в моделируемых электроприводах пилигримовых станов

Для трубопрокатных агрегатов пилигримовой группы характерна существенная неравномерность момента нагрузки, моделирование проводилось на основании обобщенной нагрузочной диаграммы (рис. 1.8), что позволило сопоставить энергоэффективность рассматриваемых типов электроприводов и законов управления (рис. 4.31). 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).

Для электропривода постоянного тока рассматривались следующие способы экономии электроэнергии: применение маховичного привода, смягчение механической характеристики, предварительное ослабление поля перед прокаткой, пропорциональное управление потоком и током якоря. Относительно существующего решения подробный сравнительный анализ составляющих потерь проводился в соответствующих пунктах 4.1.1-4.1.2.

Максимального эффекта экономии электроэнергии в электроприводе постоянного тока стана ХПТ-450 удастся достигнуть смягчением механической характеристики. Суммарные потери при этом по сравнению с существующим решением снижаются на 16 % за счет уменьшения среднеквадратичного тока в якорной цепи. Следует обратить внимание, что при этом снижается средняя скорость прокатки, а следовательно, и производительность стана.

Для синхронного электропривода рассматривались следующие способы экономии электроэнергии: стандартная схема векторного управления и пропорциональное управление потоком и током якоря. Относительно существующего решения подробный сравнительный анализ составляющих

потерь проводился в соответствующих пунктах 4.2.1-4.2.2.

Эффект экономии электроэнергии в синхронном электроприводе стана ХПТ-450 при рассмотренных способах управления практически одинаков. Суммарные потери при этом по сравнению с существующим решением снижаются на 45-47 %. В данном случае относительная экономия электроэнергии объясняется более высоким КПД синхронного двигателя.

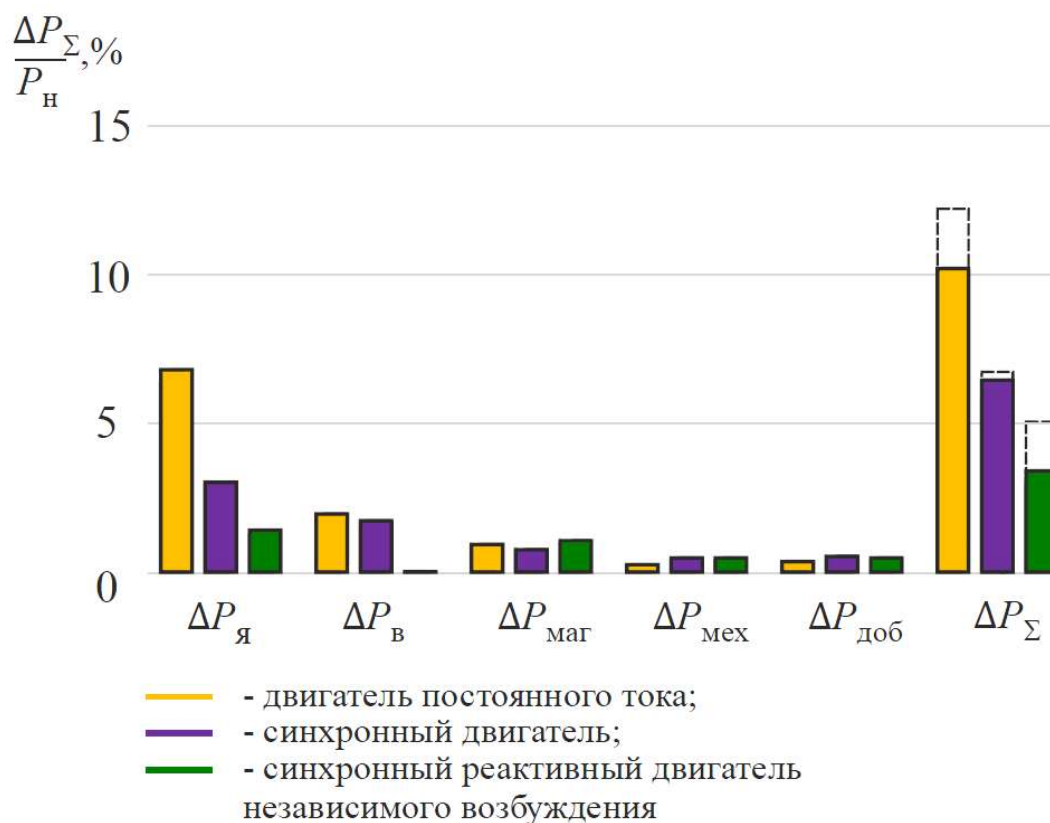


Рис. 4.31. Диаграмма распределения суммарных относительных потерь в рассматриваемых электроприводах главного привода стана ХПТ-450 при разных способах экономии электроэнергии

В схеме с регулированием по потоку в синхронном электроприводе значительной экономии электроэнергии добиться не удастся. Данное обстоятельство объясняется значительной постоянной времени обмотки возбуждения относительно времени рабочего цикла прокатки, что не позволяет с необходимым быстродействием регулировать поток. Экономия электрической энергии за счет выбора оптимального графика изменения

магнитного потока оказывается очень незначительной и, учитывая неизбежное усложнение схемы, от воздействия по потоку в синхронном двигателе следует отказаться.

Для синхронного реактивного электропривода независимого возбуждения рассматривались следующие способы экономии электроэнергии: схема с нерегулируемым возбуждением и пропорциональное управление потоком и током якоря. Относительно существующего решения подробный сравнительный анализ составляющих потерь проводился в соответствующих пунктах 4.3.1-4.3.2.

Наибольшего эффекта экономии электроэнергии в синхронном реактивном электроприводе независимого возбуждения стана ХПТ-450 при рассмотренных способах управления удается добиться в схеме пропорционального управления потоком и током якоря. Суммарные потери при этом по сравнению с существующим решением снижаются на 72 %. Способ управления, основанный на выборе оптимального графика изменения магнитного потока в синхронном реактивном электроприводе независимого возбуждения, обеспечивает наилучшие показатели с позиции энергоэффективности.

4.4. Экономические показатели энергоэффективности для станов пилигримовой группы

В табл. 4.6 приведены результаты расчета экономических показателей для стана ХПТ-450 при различных технических решениях повышения энергоэффективности. Экономический эффект оценивался в руб. за год работы стана.

Для стана ХПТ-450 наилучших результатов в плане экономии электроэнергии удается добиться в схеме пропорционального управления потоком и током якоря синхронным реактивным двигателем независимого возбуждения (см. табл. 4.6). Годовая экономия составила порядка 2,5 млн руб.

Экономические показатели для стана ХПТ-450 при различных технических решениях
повышения энергоэффективности

Технологический объект	Техническое решение	$\Delta W_{\text{ээ}}$, кВт * ч/год	Экономический эффект, руб./год
Стан ХПТ-450	Двигатель постоянного тока, маховичный привод	78 563	329 964
	Двигатель постоянного тока, смягчение механической характеристики	131 105	550 640
	Двигатель постоянного тока, предварительное ослабление поля	27 022	113 491
	Двигатель постоянного тока, пропорциональное управление	15 512	65 152
	Синхронный двигатель, векторное регулирование	355 284	1 492 193
	Синхронный двигатель, пропорциональное управление	376 301	1 580 463
	СРДНВ, схема с поддержанием постоянства потока	470 876	1 977 681
	СРДНВ, пропорциональное управление	575 460	2 416 932

Для прошивного стана наилучших результатов в плане экономии электроэнергии удастся добиться также в схеме пропорционального управления потоком и током якоря синхронных реактивным двигателем независимого возбуждения (см. табл. 4.7).

Годовая экономия составила порядка 4,8 млн руб. Однако, применительно к этому стану следует обратить внимание на следующие обстоятельства. Способы повышения энергоэффективности, основанные на использовании энергии маховых масс электропривода, практически не раскрывают своего потенциала. Это связано со значительным временем рабочего цикла прошивного стана (сотни секунд). Но в то же время данное обстоятельство обеспечивает более высокие показатели экономии в схемах с регулированием потока, так как относительное время постоянных времени обмоток возбуждения значительно меньше времени рабочего цикла.

Таблица 4.7

Экономические показатели для прошивного стана при различных технических решениях
повышения энергоэффективности

Технологический объект	Техническое решение	$\Delta W_{\text{ээ}}$, кВт * ч/год	Экономический эффект, руб./год
Прошивной стан	Двигатель постоянного тока, маховичный привод	30 667	128 801
	Двигатель постоянного тока, смягчение механической характеристики	65 291	274 221
	Двигатель постоянного тока, предварительное ослабление поля	32 645	137 110
	Двигатель постоянного тока, пропорциональное управление	332 176	1 395 140
	Синхронный двигатель, векторное регулирование	719 859	3 023 408
	Синхронный двигатель, пропорциональное управление	918 837	3 859 117
	СРДНВ, схема с поддержанием постоянства потока	940 576	3 950 420
	СРДНВ, пропорциональное управление	1 143 350	4 802 071

Таблица 4.8

Экономические показатели для пильгерстана при различных технических решениях
повышения энергоэффективности

Технологический объект	Техническое решение	$\Delta W_{\text{ээ}}$, кВт * ч/год	Экономический эффект, руб./год
Пильгерстан	Двигатель постоянного тока, маховичный привод	155 313	652 313
	Двигатель постоянного тока, смягчение механической характеристики	259 184	1 088 573
	Двигатель постоянного тока, предварительное ослабление поля	53 420	224 362
	Двигатель постоянного тока, пропорциональное управление	30 667	128 801
	Синхронный двигатель, векторное регулирование	702 369	2 949 950
	Синхронный двигатель, пропорциональное управление	743 918	3 124 455
	СРДНВ, схема с поддержанием постоянства потока	930 886	3 909 723
	СРДНВ, пропорциональное управление	1 137 640	4 778 089

Для пильгерстана наилучших результатов в плане экономии электроэнергии удастся добиться в схеме пропорционального управления потоком и током якоря синхронным реактивным двигателем независимого возбуждения (см. табл. 4.8). Годовая экономия составила порядка 4,8 млн руб.

Таким образом, применительно к станам пилигримовой группы наилучшим энергосберегающим решением признается схема с пропорциональным управлением потоком и током якоря синхронным реактивным двигателем независимого возбуждения.

Выводы:

1. Показано, что для электропривода стана ХПТ-450 применение маховика позволяет снизить суммарные потери в электроприводе на 10 %. Следует обратить внимание, что снижение среднеквадратичного тока якоря одномоментно приводит к увеличению механических потерь в электроприводе, в результате уменьшается общий эффект в плане экономии электрической энергии. Вместе с тем проявляются неблагоприятные побочные явления данного способа: резко увеличивается материалоемкость электропривода, растут габариты, увеличиваются потери в подшипниках на трение и трение о воздух, снижается надежность при эксплуатации подшипниковых узлов.

2. Показано, что для электропривода стана ХПТ-450 смягчение механической характеристики двигателя постоянного тока позволяет снизить суммарные потери в электроприводе на 16 %. Заметное снижение среднеквадратичного тока (до 50 %) достигается только при малых частотах среза и значительных просадках скорости, которые в реальных системах допускать нельзя. Наибольшая экономия электрических потерь наблюдается в зоне низких значений K_{PC} , однако при этом значительно уменьшается средняя скорость прокатки, что влечет за собой увеличение времени цикла и, как следствие, снижение производительности стана.

3. В схемах с регулированием по потоку в электроприводе постоянного тока (двухзонное регулирование и пропорциональное управление потоком и током якоря) значительной экономии электроэнергии добиться не удастся. Суммарные потери по сравнению с существующим решением снижаются на 2-3 %. Данное обстоятельство объясняется значительной постоянной времени обмотки возбуждения относительно времени рабочего цикла прокатки, что не позволяет с необходимым быстродействием регулировать поток. Экономия электрической энергии за счет выбора оптимального графика изменения магнитного потока оказывается очень незначительной и, учитывая неизбежное усложнение схемы, от воздействия по потоку в двигателе постоянного тока следует отказаться.

4. Показано, что суммарные потери в синхронном электроприводе на 45 % ниже по сравнению с существующим на сегодняшний день решением (стандартная схема подчиненного регулирования с постоянным током возбуждения). Экономия объясняется значительно меньшими потерями в якоре (34,9 кВт за цикл прокатки, по сравнению с 117,2 кВт в схеме подчиненного регулирования двигателя постоянного тока).

5. Эффект экономии электроэнергии в синхронном электроприводе стана ХПТ-450 в схемах векторного управления и пропорционального управления потоком и током якоря практически одинаков. Суммарные потери при этом по сравнению с существующим решением снижаются на 45-47 % в основном за счет якорной составляющей. Данное обстоятельство объясняется значительной постоянной времени обмотки возбуждения относительно времени рабочего цикла прокатки, что не позволяет с необходимым быстродействием регулировать поток. Экономия электрической энергии за счет выбора оптимального графика изменения магнитного потока оказывается очень незначительной и, учитывая неизбежное усложнение схемы, от воздействия по потоку в синхронном двигателе следует отказаться.

6. Показано, что суммарные потери в синхронном реактивном электроприводе независимого возбуждения на 59 % ниже по сравнению с существующим на сегодняшний день решением (стандартная схема подчиненного регулирования на базе двигателя постоянного тока с постоянным током возбуждения). Экономия объясняется значительно меньшими потерями в якоре (38 кВт за цикл прокатки, по сравнению с 117,2 кВт в схеме подчиненного регулирования двигателя постоянного тока), а также полным отсутствием составляющей потерь на возбуждение.

7. Показано, что для электропривода стана ХПТ-450 пропорциональное управление потоком и током якоря в синхронном реактивном двигателе независимого возбуждения относительно существующего на сегодняшний день решения имеет значительное преимущество в плане экономии электроэнергии (суммарные потери в электроприводе снижаются на 72 %). Дополнительная экономия по сравнению со схемой управления при постоянном потоке объясняется тем обстоятельством, что в режиме холостого хода полнее используется минимизация постоянных потерь в электроприводе, а при перегрузках меньше сказываются среднеквадратичные потери от тока в якоре. Способ управления, основанный на выборе оптимального графика изменения магнитного потока в синхронном реактивном электроприводе независимого возбуждения, обеспечивает наилучшие показатели с позиции энергоэффективности.

Экономия электрической энергии в электроприводе с синхронным реактивным двигателем независимого возбуждения достигается, во-первых, за счет конструктивного отсутствия обмотки возбуждения, и как следствие, соответствующей составляющей потерь. Во-вторых, в электроприводе с СРДНВ, где воздействие на поток возбуждения осуществляется обмоткой якоря, которая практически безынерционна, возможны любые способы управления потоком. При этом наилучшие результаты дает пропорциональное управление возбуждением и током якоря.

8. Способы повышения энергоэффективности применительно к прошивному стану, основанные на использовании энергии маховых масс электропривода, практически не раскрывают своего потенциала. Это связано со значительным временем рабочего цикла прошивного стана (сотни секунд). Но в то же время данное обстоятельство обеспечивает более высокие показатели экономии в схемах с регулированием потока, так как относительное время постоянных времени обмоток возбуждения значительно меньше времени рабочего цикла.

Заключение

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.

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.

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.

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 $t_{\text{крит}} = 2,04$.

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.

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.

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.

Литература

1. Адамия, Р.Ш. Анализ конструкций подающе-поворотных механизмов станов холодной прокатки труб / Р.Ш. Адамия // Труды ВНИИМЕТМАШ: сб. науч. тр. №7. – М.: Отдел научно-технической информации и оформления, 1963. – С. 243-263.
2. Азимов, И.К. Оптимальные параметры автоматизированных позиционных приводов / И.К. Азимов, Н.Н. Дружинин // Автоматизированный электропривод. Под общ. ред. И.И. Петрова, М.М. Соколова, М.Г. Юнькова. – М.: Энергия, 1980. – С. 25-30.
3. Альбом технических данных индивидуальных электрических машин для приводов прокатных станов: вторая редакция / под ред. А.И. Шейнмана. М.: ГПИ «Тяжпромэлектропроект», 1968. – 363 с.
4. Андриюшин, И.Ю. Автоматическая коррекция скоростей электроприводов клетей стана 2000 при прокатке трубной заготовки / И.Ю. Андриюшин, В.В. Галкин, В.В. Головин, А.С. Карандаев, А.А. Радионов, В.Р. Храмшин // Изв. вузов. Электромеханика. – 2011. – № 4. – С. 31-35.
5. Аптер, Э.М. Мощные управляемые выпрямители для электроприводов постоянного тока / Э.М. Аптер, Г.Г. Жемеров, И.И. Левитан, А.Г. Элькин. – М.: Энергия, 1975. – 208 с.
6. Бальд, В. Новые системы, тренды и ориентированные на будущее технологии: Отраслевой доклад "УНРС и прокатные установки" // SMS Schloemann-Siemag Aktiengesellschaft, 1995. – 12 с.
7. Белоусов, Е.В. Математическая модель электропривода с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения / Е.В. Белоусов, А.М. Журавлев, А.Е. Бычков, В.Л. Кодкин, С.П. Гладышев // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика, 2012. – № 37 (296). – С. 34-37.

8. Белоусов, Е.В. Электропривод механизма подачи стана холодной прокатки труб с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения: Дис. - канд. техн. наук: Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы. – Челябинск, 2014. – 140 с.

9. Беспалов, В.Я. Основные направления совершенствования конструкций и технологии производства асинхронных двигателей / В.Я. Беспалов, Л.Н. Макаров // Сборник материалов V Международной (16 Всесоюзной) конференции по автоматизированному электроприводу: 18–21 сентября 2007 г. Санкт-Петербург. – 2007. – С. 32-36.

10. Беспалов, В.Я. Перспективы создания отечественных электродвигателей нового поколения для частотно-регулируемого электропривода / В.Я. Беспалов // Автоматизированный электропривод в XXI веке: пути развития: тр. IV Международной (XV Всероссийской) конф. по автоматизированному электроприводу (АЭП–2004, Магнитогорск, 14–17 сент. 2004 г.). – Магнитогорск, 2004. – Ч. 1. – С. 24-31.

11. Беспалов, В.Я. Разработка и освоение асинхронных электродвигателей энергоэффективной серии 7AVE: некоторые итоги и дальнейшие задачи / В.Я. Беспалов, А.С. Кобелев, О.В. Кругликов, Л.Н. Макаров // тр. VIII Международной (XVIII Всероссийской) конф. по автоматизированному электроприводу (АЭП–2012). – Иваново, 2012. – С. 13-16.

12. Беспалов, В.Я. Электрические двигатели в XXI веке / В.Я. Беспалов // Тр. III Международной (XIV Всероссийской) науч.-техн. конф. по автоматизированному электроприводу “ЭАП–2001” / под. ред. С.В. Хватова. – Н. Новгород: Вектор-ТиС, 2001. – С. 17-19.

13. Борисов, В.А. О выборе напряжения и мощности силового трансформатора для вентильного преобразователя, питающего электродвигатель постоянного тока / В.А. Борисов // Электротехника, 1973. – № 16. – С. 12.

14. Боровик, А.А. Многодвигательный электропривод для стана холодной прокатки труб: Дис. – канд. техн. наук: Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы. – Москва, 2011. – 94 с.
15. Боровик, А.А. Многодвигательный электропривод стана холодной прокатки труб / А.А. Боровик // Электротехника. – 2010. №3 – С. 20-25.
16. Борцов, Ю.А. Тиристорные системы электропривода с упругими связями / Ю.А. Борцов, Г.Г. Соколовский. – Л: Энергия, 1979. – 156 с.
17. Бражников В.Ф., Соустин Б.П. Теория установившихся электромагнитных процессов в многофазном асинхронном инверторном электроприводе: в 2-х ч. Ч.І.: Многофазные асинхронные двигатели. – Красноярск: Изд-во Краснояр. ун-та, 1984. – 177 с.
18. Бражников В.Ф., Соустин Б.П. Теория установившихся электромагнитных процессов в многофазном асинхронном инверторном электроприводе: в 2-х ч. Ч.ІІ.: Многофазные асинхронные двигатели. – Красноярск: Изд-во Краснояр. ун-та, 1984. – 177 с.
19. Браславский, И. Я. Энергетическая эффективность законов скалярного частотного управления асинхронным электроприводом / И. Я. Браславский [и др.] // Электротехника. 2012. – № 9. – С. 44-47.
20. Браславский, И.Я. Математические модели для определения энергопотребления различными типами асинхронных электроприводов и примеры их использования / И.Я. Браславский, Ю.В. Плотников // Электротехника. 2005. – № 9. – С. 14-18.
21. Браславский, И.Я. Энергосберегающий асинхронный электропривод: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / И.Я. Браславский, З.Ш. Ишматов, В.Н. Поляков; под ред. И.Я. Браславского. – М.: Издательский центр “Академия”, 2004. – 256 с.
22. Булгаков, А.А. Частное управление асинхронными электродвигателями / А.А. Булгаков. – 2-е изд., доп. – М.: Наука, 1966. – 297 с.

23. Бурьянов, В.Ф. Расчет мощности двигателей главных приводов прокатных станов / В.Ф. Бурьянов, Е.С. Рокотян, А.Е. Гуревич. – М.: Metallurgizdat, 1962. – 360 с.
24. Бычков, А.Е. Система управления электропривода с синхронным реактивным двигателем независимого возбуждения: Дис. - канд. техн. наук: Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы. – Челябинск, 2013. – 125 с.
25. Бычков, В.П. Электропривод и автоматизация металлургического производства: Учеб. пособие для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. школа, 1977. – 392 с.
26. Важнов, И.А. Переходные процессы в машинах переменного тока / И.А. Важнов. – Л.: Энергия. Ленингр. отделение, 1980. – 256 с.
27. Вейнгер, А. М. Метод полузамкнутого управления электроприводами переменного тока / А.М. Вейнгер // Электротехника, – № 9. – 2005. – С. 4-7.
28. Вейнгер, А. М. Перспективы мощных регулируемых электроприводов переменного тока / А.М. Вейнгер // IV Международная (XV Всероссийская) конференция по автоматизированному электроприводу. – 2004, Магнитогорск, С. 32-37.
29. Вейнгер, А.М. Проектирование электроприводов / под. ред. А.М. Вейнгера. – Свердловск.: Средне-Уральское кн. изд-во, 1980. – 160 с.
30. Вейнгер, А.М. Регулируемый синхронный электропривод / А.М. Вейнгер. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 224 с.
31. Вольдек, А.И. Электрические машины / А.И. Вольдек. Учебник для студентов высш. техн. учебн. заведений. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – Л.: Энергия, 1974. – 840 с.
32. Воронько, В.Г. Система автоматизированного управления станом холодной прокатки труб на базе микро-ЭВМ / В.Г. Воронько, П.В. Дубин, В.Е. Иванцов // Сталь. – 1985. – №3. – С. 60-63.

33. Выдрин, В.Н., Федосиенко А.С. Автоматизация прокатного производства / В.Н. Выдрин, А.С. Федосиенко. – М.: Металлургия, 1984. – 472 с.

34. Гарганеев, А.Г. Энергосберегающая модификация векторного управления асинхронного двигателя / А.Г. Гарганеев, А.Т. Яровой, Л.Ю. Бабушкина и др. // Известия Томского политехнического университета. – 2005. №7. – С. 130-134.

35. Герман-Галкин, С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0: Учебное пособие. – СПб.: Корона принт, 2001. – 320 с.

36. Гильдебранд А.Д. К построению итерационного метода расчета закона частотного управления по минимуму тока статора асинхронного двигателя / А.Д. Гильдебранд, В.И. Лихошерст, В.Н. Поляков // Автоматизированный вентильный электропривод: межвуз. сб. науч. тр. ПермПИ. Пермь: ПермПИ, 1988. – С. 12-17.

37. Глазырин, А.С. Математическое моделирование электромеханических систем / А.С. Глазырин // Электротехника, электромеханика и электротехнологии, Томск. – 2011.

38. Головин, В.В. Энергосберегающие тиристорные электроприводы с автоматическим изменением координаты, регулируемой по цепи возбуждения / В.В. Головин, А.С. Карандаев, В.Р. Храмшин // Изв. вузов. Электромеханика. 2006. – № 4. – С. 35-39.

39. Горожанкин, А.Н. Вентильный электропривод с синхронным реактивным двигателем независимого возбуждения: Дис. - канд. техн. наук: Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы. – Челябинск, 2010. – 138 с.

40. Григорьев, М.А. Вентильный электропривод с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения: монография / М.А. Григорьев; под ред. Ю.С. Усынина. – Челябинск: Издательский центр

ЮУрГУ, 2010. – 159 с.

41. Григорьев, М.А. Линейная плотность поверхностного тока в энергосберегающих электроприводах с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения / М.А. Григорьев, А.Е. Бычков // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия “Энергетика”. – 2010. – Вып. 14. – №32(208). – С. 46-51.

42. Григорьев, М.А. Предельные возможности электроприводов с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения / М.А. Григорьев // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия “Энергетика”. – 2009. – Вып. 12. – № 34(167). – С. 51-55.

43. Григорьев, М.А. Синхронный реактивный электропривод с независимым управлением по каналу возбуждения с предельными характеристиками по быстродействию и перегрузочным способностям: дис.- докт.техн.наук: Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы. – Челябинск, 2014. – 315 с.

44. Григорьев, М.А. Система управления электроприводом с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения / М.А. Григорьев // Электротехника. – 2013 – № 10. – С. 29-35.

45. Григорьев, М.А. Системы с переменной структурой для синхронных реактивных электроприводов с независимым управлением по каналу возбуждения / М.А. Григорьев // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия “Энергетика”. – 2013. – Том 13. – №2. – С. 91-96.

46. Григорьев, М.А. Физические основы теории электропривода с синхронным реактивным двигателем независимого возбуждения / М.А. Григорьев // Электротехнические системы и комплексы: Межвуз. сб. науч. тр. – Магнитогорск: Изд-во МГТУ, 2002. – вып. 7. – С. 52-60.

47. Григорьев, М.А. Электропривод с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения / М.А. Григорьев // Изв. вузов. Электромеханика. – 2013. – № 4. – С. 32-36.

48. Григорьев, М.А. Электропривод с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения: дис. - канд. техн. наук / М.А. Григорьев. – Челябинск, 2004. – 138 с.

49. Гриншпун, М.И. Станы холодной прокатки труб / М.И. Гриншпун, В.И. Соколовский – М.: Машиностроение, 1967. – 239 с.

50. Данченко, В.Н. Совершенствование технологии и оборудования для холодной пилигримовой прокатки труб / В.Н. Данченко, Я.В. Фролов, В.Т. Вышинский // Сталь. – 2003. №4. – С. 48-54.

51. Дементьев, Ю.Н. Математическое описание электроприводов переменного тока с вентильным преобразователем в установившемся режиме / Ю.Н. Дементьев // Электричество, 2012. – № 06. – С. 36-42.

52. Дмитриевский, В.А. Высокомоментная вентильно-индукторная реактивная электрическая машина с разделением фаз / В.А. Дмитриевский, В.А. Прахт, Ф.Н. Сарапулов, патент на полезную модель RUS 106460 28.02.2011.

53. Дмитриевский, В.А. Конечноэлементная модель электрической машины с переключением потока для исследования динамических режимов работы / В.А. Дмитриевский, В.А. Прахт, Ф.Н. Сарапулов, В.А. Климарев // Электротехника, 2012. – № 03. – С. 7-13.

54. Дмитриевский, В.А. Математическая модель вентильно-индукторной реактивной электрической машины / В.А. Дмитриевский, В.А. Прахт, Ф.Н. Сарапулов, В.А. Климарев // Наука и образование: электронное научно-техническое издание, 2011. – № 10. – С. 60.

55. Дмитриевский, В.А. Разработка энергоэффективного синхронного реактивного двигателя / В.А. Дмитриевский, В.А. Прахт, В.М. Казакбаев, А.С. Поздеев, С.Х. Ошурбеков // Проблемы повышения эффективности электромеханических преобразователей в электроэнергетических системах. Материалы международной научно-технической конференции. 2015. – С. 26-29.

56. Дружинин, Н.Н. Электрооборудование прокатных станов / Н.Н. Дружинин. – М.: Металлургия, 1956. – 456 с.
57. Дукмасов, В.Г. Состояние и развитие технологий и оборудования черной металлургии: справочное издание / В.Г. Дукмасов, Л.М. Агеев; под ред. Г.П. Вяткина. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2002. – 187 с.
58. Звягинцев, А.М. Расчет настройки прошивных станов / А. М. Звягинцев, А. З. Глейберг // Сталь. – 1951. – № 8. – С. 723-725.
59. Иванов, О.В. Статистика: Учебный курс для социологов и менеджеров. Ч. 1. Описательная статистика. Теоретико-вероятностные основания статистического вывода / О.В. Иванов. – М. 2005. – 187 с.
60. Иванов, О.В. Статистика: Учебный курс для социологов и менеджеров. Ч. 2. Доверительные интервалы / О.В. Иванов. – М. 2005. – 220 с.
61. Ильинский, Н.Ф. Вентильно-индукторный привод для лёгких электрических транспортных средств / Н.Ф. Ильинский, М.Г. Бычков // Электротехника. – 2000. – № 2. – С. 28-31.
62. Ильинский, Н.Ф. Вентильно-индукторный электропривод перед выходом на широкий рынок / Н.Ф. Ильинский // Приводная техника. – 1998. – № 3. – С. 2-5.
63. Ильинский, Н.Ф. Электропривод в современном мире / Н.Ф. Ильинский // Сборник материалов V Международной (16 Всесоюзной) конференции по автоматизированному электроприводу: 18–21 сентября 2007 г. – СПб. 2007. – С. 17-19.
64. Ильинский, Н.Ф. Электропривод: энерго- и ресурсосбережение: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / Н.Ф. Ильинский, В.В. Москаленко. – М.: Издательский центр «Академия», 2008. – 208 с.
65. Ильинский, Н.Ф. Энергосберегающие технические решения в электроприводе. Коллектив авторов / Под ред. Н.Ф. Ильинского. – М.: Моск. энерг. ин-т, 1985. – 64 с.

66. Ишматов, З.Ш. Микропроцессорное управление электроприводами и технологическими объектами. Полиномиальные методы: монография / З.Ш. Ишматов. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2007. – 278 с.

67. Калачев, Ю.Н. Векторное регулирование – заметки практика / Ю.Н. Калачев. – Самиздат, 2012. – 52 с.

68. Карандаев, А.С. Разработка тиристорных электроприводов прокатных станов с улучшенными энергетическими показателями / А.С. Карандаев, А.А. Радионов, В.Р. Храмшин // Отчет о НИР №132405 от 08.04.2005, г. Магнитогорск, МГТУ. 2005. – 98 с.

69. Ключев, В.И. Теория электропривода: учеб. для вузов / В.И. Ключев. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 2001. – 704 с.

70. Ключев, В.И. Электропривод и автоматизация общепромышленных механизмов: учебник для вузов / В.И. Ключев, В.М. Терехов. – М.: Энергия, 1980. – 360 с.

71. Кондратов, Л.А. Конструкция, ремонт и обслуживание станов холодной прокатки труб / Кондратов Л.А., Чечулин Ю.Б., Богданов Н.Т., Макаркин Н.С. – М.: Металлургия, 1994. – 266 с.

72. Копцев, Л.А. Влияние технологических факторов на электропотребление стана холодной прокатки / Л.А. Копцев, Г.В. Никифоров // Сталь, 1997. – №9. – С. 36-37.

73. Копылов, И.П. Математическое моделирование электрических машин: Учеб. для вузов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 2001. – 327 с.

74. Копылов, И.П. Проектирование электрических машин: учебн. для вузов. / И.П. Копылов, Б.К. Клоков, В.П. Морозкин, Б.Ф. Токарев. Под ред. И.П. Копылова. – 4-е изд., перераб. и доп. – Изд. Юрайт, 2011. – 767 с.

75. Корнилов, Г.П. Анализ и оптимизация электрических режимов сверхмощных дуговых сталеплавильных печей / Г.П. Корнилов, А.А. Николаев, Т.Р. Храмшин, Т.Ю. Вахитов // Электрометаллургия. 2013. – № 7. –

С. 2-10.

76. Корнилов, Г.П. Перспективы и средства повышения эффективности дуговых сталеплавильных печей за счёт силового электрооборудования / Г.П. Корнилов, А.А. Николаев, И.А. Якимов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2009. – № 15. – С. 32-38.

77. Корнилов, Г.П. Повышение эффективности работы сверхмощной дуговой сталеплавильной печи / Г.П. Корнилов, А.А. Николаев, Т.Р. Храмшин, А.Н. Шеметов, И.А. Якимов // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2009. – № 1. – С. 55-59.

78. Королев, А.А. Механическое оборудование прокатных цехов / А.А. Королев. – М.: Металлургиздат, 1959. – 495 с.

79. Кофф, З.А. Холодная прокатка труб / З.А. Кофф, П.М. Соловейчик, В.А. Алешин, М.А. Гриншпун. – Свердловск, 1962. – 432 с.

80. Крюков, О.В. Анализ и техническая реализация факторов энергоэффективности инновационных решений в электроприводных турбокомпрессорах / О.В. Крюков // Автоматизация в промышленности. 2010. – № 10. – С. 50-53.

81. Крюков, О.В. Синтез энергосберегающих алгоритмов частотно-регулируемых приводов газотранспортных систем / О.В. Крюков, А.В. Серебряков, А.С. Хлынин // Труды Международной шестнадцатой научно-технической конференции "Электроприводы переменного тока", г. Екатеринбург, 05-09 октября 2015 г. – Екатеринбург: [УрФУ], 2015. – С. 205-208.

82. Куликов, Е.И. Прикладной статистический анализ. Учебное пособие для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Горячая линия-Телеком, 2008. – 464 с.

83. Купцов, В.В. Метод расчета электромагнитного момента для задач конечно-элементного моделирования асинхронного двигателя / В.В. Купцов, М.Ю. Петушков, А.С. Сарваров // Вестник Южно-Уральского

государственного университета. Серия: Энергетика. Выпуск №14 (190). – 2010. – С. 57-60.

84. Лезнов, Б.С. Энергетические основы использования регулируемого электропривода в насосных установках / Б.С. Лезнов, С.В. Воробьев // Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. 2012. – № 10 (58). – С. 14-31.

85. Лезнов, Б.С. Энергосберегающие автоматизированные системы в водоснабжении и водоотведении / Б.С. Лезнов // Водоснабжение и санитарная техника. 2004. – № 2. – С. 15-21.

86. Лезнов, Б.С. Энергосбережение и регулируемый привод в насосных и воздуходувных установках / Б.С. Лезнов. – М.: Энергоатомиздат, 2006. – 360 с.

87. Мерфи, Дж. Тиристорное управление двигателями переменного тока: Пер. с англ. – М.: Энергия, 1979. – 256 с.

88. Нецу, Р. Мировой рынок стали: проблемы после кризиса / Р. Нецу // Металлы Евразии. – 2011. – № 1. – С. 20-21.

89. Никифоров, Г.В. Комплексное решение проблем энергосбережения на металлургическом предприятии / Г.В. Никифоров, Б.И. Заславец // Электрификация металлургических предприятий Сибири. Вып. 7. Томск, 1997. – С. 72-80.

90. Никифоров, Г.В. Повышение адекватности моделей электропотребления металлургического производства / Г.В. Никифоров, В.К. Олейников // Электрификация горных и металлургических предприятий Сибири. Тезисы докладов международной научно-практической конференции. Новокузнецк, 1997. – С. 16.

91. Никифоров, Г.В. Энергосбережение и управление энергопотреблением в металлургическом производстве / Г.В. Никифоров, В.К. Олейников, Б.И. Заславец. – М.: Энергоатомиздат, 2003. – 480 с.

92. Николаев, А.А. Оптимизация электрических режимов сверхмощных дуговых сталеплавильных печей / А.А. Николаев, Г.П. Корнилов, А.В.

Ануфриев, С.В. Пехтерев, Е.В. Повелица // Сталь. 2014. – № 4. – С. 37-47.

93. Олейников, В.К. Дифференцированные показатели эффективности электропотребления промышленного производства / В.К. Олейников, Г.В. Никифоров // Энергосбережение на промышленных предприятиях: Доклады научно-практической конференции с международным участием. – Магнитогорск, 1997. – С. 92-95.

94. Орел, О.А. Некоторые особенности переходного процесса в системах с двигателями постоянного тока при ударном приложении нагрузки / О.А. Орел // Инструктивные указания по проектированию электротехн. пром. установок. 1969. – № 9. – С. 3-9.

95. Осада, Я.Е. Освоение стана холодной прокатки труб ХПТ-450 / Осада Я.Е., Ю.А. Медников, И.И. Сергеев // Сталь. 1980. – №4. – С. 315-317.

96. Пат. 2240640 Российская Федерация, МПК Н 02 G 1/02. Синхронный реактивный генератор автономной энергетической установки и способ управления им / Ю.С. Усынин, С.М. Бутаков, М.А. Григорьев, К.М. Виноградов. – № 2003118611/09; заявл. 20.06.03; опубл. 20.11.04, Бюл. №32.

97. Пат. 2346376 Российская Федерация, МПК Н 02 К 19/24. Синхронная реактивная машина / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, К.М. Виноградов, А.Н. Горожанкин, С.А. Чупин – № 2007126685 заявл. 12.07.2007; опубл. 10.02.2009, Бюл. №4.

98. Пат. 2408967 Российская Федерация, МПК Н 02 К 19/10, Н 02 К 19/24, Н 02 К 29/03. Синхронная реактивная машина / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, К.М. Виноградов, А.Н. Горожанкин, Шишков А.Н., Бычков А.Е., Валов А.В. – №2009146993/07(066964) заявл. 17.12.2009.; опубл. 10.01.2011, Бюл. № 1.

99. Пат. 2408972 Российская Федерация, МПК Н 02 Р 27/04, Н 02 Р 25/08, Н 02 Р 19/10. Электропривод с синхронной реактивной машиной и способ управления им / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, К.М. Виноградов, А.Н. Горожанкин, Шишков А.Н., Бычков А.Е., Валов А.В. – №2009148381/07(071468) заявл. 24.12.2009.; опубл. 10.01.2011, Бюл. №1.

100. Пат. 2408973 Российская Федерация, МПК Н 02Р 27/05. Асинхронный электропривод с фазным ротором/ Ю.С. Усынин, А.В. Валов, Т.А. Козина, М.А. Григорьев, К.М. Виноградов, А.Н. Горожанкин, Шишков А.Н., Бычков А.Е. – №2009148035/07(070970) заявл. 23.12.2009.; опубл. 10.01.2011, Бюл. № 1.

101. Пат. 2422972 Российская Федерация, МПК Н 02 К 19/10, Н 02 К 19/24, Н 02 К 29/03. Синхронная реактивная машина / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, К.М. Виноградов, А.Н. Горожанкин, Шишков А.Н., Бычков А.Е., Валов А.В. – №2009146987/07(066958) заявл. 17.12.2009.; опубл. 27.06.2011, Бюл. №18.

102. Пат. 2510877 Российская федерация. МПК Н 02Р 27/04 Электропривод с синхронной реактивной машиной / Ю.С. Усынин, А.Н. Горожанкин, А.Е. Бычков, Е.В. Белоусов, А.М. Журавлев – 2510877 заявл. 11.10.2012.; опубл.

103. Перельмутер В.М., Сидоренко В.А. Системы управления тиристорными электроприводами постоянного тока. М.: Энергоатомиздат, 1988. – 280 с.

104. Петров, И.И. Специальные режимы работы асинхронного электропривода / И.И. Петров, М.М. Соколов, М.Г. Юньков. – М.: Энергия, 1980. – 408 с.

105. Поляков В.Н. Математические модели двигателей постоянного тока для задач управления: учеб. пособие / В.Н. Поляков, Р.Т. Шрейнер; под общ. ред. Р.Т. Шрейнера. Екатеринбург: УГТУ, 1999. – 162 с.

106. Поляков В.Н. Оценка эффективности законов частотного управления асинхронным электроприводом по критерию потерь мощности / В.Н. Поляков // Материалы международной НТК «Электроэнергетика, электротехнические системы и комплексы». Томск: ТПУ, 2003. – С. 65-67.

107. Пужайло, А.Ф. Энергосбережение в агрегатах компрессорных станций средствами частотно-регулируемого электропривода / А.Ф. Пужайло,

О.В. Крюков, И.Е. Рубцова // Компрессорная техника и пневматика. 2012. – № 5. – С. 29-34.

108. Розов, Н.В. Холодная прокатка стальных труб / Н.В. Розов, К.Ф. Милленов. – М.: Металлургия, 1977. – 184 с.

109. Сарапулов, Ф.Н. Развитие математических моделей тепловых процессов в линейных асинхронных двигателях / Ф.Н. Сарапулов, В.В. Гоман // Электротехника. – 2009. – № 8. – С. 11-17.

110. Сарапулов, Ф.Н. Особенности моделирования линейных асинхронных двигателей с различными обмотками индуктора на основе детализированных схем замещения / Ф.Н. Сарапулов, С.В. Иваницкий, В.В. Гоман // Изв. вузов “Электромеханика”. – 2009. – № 5. – С. 18-24.

111. Свид. № 2011612473 о государственной регистрации программы для ЭВМ. Расчет частотных характеристик звеньев и систем с амплитудной модуляцией / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, А.Н. Шишков, А.Е. Бычков, Т.Т. Москов – №2011610566 заявл. 01.02.2011.; зарегистр 24.03.2011.

112. Свид. № 2011617186 о государственной регистрации программы для ЭВМ. Программа расчета переходных процессов быстродействующих систем электроприводов / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, А.Н. Шишков, А.Е. Бычков, А.Н. Горожанкин, Е.В. Белоусов – №2011615635 заявл. 26.07.2011.; зарегистр 15.09.2011.

113. Свид. № 2011617294 о государственной регистрации программы для ЭВМ. Программа расчета параметров новых типов электрических машин/ Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, А.Н. Шишков, А.Е. Бычков, Е.В. Белоусов – №2011615448 заявл. 21.07.2011.; зарегистр 19 сентября 2011.

114. 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.

115. Селиванов, И.А. Энергосбережение в электроприводах металлургического производства / И.А. Селиванов, А.С. Карандаев, В.В. Головин и др. // Энергосбережение средствами электропривода: докл. науч.-метод. семинара, 1 февраля 2011 г. М.: Издательский дом МЭИ, 2011. – С. 43-56.

116. Сидоров, О.Ю. Методы конечных элементов и конечных разностей в электромеханике и электротехнологии / О.Ю. Сидоров, Ф.Н. Сарапулов, С.Ф. Сарапулов. - М.: Энергоатомиздат, 2010 – 331 с.

117. Слежановский, О.В. Системы подчиненного регулирования электроприводов переменного тока с вентильными преобразователями / О.В. Слежановский, Л.Х. Дацковский, И.С. Кузнецов и др. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 256 с.

118. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием: учебник для студ. высш. учеб. заведений / Г.Г. Соколовский. – М.: Академия, 2006. – 272 с.

119. Справочник по электрическим машинам: в 2 т. т.1 / под общ. ред. И.П. Копылова, Б.К. Клокова. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 456 с.

120. Справочник по электрическим машинам: в 2 т. т.2 / под общ. ред. И.П. Копылова, Б.К. Клокова. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 688 с.

121. Терехин, В.Б. Компьютерное моделирование систем электропривода постоянного и переменного тока в Simulink: учебное пособие / В.Б. Терехин, Ю.Н. Дементьев; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. – 307 с.

122. Терехов, В.М. Системы управления электроприводов: учебник для студ. высш. учеб. заведений / В.М. Терехов, О.И. Осипов; под ред. В.М. Терехова. – 2-е изд., стер. – М.: Академия, 2006. – 304 с.

123. Технология и оборудование трубного производства; учебное пособие для вузов / под ред. В.Я. Осадчего. – М.: Интермет Инжиниринг, 2007. – 560 с.

124. Усынин, Ю.С. Вентильный электропривод с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, А.Н. Шишков // Электротехника. – № 3. – С. 37-43.

125. Усынин, Ю.С. Методика расчета электродвигателей и генераторов на базе синхронной реактивной машины независимого возбуждения / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, К.М. Виноградов и др. // Электротехнические системы и комплексы: Межвуз. сб. науч. тр. – Магнитогорск: МГТУ, 2009. Сборник №17. – С.43 – 47.

126. Усынин, Ю.С. Моделирование электропривода активного прицепа / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, А.Н. Шишков и др. // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия “Энергетика”. – 2013. – Том 13. – №2. – С. 106-114.

127. Усынин, Ю.С. Новые высокомоментные энергосберегающие электроприводы с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, А.Н. Шишков и др. // Известия ТулГУ. Технические науки – 2010. – Вып. 3. – Ч.4. – С.71-76.

128. Усынин, Ю.С. Оптимальная форма линейной нагрузки в синхронном реактивном двигателе независимого возбуждения / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, К.М. Виноградов, А.С. Герасимов // Вестник ЮУрГУ. Серия “Энергетика”. – 2003. – Вып. 3. – № 11(27) – С. 80-83.

129. Усынин, Ю.С. Оптимизация быстродействия электропривода подачи стана холодной прокатки труб / Ю.С. Усынин, В.В. Остроухов // Наука ЮУрГУ: материалы 62-й науч. конф. Секции техн. наук. Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2010. – Т. 2. – С. 205-208.

130. Усынин, Ю.С. Оптимизация параметров электромеханической системы в следящем электроприводе с упругими связями / Ю.С. Усынин, Ю.С. Шестаков, В.И. Смирнов и др. // Исследование автоматизированных электроприводов, электрических машин и вентильных преобразователей: Сб. научн. тр. – Челябинск: ЧПИ, 1987. – С. 54-58.

131. Усынин, Ю.С. Основы теории электропривода с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения / Ю.С. Усынин, С.А. Чупин, М.А. Григорьев и др. // Тр. VII Международной (XVIII Всероссийской) науч.-техн. конф. по автоматизированному электроприводу “АЭП–2012”. – Иваново, 2012. – С. 31-34.

132. Усынин, Ю.С. Особенности расчета электромагнитного момента синхронных реактивных двигателей независимого возбуждения / Ю.С. Усынин, Н.Д. Монюшко, Г.В. Караваев, М.А. Григорьев // Электротехнические системы и комплексы: Межвузовский сб. научн. тр. Вып. 6 / под ред. А.С. Сарварова, К.Э. Одинцова. – Магнитогорск: МГТУ, 2001. – С. 16-24.

133. Усынин, Ю.С. Параметрическая оптимизация частотнорегулируемых электроприводов / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, А.Н. Шишков, А.М. Журавлев, С.П. Лохов // Вестник ЮУрГУ. Серия “Энергетика”. – 2012. – Вып. 18. – №37(296). – С. 30-33.

134. Усынин, Ю.С. Потери в регулируемых электроприводах при разных законах управления / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, А.Н. Шишков и др. // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия “Энергетика”. – 2010. – Вып. 13. – № 14(190). – С. 47-51.

135. Усынин, Ю.С. Применение индивидуального электропривода в механизмах подачи станов холодной прокатки труб / Ю.С. Усынин, В.В. Остроухов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Наука и образование. – СПб.: Издательство политехнического университета, 2010. 4(110). – С. 96-100.

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

137. Усынин, Ю.С. Расчет экономии электроэнергии на насосной станции городского водозабора / Ю.С. Усынин, С.М. Бутаков, М.А. Дзюба // Электрические системы и комплексы: межвуз. сб. науч. тр. Вып. 6 / под ред. А.С. Сарварова, К.Э. Одинцова. – Магнитогорск: МГТУ, 2001. – С. 137-140.

138. Усынин, Ю.С. Силовые цепи вентильных электроприводов с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, К.М. Виноградов. Электротехнические системы и комплексы: Межвуз. сб. науч. тр. – Магнитогорск: МГТУ, 2004. – вып. 8. С. 13-17.

139. Усынин, Ю.С. Синтез системы управления электроприводом с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, А.Н. Шишков, С.П. Гладышев, А.Н. Горожанкин // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия “Энергетика”. – 2012. – Вып. 18. – №37(296). – С. 38-41.

140. Усынин, Ю.С. Системы управления электроприводов: учеб. пособие для вузов / Ю.С. Усынин. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2004. – 328 с.

141. Усынин, Ю.С. Удельные показатели электропривода с синхронным реактивным двигателем независимого возбуждения / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, К.М. Виноградов, А.Н. Горожанкин // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия “Энергетика”. – 2008. – Вып. 9. – № 11(111). – С. 52-53.

142. Усынин, Ю.С. Частотные характеристики канала регулирования момента в синхронных электроприводах / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, А.Н. Шишков // Электричество. – 2012. – № 4. – С. 54-59.

143. Усынин, Ю.С. Экспериментальные частотные характеристики электроприводов переменного тока с вентильными преобразователями частоты / Ю.С. Усынин, С.М. Бутаков, М.А. Григорьев, и др. // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия “Энергетика”. – 2002. – Вып. 2. – № 7(16) – С. 67-69.

144. Усынин, Ю.С. Электропривод с синхронным реактивным

двигателем независимого возбуждения / Ю.С. Усынин, Н.Д. Монюшко, Г.В. Караваев, М.А. Григорьев // Труды III Международной (XIV Всероссийской) научно-технической конференции по автоматизированному электроприводу “АЭП–2001” (Н. Новгород 12–14 сентября 2001 г.) / под ред. С.В. Хватова. – Н. Новгород. “Вектор–ТиС”, 2001. – С. 106-107.

145. Усынин, Ю.С. Электропривод с синхронным реактивным двигателем независимого возбуждения / Ю.С. Усынин, Н.Д. Монюшко, М.А. Григорьев, Г.В. Караваев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2001. – Вып. 1. – № 4(04). – С. 70-76.

146. Усынин, Ю.С. Электроприводы и генераторы с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, К.М. Виноградов // Электричество. – 2007. – №3. – С.21-26.

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

148. Усынин, Ю.С. Энергосбережение в электроприводах тягодутьевых механизмов многосвязных объектов / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, А.Н. Шишков, А.Е. Бычков, Д.И. Кашаев, Т.Т. Москов // Вестник ЮУрГУ. Серия “Энергетика”. – 2011. – Вып. 15. – №15(232). – С. 40-45.

149. Храмшин, В.Р. Компенсирующие устройства в системах промышленного электроснабжения: монография / А.С. Карандаев, Г.П. Корнилов, А.А. Николаев, Т.Р. Храмшин, А.Н. Шеметов, В.Р. Храмшин. Магнитогорск: ФГБОУ ВПО «МГТУ», 2012. – 235 с.

150. Храмшин, В.Р. Математическое моделирование тиристорного электропривода с переключающейся структурой / А.С. Карандаев, В.Р. Храмшин, В.В. Галкин, А.А. Лукин // Известия вузов. Электромеханика. 2010. – №3. – С. 47-53.

151. Храмшин, В.Р. Проблемы энергосбережения в системах электроснабжения прокатных станов / В.Р. Храмшин, А.А. Лукин, А.А. Николаев // Тинчуринские чтения: матер, докл. VI-й Междунар. мол. науч.-техн. конф. Казань: КГЭУ, 2011. – С. 50-53.

152. Храмшин, В.Р. Экспериментальные исследования тиристорных электроприводов с двухзонным регулированием скорости с улучшенными энергетическими характеристиками / А.С. Карандаев, В.Р. Храмшин, А.А. Лукин, Г.В. Шурыгина, В.В. Головин // Вестник ЮУрГУ. Челябинск: ГОУ ВПО "ЮУрГУ 2010. – № 14. – С. 67-72.

153. Храмшин, В.Р. Энергосберегающие автоматизированные электроприводы агрегатов прокатного производства / В.Р. Храмшин, А.С. Карандаев, А.А. Лукин, В.В. Головин // 1-я междунар. науч.-практ. конф. "ИНТЕХМЕТ-2008": Сб. ст. С-Пб., 2008. – С. 134-139.

154. Храмшин, В.Р. Энергосберегающие тиристорные электроприводы прокатных станов: монография / В.Р. Храмшин. Магнитогорск: ФГБОУ ВПО «МГТУ», 2013. – 180 с.

155. Хуторецкий, Г. М. Проектирование турбогенераторов / Г. М. Хуторецкий, М. И. Токов, Е. В. Толвинская. – Л.: Энергоатомиздат, 1987. – 256 с.

156. Чернышев, А.Ю. Электропривод переменного тока: учебн. пособие / А.Ю. Чернышев, Ю.Н. Дементьев, И.А. Чернышев. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 213 с.

157. Шевакин, Ю. Ф. Производство труб / Ю.Ф. Шевакин, А.З. Глейберг. – М.: Металлургия, 1968. – 440 с.

158. Шевакин, Ю.Ф. Калибровка и усилия при холодной прокатке труб – М.: Государственное научно-техническое издательство литературы по черной и цветной металлургии, 1963. – 267 с.

159. Шевакин, Ю.Ф. Машины и агрегаты для производства стальных труб: учебное пособие / Ю.Ф. Шевакин и др. – М.: Интернет Инжиниринг,

2007. – 388 с.

160. Шевченко, С.Б. Способы снижения потерь в асинхронном двигателе при векторном управлении / С.Б. Шевченко // Электроприводы переменного тока: тр. Международной четырнадцатой науч.-техн. конф. – Екатеринбург: ГОУ ВТО УГТУ-УПИ, 2007. – С. 153-156.

161. Шрейнер Р.Т. К вопросу оптимизации режимов частотно-регулируемых электроприводов при заданном графике нагрузки / Р.Т. Шрейнер, В.Н. Поляков // Регулируемый электропривод высокоинерционных механизмов. Кишинев: Штиинца, 1980. – С. 119-129.

162. Шрейнер Р.Т. К расчету оптимального по минимуму потерь закона частотного управления асинхронным электродвигателем / Р.Т. Шрейнер, В.Н. Поляков // Асинхронный тиристорный электропривод. Свердловск: УПИ, 1971. – С. 96-98.

163. Шрейнер Р.Т. Системы подчиненного регулирования электроприводов. Часть 1. Электроприводы постоянного тока с подчиненным регулированием координат: Учеб. пособие для вузов. Екатеринбург: Урал. гос. проф.-пед. ун-та, 1997. – 279 с.

164. Шрейнер, Р.Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты / Р.Т. Шрейнер. – Екатеринбург: УРО РАН, 2000. – 654 с.

165. Шуйский, В.П. Расчет электрических машин / В.П. Шуйский. – Л.: «Энергия», 1968. – 732 с.

166. Энергосбережение в электроприводе: монография / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, А.Н. Шишков, С.М. Бутаков. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2011. – 104 с.

167. Энергосбережение и автоматизация электрооборудования компрессорных станций / Под ред. О.В. Крюкова. Нижний Новгород: Вектор ТиС. – Т.1. – 2010. – 560 с.

168. Энергосбережение и автоматизация электрооборудования

компрессорных станций / Под ред. О.В. Крюкова. Нижний Новгород: Вектор ТиС. – Т.2. – 2011. – 664 с.

169. Энергосбережение и автоматизация электрооборудования компрессорных станций / Под ред. О.В. Крюкова. Нижний Новгород: Вектор ТиС. – Т.3. – 2012. – 572 с.

170. Юдин, В.А. Теория механизмов и машин / В.А. Юдин, Л.В. Петрокас. – М.: Высш. шк., 1977. – 527 с.

171. Law, D. Design and Performance of Field Regulated Reluctance Machine / D. Law, A. Chertok, T. Lipo // IEEE Transactions on Industry Applications. – 1998. – Vol. 30. – № 5. – P. 1185-1192.

172. Law, J. Magnetic Circuit Modeling of the Field Regulated Reluctance Machine, Part I: Model Development / J. Law, T. Busch, T. Lipo // IEEE Transaction on Energy Conversion. – 2000. – №1. – Vol. 11. – P. 49-56.

173. Law, J. Magnetic Circuit Modeling of the Field Regulated Reluctance Machine, Part II: Saturation Modeling and Results / J. Law, T. Busch, T. Lipo // IEEE Transaction on Energy Conversion. – 2000. – №1. – Vol. 11. – P. 56-62.

174. Lipo, T. Advanced Motor Technologies: Converter Fed Machines / T. Lipo // Transactions on energy conversion – 1998. – P. 204-222.

175. Toliyat H. Analysis and Simulation of Five-Phase Variable-Speed Induction Motor Drives Under Asymmetrical Connections / H. Toliyat // IEEE Transactions on Power Electronics. – 1998. – Vol. 13. – №4. – P. 748-756.

176. Toliyat, H. A DSP-Based Vector Control of Five-Phase Synchronous Reluctance Motor / H.Toliyat, R. Shi, H. Xu // 0-7803-6404-X/00/\$10.00 (C) 2000. P. – 1-7.

177. Toliyat, H. A Five-Phase Reluctance Motor with High Specific Torque / H. Toliyat, L. Xu, T. Lipo // IEEE Transactions on Industry Applications. – 1992. – Vol. 28. – №3. – P. 559-667.

178. Toliyat, H. Analysis and Simulation of Five-Phase Synchronous Reluctance Machines Including Third Harmonic of Airgap MMF / H. Toliyat //

IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, VOL. 34, NO. 2, MARCH/APRIL 1998. P. 332-339.

179. Toliyat, H. Simulation and Detection of Dynamic Air-Gap Eccentricity in Salient-Pole Synchronous Machines / H. Toliyat, N. Al-Nuaim // IEEE Transactions on Industry Applications. – 1999. – Vol. 35. – №1. – P. 86-93.

180. Weh, H. On the Development of Inverter Fed Reluctance Machines for High Power Densities and High Output / H. Weh // ETZ Archiv, Bd. 6, 1984. – P. 135-144.

181. Weinger, A. Potential of AC drives with semi-closed control / A. Weinger // IEEE International Electric Machines and Drives Conference. Madison, Wisconsin, USA. – 2003. – P. 1511-1517.