

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего
образования

«Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет)»

Политехнический институт

Механико-технологический факультет

Кафедра «Мехатроника и автоматизация»

Направление «Мехатроника и робототехника»

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой

В.Р. Гасияров

2017 г.

Совершенствование мехатронной системы регулирования натяжения
на участке смотки полосы стана холодной прокатки

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ МАГИСТРА

ЮУрГУ - 15.04.06.2017.086 ПЗ (ВКР)

Нормоконтролер
Преподаватель
Е.А. Маклакова

2017 г.

Руководитель работы
д.т.н., профессор
В.Р. Храмшин

2017 г.

Нормоконтролер
Ст. преподаватель
С.С. Воронин

2017 г.

Автор работы
студент группы П-264
Андрей Юрьевич Сологубов

2017 г.

Челябинск 2017

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»

Институт Политехнический институт
Факультет Механико-технологический
Кафедра Мехатроники и автоматизации
Направление 15.04.06 «Мехатроника и робототехника»
Профиль Мехатроника

УТВЕРЖДАЮ

Зав. кафедрой _____ В.Р. Гасияров
подпись

«___» _____ 2017 г.

**ЗАДАНИЕ
НА ВЫПОЛНЕНИЕ ВЫПУСКНОЙ
КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ МАГИСТРА**

Студенту группы П-264 _____ Сологубову Андрею Юрьевичу
группа (Ф.И.О. полностью)

1 Тема работы

Совершенствование мехатронной системы регулирования натяжения
на участке смотки полосы стана холодной прокатки

утверждена приказом по университету от _____ 201 г. № _____
(утверждена распоряжением по факультету от _____ 201 г. № _____)

2 Срок сдачи студентом законченной работы 10.06.2017

3 Исходные данные к работе материалы производственной практики

4 Содержание расчетно-пояснительной записки (перечень подлежащих разработке во-
просов)

Введение

1. Реверсивная моталка и система регулирования натяжения с позиций мехатронного комплекса

2. Разработка и исследование математической модели системы «клеть-полоса-моталка»

3. Исследование системы регулирования натяжения на математической модели

4. Разработка усовершенствованной системы регулирования натяжения

Заключение

Дополнительные разделы: приложения

5 Перечень графического и иллюстративного материала

Схема расположение барабанных моталок на реверсивных станах холодной прокатки;

Функциональные и структурные схемы существующей системы регулирования натяжения

Технологическая схема участка смотки, функциональные и структурные схемы компонентов математической модели, структурная схема математической модели целиком, осциллограммы переходных процессов в существующей системе;

Расчитанные с помощью разработанной модели графики переходных процессов, графическое представление дефектов рулона, графики радиальных усилий в рулоне;

Структурная схема нейрона; структурная схема многослойного перцептрона на основе нейронов; структурная схема рекуррентных нейронных сетей; структурная схема матричной модели нейросетевого контроллера; схема структурно-функциональной декомпозиции мехатронного комплекса; структурная схема двухуровневой многомодульной нейросетевой САРН с внешним контуром регулирования механических параметров с обучением по эталонной траектории изменения натяжения в режиме реального времени; расчётные переходные процессы базового режима; расчётные переходные процессы адаптации к двум траекториям изменения натяжения; компенсация эксцентриситета; расчётные переходные процессы при обрыве прокатываемой полосы в режиме АРС вала барабана моталки; поверхности динамических ошибок в существующей и предлагаемой системе; пояснение к программной и аппаратной реализации предлагаемых нейросетевых алгоритмов

Всего 172 листа

Согласовано:

Руководитель

подпись

Д.т.н

Должность, звание

Храмшин Вадим Рифхатович

Фамилия И.О.

Дата выдачи задания « ____ » _____ 201_г.

Задание принял к исполнению студент

подпись

Сологубов Андрей Юрьевич

Фамилия И.О.

АННОТАЦИЯ

Сологубов А.Ю. Совершенствование мехатронной системы регулирования натяжения на участке смотки полосы стана холодной прокатки. – Челябинск: ЮУрГУ, П-264, 2017. - 171 с. 111 ил., 6 табл. библиогр. список – 74 наим., 3 прил.

В качестве объекта исследования выбрана система регулирования натяжения на участке смотки полосы реверсивного стана холодной прокатки 2000 ОАО «ММК». Целью работы являлось совершенствование системы автоматического регулирования натяжения на участке смотки полосы стана холодной прокатки. Для достижения поставленной цели решены следующие технические задачи:

- исследовать технологические особенности работы моталок;
- разработать имитационную модель взаимосвязанных мехатронных модулей в составе системы «клеть-полоса-моталка»;
- предложить и исследовать нейросетевые алгоритмы управления;

Предложенный в работе вариант совершенствования САРН с применением нейросетевых технологий и структурные решения обеспечивают качественное регулирование натяжения без получения точной математической модели объекта управления. Кроме того, предлагаемые алгоритмы снижают колебательность момента на вале двигателя моталки, окружной скорости вращения вала двигателя, линейной скорости намотки и натяжения, что позволит свести к минимуму разнотолщинность наматываемой полосы, позволит сформировать радиальные напряжения в рулоне, не приводящие к возникновению дефектов. Быстродействие и хорошая адаптивность нейросетевых структур позволяет отказаться от дополнительных компенсационных каналов, таких как компенсация момента трения, момента изгиба, формирования динамического момента и компенсации эксцентриситета.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	8
ГЛАВА I РЕВЕРСИВНАЯ МОТАЛКА И СИСТЕМА РЕГУЛИРОВАНИЯ НАТЯЖЕНИЯ С ПОЗИЦИЙ МЕХАТРОННОГО КОМПЛЕКСА.....	11
1.1 Реверсивная моталка, как активная механическая система. Назначение реверсивных моталок.....	11
1.2 Необходимость обеспечения качественного регулирования натяжения в составе мехатронного комплекса реверсивной моталки.....	13
1.3 Современные системы автоматического регулирования натяжения для моталок станов холодной прокатки	17
1.4 Алгоритм регулирования натяжения металлической полосы с помощью функционального движения реверсивной моталки стана 2000 холодной прокатки ОАО «ММК».....	17
1.5 Анализ применения методов искусственного интеллекта для управления натяжением ленточного материала	29
Выводы по главе I	35
ГЛАВА II РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ «КЛЕТЬ-ПОЛОСА-МОТАЛКА»	37
2.1 Состав технологической системы «клеть-полоса-моталка» и особенности намотки полосы в данной системе	37
2.2 Математическая модель явнополюсных синхронных двигателей с демпферной обмоткой.....	39
2.3 Математическое описание основных компонентов механизма моталки.....	48
2.4 Модель клетки стана холодной прокатки.....	51
2.5 Модель прокатываемой полосы с учётом изменения жёсткости при изменении радиуса рулона.....	52
2.6 Модели силового электрооборудования.....	60
2.7 Упрощённый синтез системы подчинённого регулирования натяжения для исследования.....	65
2.7.1 Расчёт контура тока по оси q , d и контура регулирования тока возбуждения	65
2.7.2 Расчёт контура регулирования скорости	67
2.7.3 Расчёт контура регулирования натяжения для режима прямого регулирования.....	68
2.8 Структурная схема обобщённой математической модели мехатронного комплекса «клеть-полоса-моталка».....	70

2.9 Проверка адекватности разработанной математической модели	74
Выводы по главе II	77
ГЛАВА III ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ НАТЯЖЕНИЯ НА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ	78
3.1 Исследование базовых динамических режимов смотки и размотки	78
3.2 Создание натяжения покоя в полосе	88
3.3 Влияние процессов адаптации на качество регулирования натяжения	91
3.4 Проверка рассчитанных радиальных усилий по трём критериям устойчивости	94
Выводы по главе III.....	99
ГЛАВА IV РАЗРАБОТКА УСОВЕРШЕНСТВОВАННОЙ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ НАТЯЖЕНИЯ НА БАЗЕ НЕЙРОСЕТЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ	101
4.1 Выбор закона регулирования натяжения. Обоснование выбора нейросетевых технологий для управления натяжением	101
4.2 Технология искусственных нейронных сетей для систем управления в мехатронике	105
4.2.1 Средства интеллектуализации мехатронных комплексов	105
4.2.2 Задача автоматического управления с помощью нейронных сетей	107
4.2.3 Архитектура нейронной сети	108
4.2.3 Базовая структура системы регулирования с нейроконтроллером.....	110
4.2.4 Обучение искусственных нейронных сетей, обучающие данные и динамический алгоритм обучения нейрорегулятора в режиме on-line	113
4.3 Использование нейросетевых технологий применительно к рассматриваемой мехатронной системе	120
4.4 Исследование усовершенствованной системы регулирования натяжения....	129
4.4.1 Моделирование базовых технологических режимов (поддержание натяжения в функции рулона на постоянном уровне)	129
4.4.2 Адаптация к сложно-изменяющимся в функции радиуса законам регулирования натяжения	136
4.4.3 Компенсация эксцентриситета моталки	144
4.4.4 Регулирование скорости вращения барабана моталки при обрыве прокатываемой полосы.....	148
4.4.5 Определение динамических ошибок натяжения при различных профилях наматываемой полосы.....	151
4.5 Возможности программной и аппаратной реализации используемых алгоритмов	155

Выводы по главе IV.....	159
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	160
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	163
ПРИЛОЖЕНИЕ А. ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ ДВИГАТЕЛЯ МОТАЛКИ.....	169
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ ДВИГАТЕЛЯ КЛЕТИ.....	171
ПРИЛОЖЕНИЕ В. ПАРАМЕТРЫ СИЛОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ	173

ВВЕДЕНИЕ

Общая характеристика магистерской диссертации. Повышение качества производства листового холоднокатаного проката требует высокоточной реализации сложных алгоритмов управления исполнительными механизмами прокатных станов, таких как моталки, клетки и различные вспомогательные механизмы с целью качественного регулирования влияющих на конечное качество продукта параметров прокатки. Использование сложной измерительной аппаратуры, высокоточных датчиков, системы автоматизации различного уровня, электромеханической техники и сложных, но основанных на методах упрощения управляемого объекта алгоритмов управления, позволяет рассмотреть стан холодной прокатки как единый крупный мехатронный комплекс.

Фактически, любой современный технологический агрегат можно отнести к мехатронному комплексу второго уровня. Основным признаком мехатронного комплекса второго уровня является интеграция трёх устройств различной физической природы: механических, основой которых являются механические элементы, с помощью которых осуществляется активное воздействие на окружающую среду; электротехнических чувствительных элементов, с помощью которых выполняется сбор необходимой информации о внешней среде, либо измерение регулируемого технологического параметра; электронных, осуществляющих различные вычислительные и алгоритмические управляющие операции.

Большую роль в прокатном производстве играют системы управления, обеспечивающие высокую точность регулирования параметров прокатки. Одним из важнейших таких параметров выступает натяжение полосы при намотке с помощью реверсивных моталок.

К системе автоматического регулирования натяжения (САРН) предъявляются жесткие требования, направленные на обеспечение непрерывного контроля и поддержание точности регулирования натяжения как в установившихся, так и в динамических режимах.

Во многом, конкурентоспособность холоднокатаной полосы зависит именно от качества регулирования натяжения. Повышение качества регулирования натяжения осложнено тем обстоятельством, что намоточно-размоточные механизмы прокатных станов - преимущественно нестационарные объекты. Нестационарность выражается в изменениях параметров механической системы при намотке. Такими параметрами являются радиус рулона, масса, момент инерции, скорость вращения вала двигателя и др. В условиях тесной взаимосвязи параметров электрической и механической частей моталки изменение режимных показателей приводит к возникновению динамических ошибок системы и к необходимости корректировки параметров системы управления для уменьшения данных ошибок.

Модель такой системы, лежащей в основе классических методов теории управления, возможно построить, но лишь значительно упростив, и, следовательно, наделив ее только оценочным характером. Это приводит к неточной настройке регуляторов, плохой адаптируемости регуляторов при изменении режимов рабо-

ты, что в системах управления, построенных по традиционным методам и использующих упрощённые линейные алгоритмы задания и регулирования натяжения, приводит к снижению качества управления.

Именно алгоритмы управления занимают одно из центральных мест в современной мехатронике. Учитывая активную разработку новых, развитие и совершенствование уже имеющихся мехатронных комплексов и систем управления ими, становится необходимым применить достаточно эффективный и гибкий инструментарий методов искусственного интеллекта для совершенствования системы регулирования натяжения, используя один из самых перспективных методов для нестационарных объектов – технологии нейронных сетей.

Методы искусственного интеллекта интенсивно развивались в последнее десятилетие. В настоящее время они внедряются непосредственно в фундамент индустриальной автоматизации. В ближайшем будущем прогнозируется существенный рост использования систем искусственного интеллекта в основных производственных процессах, в том числе в металлургии.

Необходимость интеллектуализации систем управления обусловлена развитием высоких технологий автоматизации и информатизации технологических процессов, базирующихся на фундаментальных научных открытиях, что позволяет эффективно реализовывать сложные вычислительные процедуры и повышает эффективность контроля и управления, а также качество готовой продукции. Кроме того, выбранное научное направление входит в программу приоритетных исследований ведущих международных научных организаций, а идеи этого направления получают все более широкое распространение в различных областях науки и производства. Всё это позволит осуществить повышение технического уровня реверсивной моталки и рассмотреть её с позиций мехатронного комплекса третьего, высшего уровня.

Различных аспектов применения интеллектуальных систем управления в промышленных электротехнических комплексах и системах касались Чертов А.Д. (ЦНИИЧермет), Буянкин В.М. (МГТУ Им. Баумана), Мещеряков В.Н. (ЛГТУ), Терехов В.А., Васильев В.И., Ильясов Б.Г., Василев Я.Д., Рутковская Д., Пильинский М., Рутковский Л. и многие другие учёные.

Цели и задачи исследования. Целью магистерской работы является совершенствование системы автоматического регулирования натяжения на участке смотки полосы стана холодной прокатки, обеспечивающее повышение точности регулирования натяжения во всех режимах и устранение дефектов при намотке, связанных с ошибками регулирования натяжения.

Для достижения поставленной цели решены следующие технические задачи:

- исследовать технологические особенности работы моталок;
- разработать имитационную модель взаимосвязанных мехатронных модулей в составе системы «клеть-полоса-моталка», учитывающую динамические свойства двигателя, силовых преобразователей, параметров при намотке, очага деформации металла в клетке и прокатываемой полосы для изучения взаимовлияния параметров мехатронной системы и на натяжение в частности;

– предложить и исследовать алгоритмы управления сложными динамическими объектами с наматывающими мотальными механизмами на базе рекуррентных нейронных сетей с динамическим алгоритмом обучения в режиме online, используя современную нелинейную теорию управления.

Методы исследования. В работе использованы современные математические и инструментальные методы исследований. Теоретические исследования основывались на классических методах теории автоматического управления, теории автоматизированного электропривода, современной нелинейной теории управления, такой как искусственные нейронные сети. Моделирование и обработка данных исследований, расчеты при анализе и синтезе систем управления производились с использованием современных информационных и компьютерных технологий. Использованы пакеты современной версии системы Matlab (Simulink). Расчеты проводились по стандартным и разработанным автором программам математической среды Matlab. Графическая обработка результатов выполнена средствами MS Excel, Matlab и стандартными средствами Windows.

Научная новизна работы заключается в следующем:

– разработана математическая модель системы «клеть-полоса-моталка» стана холодной прокатки, включающая имитационные модели входящих в состав данной системы элементов: синхронных двигателей клетки и моталки, непосредственных преобразователей частоты, тиристорных возбудителей, САРС для клетки и САРН для моталки, механизма моталки и клетки, очаг деформации металла в клетке стана холодной прокатки и прокатываемой полосы;

– была подробно исследована система регулирования натяжения полосы в динамических режимах в составе системы НПЧ-СД;

– применительно к данной системе была апробирована предложенная в источниках методика расчёта радиальных напряжений в рулоне, а также оценка возникающих в рулоне дефектов по величине радиальных напряжений;

– показана необходимость улучшения показателей работы САРН. В качестве варианта предложено использование многослойных рекуррентных нейронных сетей, методов нейрорегулирования с эталонной моделью и принципа многомодульного нейрорегулирования с динамическим алгоритмом обучения нейронных сетей в реальном времени;

Структура и объем работы. Магистерская работа изложена на 171 страниц машинописного текста и состоит из введения, четырех глав, основных выводов, списка используемой литературы из 74 наименований, 111 иллюстраций, 6 таблиц.

ГЛАВА I РЕВЕРСИВНАЯ МОТАЛКА И СИСТЕМА РЕГУЛИРОВАНИЯ НАТЯЖЕНИЯ С ПОЗИЦИЙ МЕХАТРОННОГО КОМПЛЕКСА

1.1 Реверсивная моталка, как активная механическая система. Назначение реверсивных моталок

С точки зрения системного подхода реверсивная моталка и система регулирования натяжения – ограниченное расположение действующих друг на друга устройств и алгоритмов управления натяжением, как технологическим параметром. С точки зрения мехатроники данная система является уже мехатронной системой.

С учётом того, что регулирование осуществляется посредством электропривода с силовым преобразователем с цифровой системой управления, данный электропривод (ЭП), как и любой другой современный и сложный ЭП, можно рассматривать с позиций мехатронного комплекса второго уровня. Под словосочетанием «мехатронная система» понимается совокупность (синергетическое объединение) следующих подсистем [1]:

- основная система (преимущественно механическая);
- электропривод;
- датчики регулируемых величин (датчик скорости и тензометрический измеритель натяжения в ролике измерения планшетности);
- процессоры и обработка данных.

Интеграция, как одно из основных направлений развития мехатронных и робототехнических систем, получило дальнейшее развитие в связи с развитием новых электронных технологий, которые позволили создать датчики и электронные блоки для обработки сигналов. В этих модулях была достигнута интеграция трёх устройств различной физической природы: механических, электротехнических и электронных. На базе мехатронных модулей второго уровня созданы управляемые энергетические машины [2].

Таким образом, реверсивная моталка представляется, как активная система. В процессе реверсивной холодной прокатки моталки применяют для сматывания длинных полос в рулоны.

Моталки не просто сматывают и разматывают полосу, но и одновременно создают продольное натяжение в наматываемом материале, что необходимо для придания рулонам устойчивости (под «устойчивостью рулонов» следует считать способность к сохранению исходной цилиндрической формы), получения рулона с хорошим показателем плотности и правильного направления полосы при входе её в валки и выходе их валков прокатной клетки. Создавать и управлять натяжением полосы желательно также по причине того, что за счёт натяжений снижается давление металла на валки при прокатке [3-6].

Барабанные моталки применяют при холодной прокатке длинных полос и ленты (смазываемых в рулоны) как на реверсивных, так и на неревверсивных станах. На реверсивных станах моталки устанавливают по обеим сторонам рабочей клетки подобно тому, как это отражено на рисунке 1.

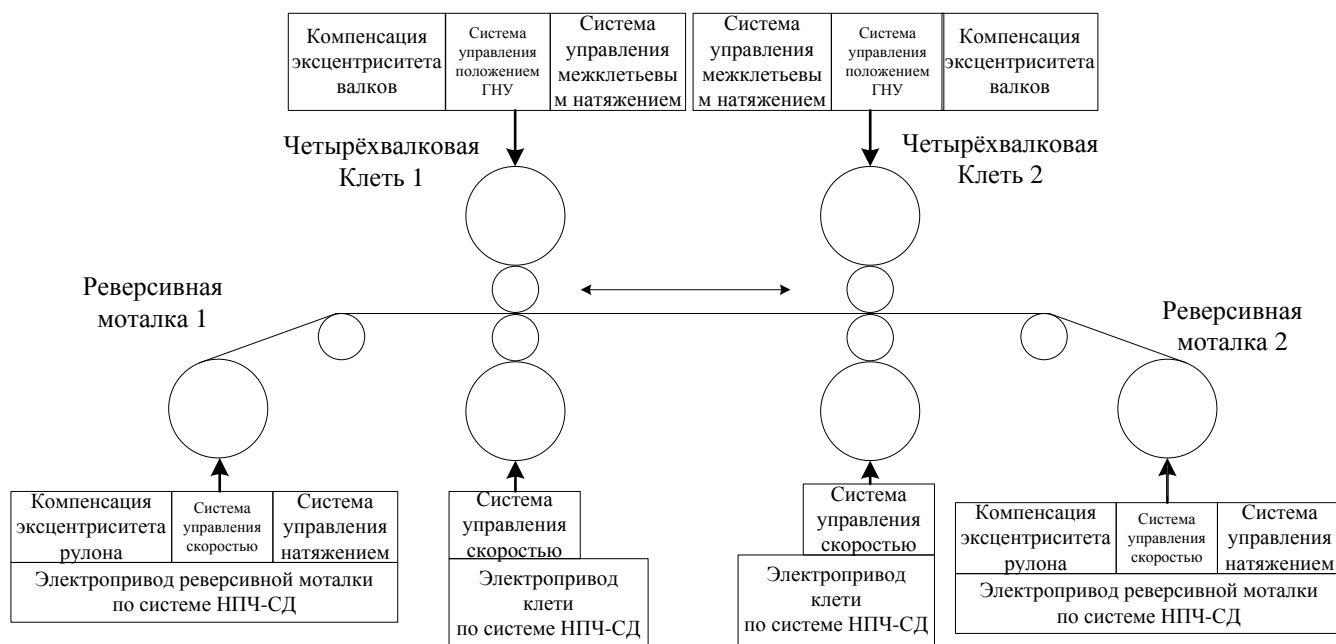


Рисунок 1 - Схема расположения барабанных моталок на реверсивных станах холодной прокатки

Холодная прокатка на этих станах осуществляется в следующей последовательности: горячекатанная полоса (лента) в виде рулона подаётся к стану, рулон устанавливается на разматыватель и с него полоса подаётся в валки. Заправка переднего конца полосы в валки и затем в моталки происходит без обжатия этих участков полосы.

После того, как конец полосы зажат во второй моталке, установленной за станом, начинается прокатка полосы в одну и другую стороны согласно технологическому циклу. Роль моталок при этом всё время меняется: из ведущей (передней) одна из моталок становится ведомой, а ведомая становится ведущей. Таким образом, осуществляется прокатка, после чего рулон с одной из моталок снимают и направляют на отжиг для снятия наклёпа. Недостаток реверсивного процесса холодной прокатки заключается в том, что передний и задний концы полосы оказываются непрокатанными.

Так как рулон полосы после прокатки снимается с моталки, то очевидно, что по своей конструкции барабан моталки может быть только консольного типа, т.е. с опорами только на одной стороне. С целью уменьшения прогиба консольного вала и барабана моталки на станах, прокатывающих широкую полосу (при большом натяжении), применяют так называемую отводную опору: эта опора подводится к свободному концу вала моталки перед наматыванием на неё полосы и отводится в сторону при снятии рулона.

Холодная прокатка полосы в рулонах осуществляется при постоянной линейной скорости намотки и неизменном натяжении полосы при входе её в валки и при выходе из валков. Так как диаметр рулона при прокатке на одной моталке уменьшается, а на другой увеличивается, а линейные скорости сматывания полосы с одной моталки и наматывания полосы на другую должны поддерживаться на постоянном уровне, следовательно, число оборотов в минуту

этих моталок должно непрерывно изменяться: на одной увеличиваться, а на другой уменьшаться. Кроме того, при этом натяжение полосы на входе и выходе должно оставаться постоянным. Эти весьма сложные условия ведения процесса прокатки требуют чрезвычайно точного и чувствительного регулирования привода самих моталок. На станах холодной прокатки полосы в рулонах применяют самостоятельный привод каждой моталки, осуществляемый от отдельного электродвигателя со сложной электрической аппаратурой автоматического регулирования, обеспечивающей постоянство скорости наматывания и натяжения полосы.

В процессе прокатки задняя моталка создаёт тормозящее действие при входе полосы в валки, т.е. создаёт заднее натяжение. Значит, при наличии отдельного привода её электродвигатель при этом будет работать как генератор, т.е. он будет отдавать энергию торможения задней моталки в сеть. Это является также преимуществом привода моталок от отдельных электродвигателей [7].

Таким образом, видно, что механическое движение (вращение вала барабана) должно быть организовано особым функциональным образом. Обеспечение функционального движения мехатронной системы предусматривает целенаправленное механическое движение, которое координируется с параллельно управляемыми технологическими и информационными процессами.

1.2 Необходимость обеспечения качественного регулирования натяжения в составе мехатронного комплекса реверсивной моталки

Реверсивные моталки являются одними из наиболее сложных и технологически интенсивных участков прокатных станов с позиции систем управления электромехатронной системой и АСУ ТП.

При намотке полоса на участке между клетью и моталкой находится в состоянии натяжения, что является одной из главных особенностей технологического процесса. Основная причина, определяющая необходимость прокатки с натяжением, заключается в том, что отсутствие натяжения ведёт к перекоосу полосы и образованию петли, полоса теряет устойчивость в валках, происходит смещение полосы в сторону относительно оси прокатки, что приводит к аварийному режиму, неизбежному простоею стана, возможным поломкам оборудования. Намотку металла отличает изменение параметров рулона в процессе намотки. Следствием этого является высокая сложность протекания динамических процессов, отсутствие каких бы то ни были установившихся режимов, помимо стабилизированного натяжения и линейной скорости намотки. Всё это накладывает дополнительные требования по надёжности, стабильности работы АСУ ТП и систем управления приводами намоточных механизмов. Основное требование, предъявляемое к моталкам и разматывателям любой конструкции, заключается в обеспечении необходимой точности поддержания натяжения как в установившихся, так и динамических режимах при качественном управлении движением (в частности, скоростью

вращения вала двигателя) в совокупности с качественной намоткой (размоткой) обрабатываемой полосы.

С другой стороны, чрезмерное натяжение в первую очередь приводит к «утяжкам», и уменьшению ширины прокатываемой полосы относительно заданной, что означает брак продукции. Точность регулирования параметров намотки (размотки) в значительной степени определяет качество выпускаемой продукции (отсутствие волны, коробоватости, рифления), что особенно важно для агрегатов по производству и обработке тонкой и тончайшей холоднокатанной полосы. Кроме того, данный показатель оказывает влияние на степень брака, вызванного деформацией рулонов как в процессе намотки (телескопичность, сваривание витков), так и после съёма рулона с барабана (выпучивание внутренних витков и т.д.).

Высокие технологические требования должны быть обеспечены во всех режимах, в том числе в динамических, при заправке и прокатке конца полосы. При этом должны компенсироваться различные параметрические возмущения, такие как эксцентриситет рулона и влияние упругих связей, учёт которых вносит дополнительные сложности в математическое описание процессов и соответственно структуру систем управления электропривода, как основной движущей силой мехатронного комплекса моталки.

На основании различных исследований сформулирован критерий оценки качества работы систем регулирования натяжения электроприводом моталок [8]. Для прокатных станов достаточным условием для нормального протекания технологического процесса является поддержание натяжения с точностью до $\pm 5...15\%$. Заданное натяжение должно поддерживаться во всех режимах работы стана: при нулевой скорости (режим покоя), при разгоне и торможении, при работе на установившейся скорости. Диапазон изменения натяжения зависит от сортамента прокатываемой полосы, и, как правило, составляет 1:10, реже, для моталок многовалковых станов - до 1:50.

К другим технологическим требованиям можно отнести: плавное ускорение и замедление скорости перемещения полосы; широкий диапазон изменения скорости двигателя; обеспечение режима заправочной скорости, режима толчка и режима точного позиционирования. Диапазон изменения угловой скорости двигателя D_ω моталок и разматывателей зависит от диапазона изменения радиуса рулона D_R и диапазона изменения скорости D_V прокатки на прокатных станах или линиях отделки [8,9]:

$$\left. \begin{aligned} D_\omega &= D_R \cdot D_V \\ D_R &= \frac{R_R}{R_0} \\ D_V &= \frac{V_{\max}}{V_{\min}} \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

где V_{\max} - максимальная линейная скорость намотки, м/с;
 V_{\min} - минимальная линейная скорость намотки, м/с.

Режим заправочной скорости - второй из названных выше режимов работы моталки. Он обеспечивает заправку полосы, её транспортирование без натяжения, ограничение частоты вращения при обрыве полосы. Этот режим является вспомогательным и не предъявляет жёстких требований к качеству регулирования. Допустимая точность регулирования скорости считается достаточной, если обеспечивается погрешность в пределах $\pm 2\%$. В режиме заправки должна быть предусмотрена возможности синхронизации скорости вращения барабана со скоростью вращения ведущего агрегата. При заправке должно быть также обеспечено смягчение механической характеристики двигателя. Режим отработки точного позиционирования (или точной остановки) барабана моталки должен обеспечивать точный останов по концу рулона и установку барабана намоточного устройства перед началом прокатки ошибка при позиционировании барабана не должна превышать $\pm 2^\circ$.

Поскольку электроприводы моталок и разматывателей характеризуются высокими значениями момента инерции и, следовательно, при работе имеют большой запас кинетической энергии, в современных электроприводах предусматривается обеспечение возможности рекуперативного торможения.

Необходимо отметить, что наиболее высокие требования по регулированию натяжения предъявляются именно к станам холодной прокатки, т.к. натяжение оказывает значительное влияние на толщину прокатываемой полосы, как на важнейший геометрический параметр конечного продукта. Это обусловлено тем, что толщина полосы, прокатываемой на стане холодной прокатки, заметно ниже, чем аналогичный параметр на станах горячей прокатки.

Фактически, это означает, что влияние со стороны некачественной САРН будет сильнее сказываться на менее тонких полосах. Проанализируем влияние натяжения на толщину полосы. Известно, что в процессе прокатки с обжатием полосы на валки действуют силы, характеризующиеся равнодействующей давления металла на валки P , называемой усилием прокатки. Под действием этих сил элементы прокатной клетки будут упруго деформироваться, в результате чего выходная толщина полосы не будет соответствовать установленному начальному зазору, а будет больше его на величину суммарной упругой деформации всей механической системы. Давление металла на валки функционально зависит от многих параметров прокатки, в том числе от натяжения полосы.

С увеличением натяжения наблюдается значительное снижение давления металла на валки. Для практических расчётов с достаточной степенью точности взаимосвязь давления металла на валки с натяжением определяется зависимостью Хиссенберга-Симса:

$$P = P_0 \cdot \left(1 - \frac{\sigma_{\text{пер}} + \sigma_{\text{зад}}}{\sigma_{\text{ф}}} \right), \quad (2)$$

где P_0 - давление металла на валки при прокатке без натяжения;

$\sigma_{\text{пер}}$, $\sigma_{\text{зад}}$ - переднее и заднее удельные натяжения;

$\sigma_{\text{ф}}$ - сопротивление деформации металла при прокатке.

Удельное натяжение связано с полным натяжением полосы Т следующей зависимостью:

$$\sigma = \frac{T}{b \cdot h}, \quad (3)$$

где b - ширина полосы, м;

h - толщина полосы, м.

Сопротивление деформации металла определяется в соответствии с эмпирической зависимостью:

$$\sigma_{\phi} = \sigma_0 \cdot \varepsilon^n \cdot v_{\text{ср}}^m \cdot e^{-p \cdot t} \quad (4)$$

где σ_0 - базисное сопротивление деформации, зависящее от материала полосы;

ε - относительное обжатие полосы в клети;

$v_{\text{ср}}$ - средняя скорость деформации металла;

n, m, p - коэффициенты, которые учитывают влияние относительного обжатия, скорости деформации и температуры на сопротивление деформации соответственно.

Толщина полосы, соответствующая начальному зазору валков, и действительная толщина на выходе клети связаны между собой зависимостью Головина-Симса:

$$h = h_0 + \frac{P}{M_k}, \quad (5)$$

где M_k - модуль жёсткости прокатной клети.

При совместном решении выражений, влияние натяжения на толщину полосы на выходе из клети определится в соответствии с зависимостью:

$$h = h_0 + \frac{P}{M_k} \cdot \left(1 - \frac{\sigma_{\text{пер}} + \sigma_{\text{зад}}}{\sigma_{\phi}} \right) \quad (6)$$

Из полученной зависимости видно, что на величину толщины при изменении натяжения оказывают влияние как среднее сопротивление деформации, так и модуль жёсткости клети [8].

Необходимость качественного регулирования натяжения, обеспечение указанных требований взаимосвязано с обеспечением качественного функционального движения вала барабана моталки.

С учётом того, что в качестве «движущей» силы выступает электромеханическое преобразование энергии, требуется наличие датчиков регулируемых величин, алгоритмов регулирования и процессора, как средства реализации алгоритмов регулирования натяжения.

1.3 Современные системы автоматического регулирования натяжения для моталок станов холодной прокатки

Совокупность датчиков регулируемых величин, алгоритмов регулирования натяжения и микропроцессорной техники, как средства реализации применяемых алгоритмов регулирования натяжения, обеспечивающих требуемую форму электромеханического преобразования энергии, составляет систему автоматического управления натяжением посредством управления электромагнитным приводом в данной мехатронной системе.

В настоящее время известны два принципиально различных способа построения систем регулирования натяжения: косвенный и прямой. Системы косвенного регулирования натяжения основаны на принципе поддержания пропорциональности электромагнитной мощности двигателя моталки $P_{эм}$ и скорости намотки V_m при работе стана на установившейся скорости. Осуществляется регулирование по косвенным параметрам - току или ЭДС двигателя. В этом способе регулирования натяжения качество и точность регулирования натяжения во многом определяется точностью расчета диаметра рулона и компенсацией влияний различных возмущений [8,9].

Кардинальное повышение точности поддержания натяжения может быть достигнуто только с применением систем прямого регулирования. Особенно это актуально при обработке тонкой полосы. Известны два основных способа построения систем прямого регулирования натяжения: использование для поддержания натяжения полосы регулирования положения так называемых «плавающих» роликов или применение непосредственных измерителей натяжения материала в промежутке натяжения для получения сигнала, пропорционального уровню текущего натяжения в режиме реального времени. Принцип работы и структурные схемы обоих способов приведены в [10,11].

1.4 Алгоритм регулирования натяжения металлической полосы с помощью функционального движения реверсивной моталки стана 2000 холодной прокатки ОАО «ММК»

Для поддержания постоянного натяжения полосы приводы моталки оборудованы системой регулирования натяжения на базе оборудования фирмы Siemens.

В зависимости от требований технологии может быть выбран как косвенный, так и прямой способ регулирования натяжения. На данный момент, намотка (размотка) ведётся преимущественно в режиме прямого регулирования натяжения.

Заданные значения натяжения вычисляются с помощью данных программы прокатки и размерных параметров полосы и задаются системе регулирования натяжения.

Фактическое значение натяжения отслеживается измерителями натяжения, которые встроены под стойками подшипников направляющих роликов или

роликов измерения натяжения (т.н. контактный способ измерения плоскостности и натяжения с использованием секционных роликов).

Каждый из таких роликов снабжён пьезоэлектрическими датчиками, измеряющими давление на ролик при огибании его полосой.

Этот метод основан на том факте, что лента, при продольной протяжке, при изменении направления действует радиальной силой на измерительные валки. При неравномерном распределении сил по ширине ленты эта отклоняющая сила локально различается. С помощью измерительных валков, надлежащим образом расположенных по ширине рулона в зонах измерения, может быть определена локальная продольная сила. Отсюда можно рассчитать натяжение полосы [12].

Уровень движения полосы обеспечивает достаточный угол обхвата полосы на измерительном ролике. Угол поддерживается на необходимом уровне с помощью прижимного ролика, установленного над роликом измерения планшетности. Подобная система установлена на двухклетевом реверсивном стане холодной прокатки 2000 ОАО «ММК». Комбинированные ролики, в которых измерительный ролик совмещен с роликом планшетности типа ВFI 2, смонтированы в промежутке между клетью и моталкой.

Комбинированный ролик измеряет неравномерность натяжения по всей ширине полосы путем дифференцированного измерения усилия прижатия поверхности полосы к ролику (рисунок 2). Для этого ролик разделен на сегменты. Каждый сегмент снабжен пьезоэлектрическим датчиком, измеряющим давление на ролик при его огибании полосой. На каждом сегменте установлено по одному датчику.

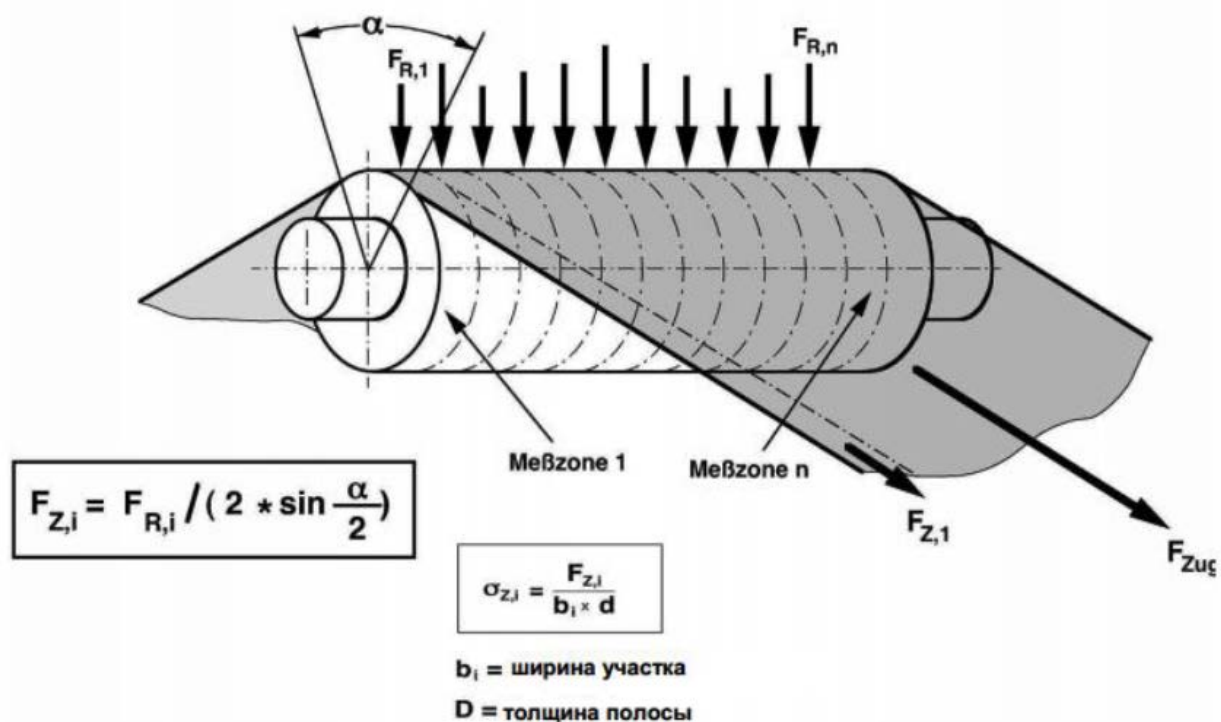


Рисунок 2 - Принцип работы ролика измерения планшетности при измерении натяжения наматываемой полосы

Натяжение определяется в соответствие с формулой:

$$F_T = \frac{F_R}{2 \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)}, \quad (7)$$

где F_R - радиальная сила, с которой изогнутая на угол α полоса давит на ролик, Н;
 α - угол обхвата полосой измерительного ролика, град;
 F_T - измеренное значение натяжения, Н.

Для достаточно точного определения натяжения наибольшее значение имеет необходимая точность системы. Разница в продольном натяжении лент должна составлять менее 2 Н/мм² по всей ширине стана.

Для алюминиевых лент необходимая точность измерений составляет около 0,7 Н/мм² из-за низкого коэффициента упругости.

Самые высокие требования к измерительным приборам предъявляются в том случае, когда минимальные изменения измеряемых величин должны фиксироваться с высоким уровнем точности. Дополнительное ужесточение требований происходит в тех случаях, когда на одной установке через измерительные валки проходят полосы с сильно различающейся толщиной и переменным углом обхвата. Другими словами, при использовании данных датчиков должны учитываться с той же относительной точностью различные отклоняющие силы, а угол обхвата должен поддерживаться на заданном уровне.

Исходя из вышеназванных требований к валкам измерения плоскостности, используются пьезоэлектрические датчики. Эти датчики преобразуют механические воздействия в электрические потенциалы. Они имеют очень малые габариты и способны принимать высокие нагрузки при ничтожно малых прогибах. Сенсор является активным измерительным элементом и не требует отдельного электропитания. Потенциалы, получаемые от сенсора, преобразовываются усилителем в прямо пропорциональные величине натяжения электрические сигналы. К каждому каналу передачи данных подключается несколько датчиков. Обычно для передачи сигналов с датчиков используется от 12 до 24 каналов. Каналы являются мультиплексными с аналого-цифровыми преобразователями с кодово-импульсной модуляцией. Сигналы по каналам передаются бесконтактным оптическим передатчиком от вращающейся к неподвижной части. В дополнение имеется датчик углового положения для инициирования нового измерения для каждого градуса вращения.

Рассмотрим алгоритм регулирования натяжения полосы электроприводом реверсивной моталки стана 2000 ОАО «ММК». Электропривод реверсивной моталки выполнена по системе «Непосредственный преобразователь частоты – синхронный двигатель».

В качестве НПЧ (циклоконвертеров) использованы преобразователи Simover D с системой регулирования Transvektor фирмы Siemens. На рисунке 3 представлена схема косвенного регулирования натяжения наматываемой полосы электроприводом моталки на базе векторного управления. В данной системе используется принцип векторного управления [8,9].

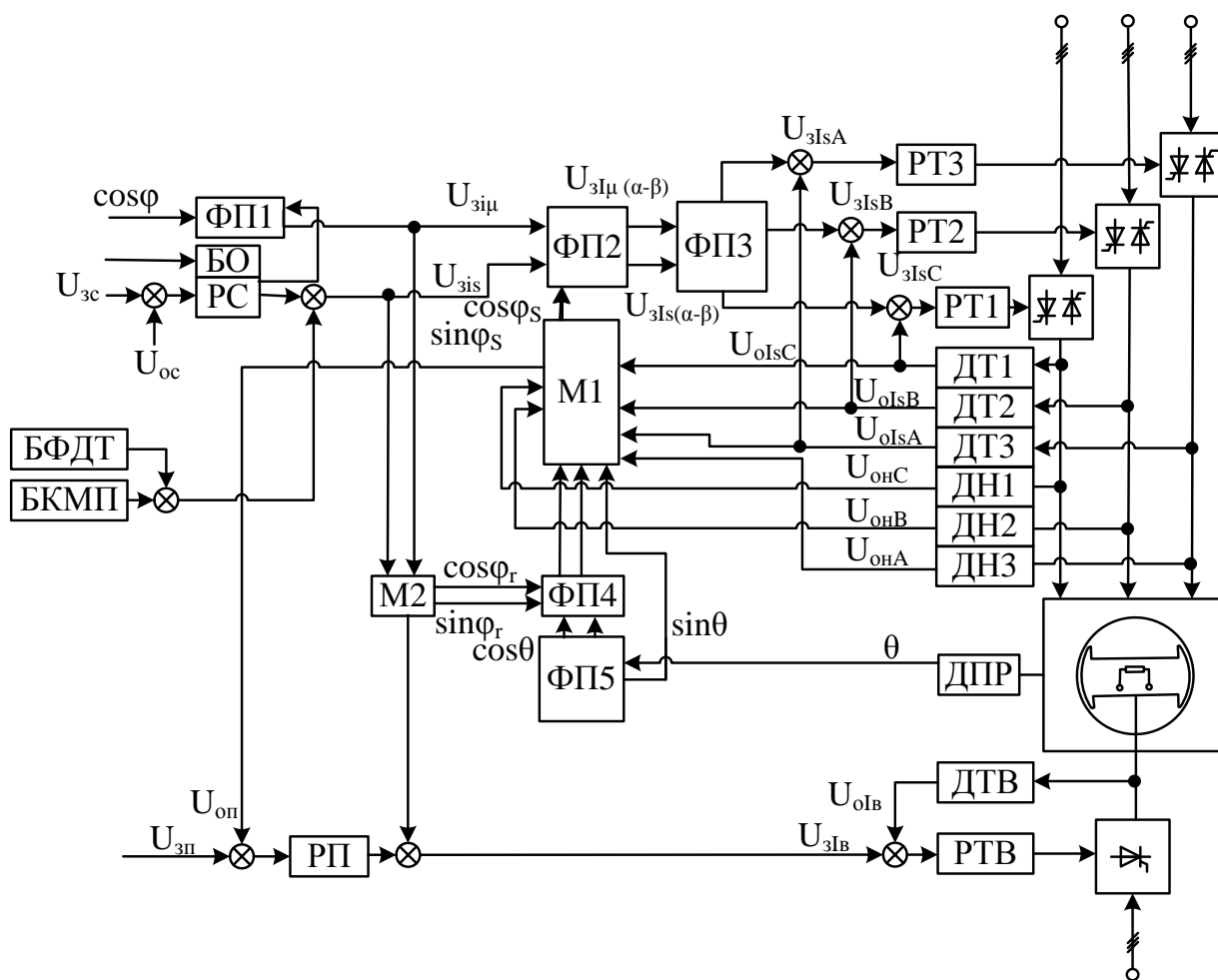


Рисунок 3 - Косвенное регулирование натяжения наматываемой полосы электроприводом моталки на базе векторного управления

Двухканальная система управления даёт возможность осуществить независимое регулирование модуля вектора потокосцепления ротора и скорости ротора при сохранении прямой пропорциональности между моментами, развиваемым двигателем, и намагничивающей силой якоря (статора). Датчики тока ДТ₁-ДТ₃ и датчики напряжения ДН₁-ДН₃ формируют сигналы, пропорциональные токам и напряжениям обмоток статора. Датчик тока ДТВ формирует сигнал, пропорциональный току возбуждения ротора. Сигналы с датчиков тока и напряжения поступают в модель М₁, где вычисляются мгновенные значения магнитного потока и его пространственное расположение относительно статора. Датчик положения ротора ДПР установлен на валу синхронного двигателя и формирует сигнал, пропорциональный углу оси ротора относительно статора. При остановке привода ДПР запоминает текущее положение ротора. Канал управления угловой скоростью ротора является двухконтурным, построенным по принципу подчинённого регулирования координат с внутренним контуром тока статора и внешним контуром скорости. Внутренний трёхмерный контур регулирования тока образован тремя регуляторами РТ₁-РТ₃, имеющими ПИ-структуру с адаптацией в прерывистом режиме. Каждый регулятор подключен к соответствующей фазе

непосредственного преобразователя частоты. Регулятор скорости также имеет ПИ-структуру. Однако в переходных режимах работает только П-часть, что снижает или полностью устраняет в них перерегулирование. В статических режимах работы для исключения просадки скорости подключается интегральная часть. В режиме регулирования натяжения уровень выходного сигнала регулятора скорости ограничивается блоком ограничения БО. При этом учитывается изменение радиуса рулона: сигнал задания $U_{зт}$ является пропорционально зависимым от радиуса. В случае изменения основного потока СД при его работе во второй зоне коэффициент усиления контура скорости поддерживается постоянным. Для этого первый выход РС, который соответствует активной составляющей тока статора, умножается на коэффициент, пропорциональный степени ослабления поля. Второй выход РС с помощью ФП₁ формирует задание на ток намагничивания по оси q в соответствии с заданным коэффициентом мощности $\cos\phi$. С помощью преобразователя поворота ФП₂ осуществляется переход от задания на ток в осях dq к заданию на ток в осях аβ статора. Преобразователь фаз ФП₃ осуществляет переход от двухфазной системы в осях аβ к трёхфазной (стоит отметить, что в одном блоке можно совместить dq-ABC преобразование. Это будет произведено при разработке модели). Регулятор тока возбуждения РТВ имеет ПИ-структуру. Внешний регулятор потока РП так же имеет ПИ-структуру. Модель M_2 используется для компенсации реакции якоря. Блоками формирования динамического тока (БФДТ) и компенсации момента потерь (БКМП) компенсируются соответствующие составляющие момента.

Для управления натяжения требуется расчёт дополнительных параметров и компенсационных сигналов. На рисунке 4 приведена структурная схема прямого управления натяжением двигателем моталки, реализованная на базе технологического модуля Т400 (разматыватель) и в контроллере Simadyn D (моталки) фирмы Siemens.

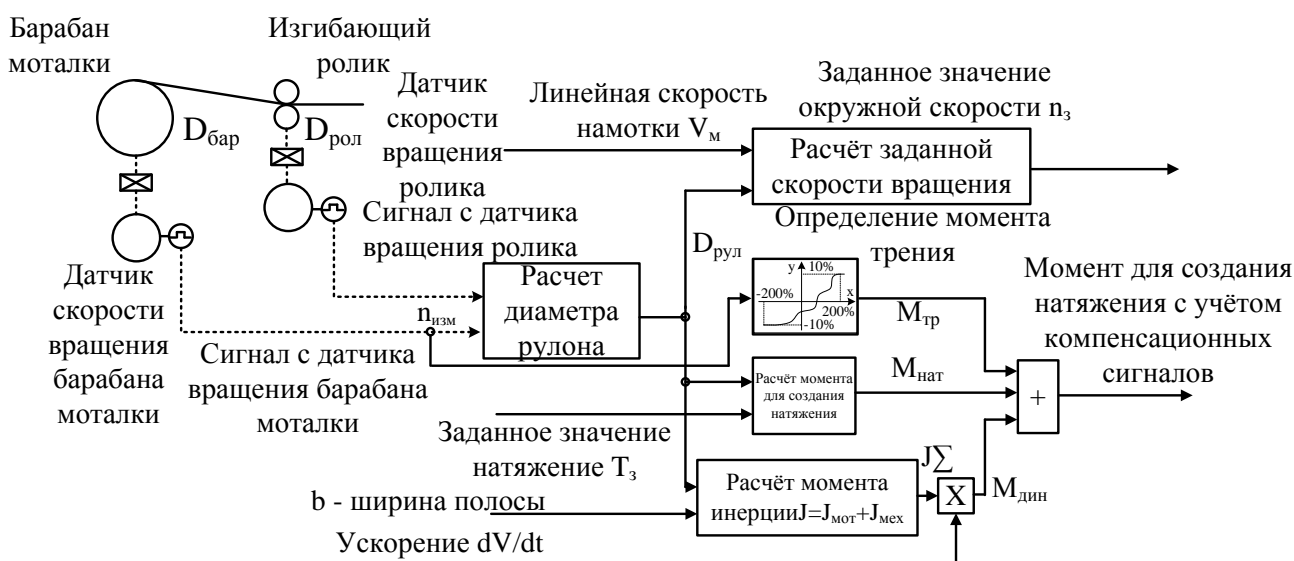


Рисунок 4 - Структурная схема управления технологического модуля Т400 (разматыватель) и контроллера Symadin D (моталки) для намоточно-размоточных механизмов

К входным сигналам данной системы управления относятся: T_3 - заданное натяжение, кН; dV/dt - ускорение, м/с²; V_m - линейная скорость полосы при намотке, м/с; b - ширина полосы, м; сигналы с датчиков скорости вращения барабана моталки, изгибающего ролика и роликов измерения планшетности. Данные величины могут поступать к преобразователю, как по коммуникационной шине Profibus DP, так и через аналоговые входы преобразователя от вышестоящей системы управления агрегатом [13-15].

В схеме на рисунке 4 осуществляется расчёт параметров, необходимых для работы моталки: заданное значение скорости вращения вала барабана n_3 , момент трения $M_{тр}$, момент для создания натяжения $M_{нат}$, сигнал компенсации момента в переходных режимах $M_{дин}$, диаметр рулона и момент инерции с помощью набора свободных функциональных блоков.

Схема работает следующим образом. Поступающие на вход блока «Расчёт диаметра рулона» величины скоростей вращения вала барабана моталки, ролика измерения планшетности, а также исходные значения передаточных чисел редукторов позволяют рассчитать диаметр рулона в соответствии с зависимостью:

$$D_{рул} = \frac{n_{рол} \cdot i_{мот} \cdot D_{рол}}{n_{рол} \cdot i_{рол}}, \quad (8)$$

где $n_{рол}$ - скорость вращения ролика измерения планшетности, об/мин;

$i_{мот}$ - передаточное число электропривода моталки;

$D_{рол}$ - диаметр ролика измерения измерения планшетности, м;

$n_{мот}$ - скорость вращения вала барабана моталки, об/мин;

$i_{рол}$ - передаточное число привода ролика, об/мин;

Блок «Расчёт момента инерции» позволяет рассчитать изменяющийся в процессе намотки момент инерции рулона. Для этого на его вход подаются значения текущего диаметра $D_{рул}$ и ширина полосы b . На основе входных данных, а также плотности материала полосы ρ , диаметра барабана $D_{бар}$ и передаточного числа i редуктора моталки в соответствии с зависимостью вычисляется момент инерции:

$$J_{рул} = \frac{\pi \cdot \rho \cdot b}{32 \cdot i_{рол}^2} \cdot (D_{рул}^4 - D_{бар}^4), \quad (9)$$

где ρ - плотность материала, кг/м³;

$D_{бар}$ - диаметр барабана, м.

Момент, необходимый для создания натяжения, состоит из следующих величин:

$$M_3 = M_{тр} + M_{дин} + M_{нат}, \quad (10)$$

где $M_{тр}$ - момент, необходимы для преодоления сил трения, Н·м;

$M_{\text{дин}}$ - сигнал компенсации момента в переходных режимах, Н·м;

$M_{\text{нат}}$ - момент, необходимый для создания заданного натяжения, Н·м.

Все эти величины рассчитываются в блоках «Определение момента трения» и «Расчёт момента для создания полезного натяжения».

После сложения $J_{\text{рул}}$ с постоянной составляющей момента инерции $J_{\text{мех}}$ (барабан, редуктор моталки) преобразователь получает суммарный момент инерции J , который используется для расчёта динамического момента $M_{\text{дин}}$, требуемого двигателю в переходных процессах.

Момент для создания полезного натяжения $M_{\text{нат}}$ является функцией от заданного натяжения T_3 и текущего радиуса рулона $D_{\text{рул}}$ и рассчитывается по формуле:

$$M_{\text{нат}} = \frac{T_3 \cdot D_{\text{рул}}}{2 \cdot i}, \quad (11)$$

где T_3 - заданное натяжение, Н.

Момент трения $M_{\text{тр}}$ является нелинейной функцией скорости и записывается в преобразователе при наладке, на рисунке 4 представлен в виде блока «Определение момента трения» с нелинейной зависимостью момента трения от скорости.

Динамический момент вычисляется как произведение момента инерции J и ускорения dV/dt :

$$M_{\text{дин}} = J \cdot dV/dt \quad (12)$$

Выходы блоков, суммируясь, формируют значение заданного момента.

Блок «Расчёт заданной скорости вращения» рассчитывает по формуле заданную скорость вращения:

$$n_3 = \frac{V_{\text{пп}} \cdot i \cdot 60}{D_{\text{рул}} \cdot \pi}, \quad (13)$$

где $V_{\text{пп}} = V_3 \pm \Delta V$ - расчётная скорость прокатки, м/с;

V_3 - заданная скорость прокатки, м/с;

ΔV - скорость обгона, м/с;

i - передаточное число редуктора;

$D_{\text{рул}}$ - рассчитанный диаметр, м.

Для системы прямого регулирования натяжения требуется отдельная программная реализация.

Система прямого регулирования натяжения для станов холодной прокатки, реализованная на базе технологического модуля T400 (разматыватель) и в контроллере Simadyn D (моталки), показана на рисунке 5.

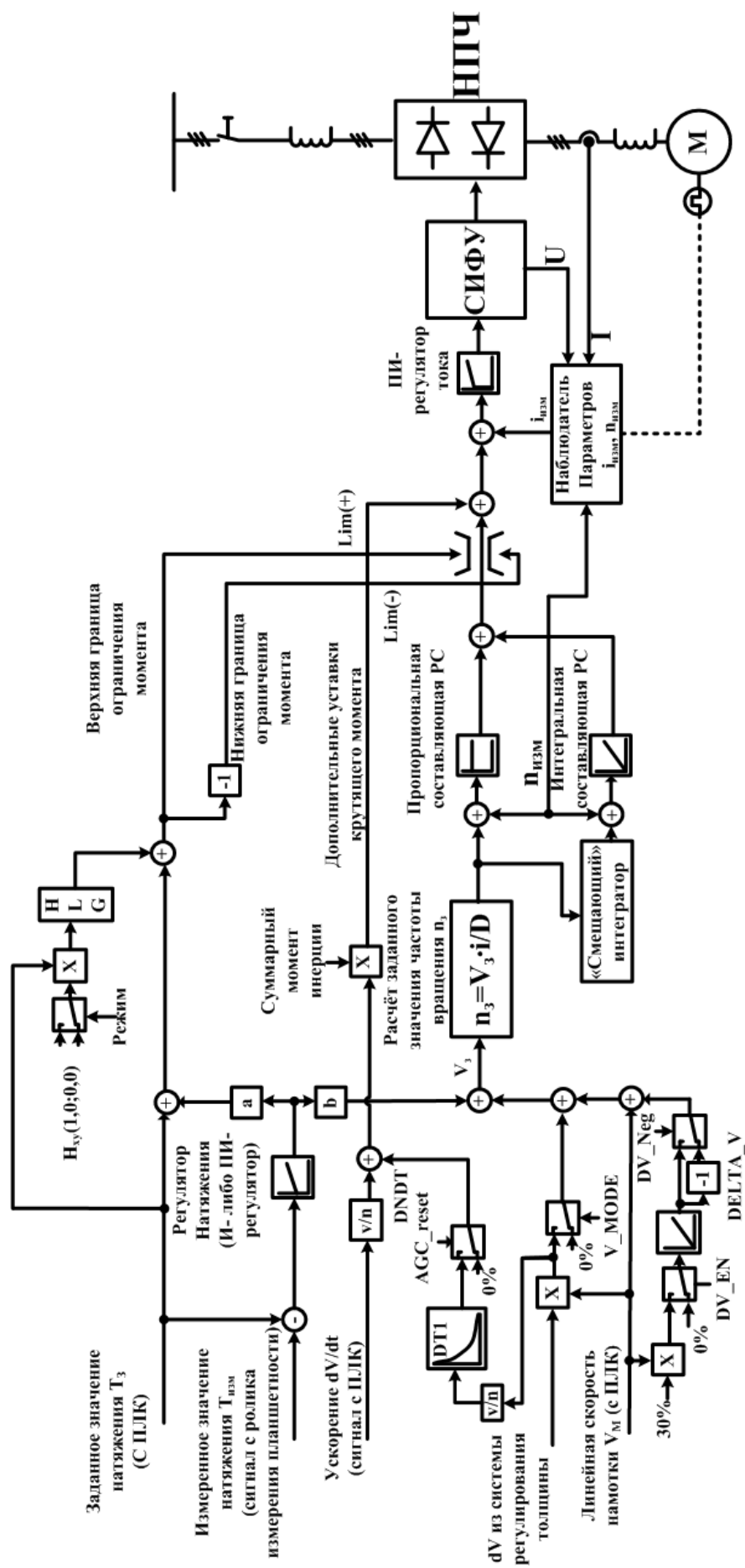


Рисунок 5 - Система регулирования натяжения на станах холодной прокатки

Данная система является трёхконтурной системой подчинённого регулирования параметров, в которой регулятор натяжения выполняет в основном роль корректора линейной скорости полосы при намотке. Внутренний контур регулирования активной составляющей тока статора подчинён внешнему по отношению к нему контуру регулирования скорости.

Внешним по отношению к контуру регулирования скорости является внешний контур регулирования натяжения. Система работает в двух основных режимах: косвенное (V_SET) и прямое регулирование натяжения (T_SET). Косвенное регулирование делится на простой контроль (без выравнивания) и непосредственно косвенный контроль натяжения.

В режиме прямого регулирования натяжения подключается сигнал с датчика натяжения. Переключение режима управления натяжения происходит в зависимости от заданной скорости намотки (при линейных скоростях выше 5-10 м/с включается режим прямого регулирования натяжения). Кроме этого, возможна работа с косвенным регулированием в переходном режиме и с прямым в статическом. В настоящее время, регулирование натяжения в процессе намотки на стане осуществляется по большей части в режиме прямого регулирования.

В режиме простого контроля без выравнивания регулятор скорости устраняет рассогласование между заданным значением линейной скорости $V_{лин}$ и фактическим значением скорости. Ограничение выхода регулятора скорости определяет заданное значение на момент. Заданное значение крутящего момента действует непосредственно в пределах ($Lim [-]$; $Lim [+]$). Значение крутящего момента складывается из трёх составляющих $M_з = M_{тр} + M_{лин} + M_{нат}$. На вход регулятора скорости, помимо сигнала задания на линейную скорость $V_{лин}$ подаётся сигнал дополнительной скорости 30% от $V_{лин}$ путём включения сигнала "DV_EN". Способ применяется только при заправке, в состоянии покоя и в процессе намотки первых витков рулона.

В режиме непосредственного косвенного контроля регулятор скорости работает как ПИ-регулятор. Заданное натяжение влияет на косвенный контроль натяжения с помощью регулятора натяжения. Выход регулятора натяжения действует как добавка к заданной величине крутящего момента и, таким образом, влияет на сигналы ограничения ($Lim [-]$; $Lim [+]$). В этом случае предельные значения крутящего момента должны быть освобождены от сигнала "TQ_EN", а сигнал дополнительной скорости 30% от dV должен быть отключен (сигнал $V_Mode=0$). Регулятор натяжения работает с постоянным коэффициентом усиления (в случае ПИ-структуры). При остановке моталки коэффициент усиления регулятора натяжения должен быть установлен на небольшую величину для того, чтобы процесс остановки протекал без перерегулирования.

В режиме прямого регулирования натяжения контроль натяжения непосредственно действует на заданное значение скорости. Заданное значение натяжения подаётся на регулятор натяжения. Выход регулятора натяжения подаётся в качестве одного из сигналов на сумматор, осуществляющий сложение различных компонент линейной скорости. Регулятор скорости работает в качестве контроллера P, I-компонента устанавливается в режим адаптации к изменяющемуся мо-

менту инерции. Ограничение регулятора скорости формируется с учётом дополнительной скорости (+/- 130%). В этом режиме параметр DV_En=1, V_MODE=0). Регулятор натяжения в процессе изменения линейной скорости $V_{изм} - V_L$ формирует такой закон изменения, чтобы переходный процесс был как можно более плавным. Таким образом, с точки зрения мехатронного модуля, система управления натяжением, при наличии механического рабочего органа, силовых преобразователей, электроники измерительных цепей и микропроцессорных устройств выполняет следующие основные функции:

- управление процессом механического движения мехатронного модуля или многомерной системы в реальном времени с обработкой сенсорной информации;

- организация управления функциональным движением МС, которая предполагает координацию управления механическим движением МС и сопутствующими внешними параметрами (натяжением).

На рисунке 6 представлены осциллограммы, полученные при помощи iBaAnalyzer и представляющие собой графики изменения натяжения с фильтрацией от помех при измерении.

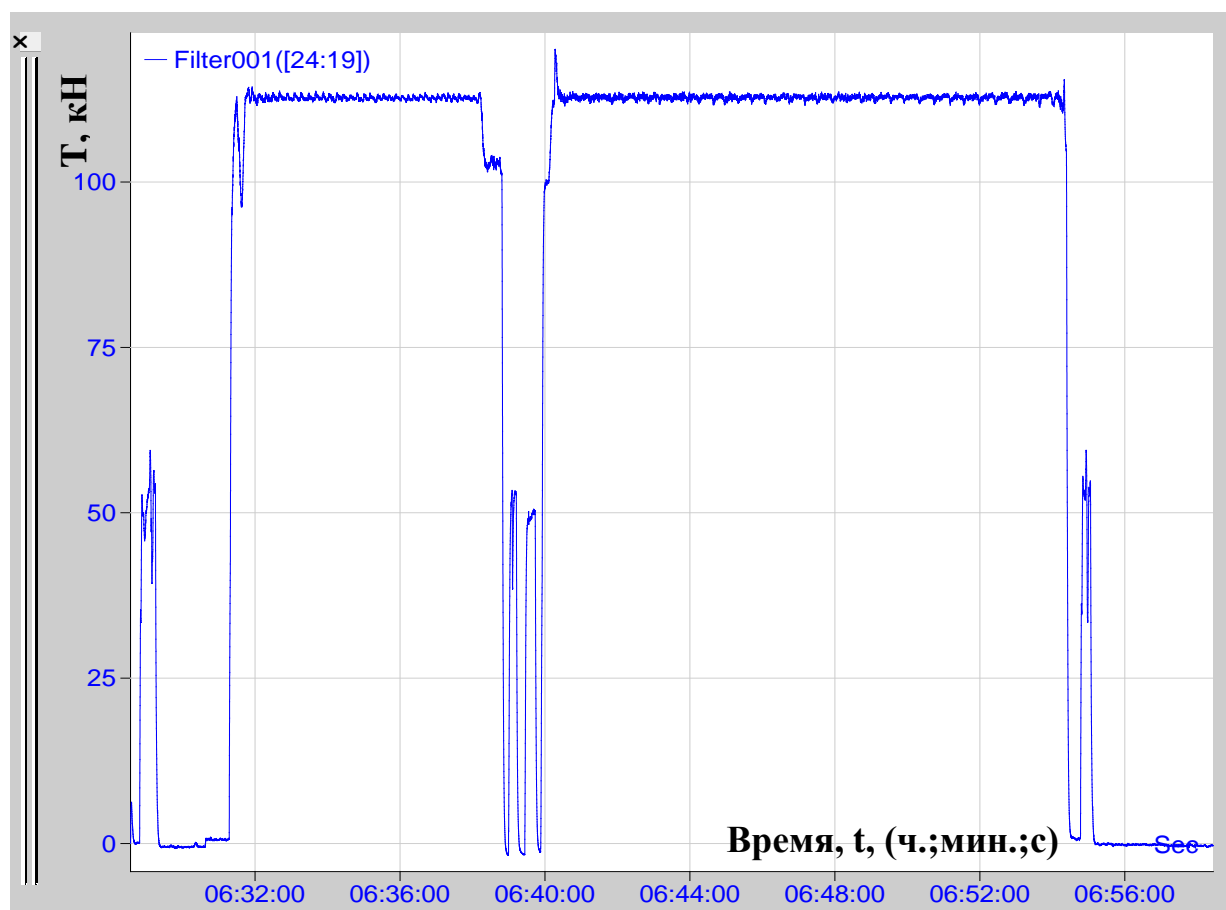


Рисунок 6 - Осциллограмма переходного процесса регуляции натяжения при намотке полосы

Анализ осциллограмм показывает, что натяжение поддерживается на постоянном уровне (на большинстве участков на уровне 112,5 кН).

В тоже время, постоянному уровню натяжения свойственна колебательность в пределах ± 2 кН, что составляет приблизительно 2%. Если говорить о форме и качестве переходных процессов, то процесс роста и спада натяжения на большинстве участков имеет приблизительно экспоненциальный характер с достаточно большой постоянной времени $\approx 0,5$ сек. При этом, на многих участках наблюдаются динамические отклонения, резкие «броски», значительные перегибы. Анализ осциллограмм совместно с осциллограммами окружной скорости вала барабана моталки, момента на вале двигателя показывает, что данные явления связаны с отклонениями, «бросками» и перегибами на осциллограммах данных параметров, а также различием темпов разгона и колебаниями линейных скоростей выхода металла из клетки и линейной скорости намотки в динамических и статических режимах.

Численно, динамическое отклонение от заданного значения натяжения на некоторых участках составляет 17-21 %.

Очевидно, что существующая система регулирования натяжения нуждается в модернизации, т.к. показатели качества регулирования натяжения характеризуют такие недостатки существующей САРН, как:

- большая колебательность переходных процессов (переходный процесс длится порядка 0,5-2 сек, отклонения от заданного уровня на некоторых участках находятся в диапазоне 17-21 % при допустимом уровне 5-15%);

- динамические отклонения и колебательность в статике свидетельствуют о высокой восприимчивости к различным возмущениям в процессе работы.

- простые и некачественные механизмы адаптации, основанные на корректировке изменяющихся параметров системы, входящих в состав настраиваемых параметров регуляторов;

- не обеспечивается требуемая динамика в условиях постоянно изменяющихся параметров системы, отсутствует возможность задания закона изменения натяжения.

Очевидно, что нестационарность работы электроприводов моталок зависит как от способа управления, так и от свойств механизмов в процессе эксплуатации.

Это связано с изменением параметров электромагнитных контуров в цепи «преобразователь-двигатель», потока возбуждения двигателей, моментов инерции механизмов, частот упругих механических колебаний, параметров гибких передач, взаимного изменения механических параметров в многосвязных многодвигательных электромеханических системах (ЭМС) происходит изменение режимных показателей электроприводов. Кроме того, наблюдаются значительные изменения интенсивности возмущающих и управляющих воздействий, что приводит к существенному увеличению динамических ошибок системы и к необходимости коррекции параметров регулирования для минимизации этих ошибок.

Стоит отметить, что система НПЧ-СД - нелинейная система благодаря входящим в её состав существенно нелинейных элементов. В начале размотки двигатель вращается в обратном направлении, и линейная скорость с уменьшением радиуса также уменьшается. В процессе намотки радиус рулона будет увеличиваться, как и линейная скорость. Это приведет к изменению момента инерции

нагрузки, следовательно, системные динамические уравнения изменятся и повлияют на натяжение. С другой стороны, при изменении радиуса изменяется момент инерции рулона и линейная скорость, что приводит к изменениям натяжения. Другими словами, при увеличении радиуса рулона окружная скорость вала моталки должна снижаться, а при уменьшении - увеличиваться с целью постоянства поддержания заданного уровня натяжения.

Вполне очевидно, что система контроля натяжения должна быстро достигать заданного уровня натяжения в процессе намотки (сделал более грамотный вариант – предыдущая фраза была переводная из тех.инструкций). Это показатель хорошей динамической производительности. Кроме того, система должна обеспечить фактическое значение натяжения в пределах допустимого диапазона погрешностей изменения радиуса и линейной скорости. Это означает, что уровень натяжения в процессе намотки или размотки должен иметь более стабильное состояние. В настоящее время в подобных системах применение ПИ-законов регулирования легко реализовать, но его настройка параметров требует опыт, а его способность адаптироваться к изменению параметров системы оставляет желать лучшего.

Комплексная модернизация АСУ ТП станов прокатки, показанная например в [16], подразумевает повышение производительности, качества продукции, надёжности работы оборудования посредством замены морально и физически устаревших образцов, а также сжатые сроки монтажных и пусконаладочных работ в совокупности с интеграцией новой АСУ ТП в существующую структуру АСУ цехового (заводского) уровня с целью, как минимум, ведения контроля за потоком материалов и за соблюдением ТП на всех переделах и за качеством готовой продукции. При этом внимания практически не уделяется совершенствованию алгоритмов регулирования параметров при прокатке.

Становится актуальным вопрос модернизации классических электромеханических систем (мехатронных комплексов второго уровня) и повышение их до уровня мехатронных систем третьего поколения. Достаточно чёткими признаками, позволяющими классифицировать мехатронный модуль, как модуль третьего уровня, это либо интеграция высокоточных и компактных механических узлов, прецизионных информационно-измерительных устройств, вычислительных средств и современных технологий управления, либо применение методов искусственного интеллекта, таких, как:

- экспертные системы;
- нечёткая логика;
- нейронные структуры;
- эволюционные (генетические) алгоритмы;
- гибридные системы на основе вышеперечисленных подходов.

Рассмотрение прокатного агрегата с позиции мехатронного комплекса с достаточной степенью глубины раскрыт в [17].

В основе интеллектуального управления лежит построение высокоорганизованных САР с выполнением таких, традиционно присущих человеку функций, как выработка стратегии поведения и закона управления в условиях неопределён-

ности, обучение и обобщение полученного опыта в условиях изменяющейся внешней среды.

1.5 Анализ применения методов искусственного интеллекта для управления натяжением ленточного материала

Автоматизированные системы управления технологическими процессами являются неотъемлемой частью современных технических устройств, комплексов и процессов металлургического производства, включающего достаточно широкий диапазон распределенных процессов сложного характера с включением различных вероятностных подпроцессов от подготовки сырья до производства металлопроката [2].

Развитие современных систем управления в металлургической отрасли не стоит на месте, и на данном этапе характеризуется следующими ключевыми аспектами:

- возрастающая сложность объектов и систем управления ими;
- повышение требований к темпам разработки и интенсивности функционирования;
- удовлетворение приведенных выше требований меньшими и менее точными знаниями об объекте управления и его окружении в условиях повышенной трудности получения адекватной математической модели.

В этих условиях возникла задача создания систем автоматического управления, которые могли бы использовать знания о технологическом процессе и методы искусственного интеллекта. Постоянный рост вычислительных возможностей управляющих ЭВМ обуславливает необходимость применения методов искусственного интеллекта, как следующего закономерного этапа после освоения методов классической теории автоматического управления.

Основой интеллектуализации мехатронных и робототехнических систем и их дальнейшего развития в первую очередь являются интеллектуальные системы управления. Они априорно ориентированы на работу в условиях неполной и нечеткой исходной информации, неопределенности внешних возмущений и среды функционирования. Такие повышенные требования к системам управления диктуют необходимость привлечения нетрадиционных подходов к управлению с использованием методов искусственного интеллекта и современных информационных технологий. В отличие от традиционных систем управления интеллектуальные системы ориентированы на обработку и использование знаний [2].

Знания – это закономерности предметной области (принципы организации, функциональные взаимосвязи, обработка информационных последовательностей), полученные в результате практической деятельности и профессионального опыта, позволяющие специалистам ставить и решать задачи в этой области.

Современные информационные технологии обладают алгоритмами, позволяющими формировать, обрабатывать и использовать знания для решения задач управления сложными объектами.

Построенные таким образом системы управления называются интеллектуальными. Класс интеллектуальных систем определяется тем, в какой степени система обеспечивает выполнение следующих пяти принципов организации интеллектуальных систем управления [2]:

- наличие тесного информационного взаимодействия управляющих систем с реальным внешним миром и использование специально организованных информационных каналов связи;
- принципиальная открытость систем для повышения интеллектуальности и совершенствования собственного поведения;
- наличие механизмов прогноза изменений внешнего мира и выработки стратегии собственного поведения системы в динамически меняющемся внешнем мире;
- построение управляющей системы в виде многоуровневой (двух- и более) иерархической структуры;
- сохраняемость функционирования (возможно, с некоторой потерей качества или эффективности) при разрыве связей или потере управляющих воздействий от высших уровней иерархии управляющей структуры или повреждении собственной структуры управляющей системы.

Первый принцип подчеркивает непосредственную связь интеллектуальных управляющих систем с внешним миром. Находясь в непрерывном взаимодействии с внешним миром, интеллектуальные системы получают из него всю необходимую информацию для принятия решений и пополнения знаний. Сама управляющая система в свою очередь может оказывать на внешний мир активное воздействие в результате реализации собственного поведения. Модель знаний о внешнем мире интеллектуальной системы должна предполагать возможность изменений внешнего мира и знаний о нем в результате воздействий на него системы. Выполнение принципа информационного взаимодействия системы с внешним миром означает, что любые упрощения модели состояний, вероятностных описаний для представления событий реального внешнего мира непригодны. Именно в этом и состоит специфика систем управления рассматриваемого класса.

Принципиальная открытость систем в соответствии со вторым принципом обеспечивается наличием таких подсистем высшего ранга в иерархической структуре, как самонастройка, самоорганизация и самообучение. Знания интеллектуальной системы управления состоят из двух частей – постоянных (проверенных) знаний, которыми система обладает и постоянно пользуется, и временных (проверяемых) знаний, в которых системы не уверена, с которыми она экспериментирует в процессе обучения.

Знания второго типа либо отбрасываются системой, либо переходят в знания первого типа в зависимости от результатов анализа своего поведения во внешнем мире. Выполнение второго принципа требует организации в управляющей системе процесса приобретения и пополнения знаний.

В соответствии с третьим принципом управляющую систему нельзя считать в достаточной мере интеллектуальной, если она не обладает возможностью прогноза изменений самого внешнего мира и выработки стратегии поведения. Си-

стема без прогноза, функционирующая в динамически меняющемся внешнем мире, может попасть в критическую ситуацию, из которой не сможет найти выхода из-за временных ограничений на работу механизмов формирования управляющих воздействий, определяющих ее поведение, адекватное сложившейся ситуации.

Четвертый принцип позволяет наметить пути построения моделей сложных управляющих систем в тех случаях, когда неточность знаний о модели объекта или о его поведении можно скомпенсировать увеличением числа уровней интеллектуальности, а также использованием совершенных механизмов принятия решений в условиях неопределенности в соответствующих алгоритмах управления.

И, наконец, пятый принцип устанавливает лишь частичную потерю интеллектуальности (но не прекращение функционирования) при отказах в работе высших уровней иерархии системы. Сохранение автономного функционирования в рамках более простого (автономного) поведения системы, характерного для нижних уровней структуры управления, также чрезвычайно важно для автономно функционирующих систем в реальном внешнем мире.

Приведенные пять принципов организации структуры интеллектуальной системы управления определяют класс исследуемых систем. Можно уточнить теперь само понятие «интеллектуальность системы управления», а также ввести понятие «уровень» и «степень интеллектуальности». Введем ряд определений.

Система управления, не имеющая базы знаний, неспособная к самообучению и адаптации, не умеющая прогнозировать события и построенная с использованием только методов классической теории автоматического управления (ТАУ), имеет степень интеллектуальности в малом.

Система управления, имеющая базу знаний, способная к самообучению и адаптации, но не умеющая прогнозировать события, имеет степень интеллектуальности в большом.

Система управления, имеющая базу знаний, способная к самообучению, адаптации и прогнозу событий называется интеллектуальной в целом.

Определение степени интеллектуальности в малом, в большом и в целом введено по аналогии с устойчивостью в малом, большом и целом для классических систем автоматического управления.

Известны два основных направления интеллектуализации мехатронных систем:

- разработка высокоскоростных аппаратных средств вычислительной техники;
- разработка специальных алгоритмов на основе современных методов и технологий обработки знаний.

В практическом смысле, применение методов обработки знаний может рассматриваться, как эффективный способ представления всей дополнительной логики, которая требуется человеку для успешного внедрения и функционирования САУ. Области применения, в которых предпринимаются попытки внедрения методов ИИ, охватывают автоматизация пусковых режимов технологических объектов и обработку чрезвычайных ситуаций, управления объектами с неполной

математической моделью, идентификацию процессов, основанные на знаниях адаптивные системы, анализ технологических состояний и прогнозирование технологических величин. Системы управления с искусственным интеллектом могут быть актуализированы для решения следующих задач, возникающих в металлургическом производстве, и в частности для автоматизированного прокатного производства:

- реализации эвристических и эмпирических алгоритмов управления;
- диагностики или прогнозирования намечающихся нарушений технологических процессов и отказов работы технологического оборудования;
- переформулирования алгоритмов управления на основе новых данных о параметрах объекта;
- выбора подходящих законов управления на основе текущих оценок состояния объекта;
- реализации вспомогательных логических взаимосвязей, полученных на основе практического опыта управления объектом;
- объяснения текущей ситуации оператору (пользователю).
- высокая степень параллелизма нейронных сетей позволяет реализовывать быстрые методы микропроцессорной обработки.

Если рассматривать весь комплекс автоматизации стана холодной прокатки, то он включает:

- автономные автоматические регуляторы (регулирование и стабилизация, например, температуры в зонах нагревательной методической печи, частоты вращения валков прокатных клетей, управления намоточно-размоточными механизмами и др.), функционирующие на уровне прямого управления процессом;
- локальные АСУ ТП (нагрев металла в методических печах, размеры проката, предварительное натяжение, петлерегулирование, темп прокатки), функционирующие на уровне супервизорного управления, координирующего процессы измерения и алгоритмы локальных АСУ ТП;
- интегрированные АСУ производством, решающие задачи планирования, сбыта и отгрузки металлопродукции, обеспечения заготовкой, выбора режима и управления прокаткой, функционирующие на уровне поддержки принятия решений с использованием большого объема знаний и текущей информации о процессе. С точки зрения внедрения интеллектуальных методов в приводной сектор металлургических агрегатов, наиболее очевидным классом становятся системы, функционирующие на уровне прямого управления процессом, как, например, системы регулирования толщины, планшетности, натяжения и т.д.

Необходимо отметить, что при создании систем управления процессами прокатки в реальном времени скорость, в отличие от других металлургических процессов несомненно является важнейшим фактором, так как в этом случае необходимо отслеживать и управлять быстрыми процессами. Один из путей повышения скорости работы систем с искусственным интеллектом для управления процессом прокатки находится в области применения параллельных вычислительных систем, со специально созданной для искусственного интеллекта параллельной архитектурой.

Общая постановка задачи управления может быть сформулирована следующим образом. Имеется некоторый динамический объект, поведение которого описывается вектором выходов (управляемых переменных) $y=(y_1, y_2, \dots, y_p)^T$ и вектором переменных состояния $x=(x_1, x_2, \dots, x_n)^T$. Требуется перевести данный объект из начального состояния $x(t_0)$, в котором он находился в начальный момент времени $t=t_0$, в заданное конечное состояние x^* , которому соответствует определённое значение вектора выходов y^* .

Для решения этой задачи, т.е. для управления состоянием объекта, используется специальное управляющее устройство, часто называемое регулятором, в функции которого входит формирование вектора управляющих воздействий (т.е. входов объекта) $u=(u_1, u_2, \dots, u_m)^T$ в соответствии с заданной программой, определяемой значениями вектора задающих воздействий (команд управления) $g=(g_1, g_2, \dots, g_r)^T$ и текущими (измеряемыми) значениями компонентов вектора выходов y , вектора состояния x и вектора внешних возмущений $f=(f_1, f_2, \dots, f_r)^T$.

Классическая процедура синтеза включает в себя построение математической модели объекта управления (в виде дифференциальных, разностных или интегральных уравнений, частотных характеристик и т.д.), задание требований к качеству процессов управления, т.е. к поведению САУ в целом, определение структуры и параметров управляющего устройства (в виде некоторой аналитической зависимости, выражающей вектор u , через векторы g, x, y, f).

Вместе с тем, применение данного подхода на практике встречается с рядом серьёзных затруднений. Так, точная математическая модель реального объекта часто оказывается слишком сложной или совсем неизвестной. Изменения окружающей среды приводят к действию на объект различного рода возмущений - сигнальных, параметрических, структурных, представляющих собой дополнительный источник неопределённости о характеристиках объекта. Сложность решения данной задачи обусловлена ещё и тем, что сами требования к системе зачастую могут быть заданы лишь приближённо. Более того, некоторые из них вообще могут оказаться взаимно противоречивыми. Понятно, что стремление найти решение задачи синтеза в классе простейших (стандартных) алгоритмов управления (на базе т.н. ПИ- и ПИД-регуляторов) оказывается выполнимым только в тех случаях, когда объект описывается достаточно простой и понятной моделью, т.е. справедлива схема «точный объект → точный регулятор».

Попытки построения простых адаптивных регуляторов, небольшое количество параметров которых автоматически перестраивается при изменении параметров объекта, также имеют весьма ограниченную область применения. Причины здесь примерно те же: трудно подобрать простой и надёжный алгоритм адаптации, который бы оставался работоспособен при небольшом количестве изменяемых параметров, а также в случае широкого диапазона изменения параметров объекта.

Если объект относится к категории сложных динамических объектов, описывается сложными математическими зависимостями, имеет существенно нелинейные и высокочастотные характеристики, то выбор алгоритма адаптации резко усложняется.

Выходом из сложившейся ситуации является использование алгоритмов интеллектуального управления, предполагающих отказ от необходимости получения сверхточной математической модели объекта, ориентации на применение простейших линейных алгоритмов формирования управляющих воздействия, стремления во что бы то ни стало воспользоваться известными разработчику методами синтеза, ранее положительно зарекомендовавшими себя для других, более простых классов объектов. В основе интеллектуального управления лежит построение высокоорганизованных САУ с выполнением таких, традиционно присущих человеку функций, как выработка стратегии поведения и закона управления в условиях неопределённости, обучение и обобщение полученного опыта в условиях изменяющейся внешней среды.

В литературных изданиях вопрос применения интеллектуальных технологий применительно к управлению натяжением освещается в ничтожно малом количестве. По крайней мере, автору в процессе тщательного поиска качественной информации обнаружить таких источников не удалось. Отдельные фрагменты и частные случаи встречаются в периодических изданиях, в т.ч. и в зарубежных. В [18] показано нечеткое управление с регулируемым коэффициентом « α » в системе прямого контроля натяжения. В этой системе параметр « α » отвечает за адаптацию базы правил в процессе работы системы. В [19] исследуются адаптации параметров ПИД-регулятора с помощью одиночного нейрона применительно к системе косвенного регулирования натяжения. В [20] исследуется поддержание натяжения при размотке, при этом вводится дополнительная инверсная модель двух намоточных механизмов, связанных перематываемым материалом, с дополнительным каналом т.н. активного демпфирования. Это позволило повысить устойчивость системы к различным помехам. При этом применялся стандартный ПИД-регулятор. В [21] применяется т.н. «наблюдатель» - математическая модель тех. процесса или сложных для измерения параметров и подсистема выравнивания скоростей, которая позволила повысить качество управления и быстродействия, а так же устранить броски натяжения в динамических режимах, вызванных неравенством скоростей механизмов. В [22] используются μ - и H_∞ -контроллеры для повышения робастности системы регулирования натяжения. В [23,24] содержатся успешные примеры применения нейросетевых технологий в системах прямого регулирования натяжения материала. Продолжать список публикаций можно достаточно долго. Если обобщить информацию, содержащуюся в них, касающуюся систем регулирования натяжения, то можно сформулировать требования к мехатронным комплексам для регулирования натяжения наматываемого материала:

- качественная адаптация при изменении параметров системы;
- простота и применение методов, не требующих предварительной точной математической идентификации объекта управления;
- высокая устойчивость к различным возмущениям;
- в [8] приводится ещё один крайне важный с точки зрения качества намотки металлической полосы момент - закон регулирования натяжения. Отсюда выводим четвёртое направление - задание закона регулирования натяжения.

Фирма SIEMENS в течении нескольких лет использует различные методы ИИ в системах автоматизации прокатных станов [25]. Примером применения нейронной сети является работа над повышением точности прогнозирования усилия прокатки на широкополосных станах горячей прокатки с помощью ИНС. Чем точнее прогнозируема величина усилия прокатки, тем точнее можно выполнить предварительные уставки прокатного стана и тем меньше отклонения по толщине в начале процесса. При этом нейронные сети, фактически, заменяют имеющуюся модель усилия прокатки, вначале функционирования просто дополняя её и корректируя остаточную ошибку, а по окончании обучения полностью заменяющую её. В частности, они учитывают влияние химического состава стали на её твердость. По сравнению с обычными методами точность прогнозирования усилия прокатки повысилась в среднем на 20%. В отличие от обычной техники регулирования и управления, они могут самосовершенствоваться в процессе работы и приспособляться к изменившимся условиям. Другие примеры применения можно посмотреть в [26].

Имеющийся опыт использования нейронных сетей в системах автоматизации прокатного производства является положительным, а связанные с их внедрением расходы оправданы. В будущем тенденция использования искусственного интеллекта в системах автоматизации будет развиваться.

Выводы по главе I

1. Дано описание назначения намоточно-размоточных механизмов. Анализ технологических особенностей моталки совместно с САРН позволяет рассматривать её с позиций мехатронного комплекса второго уровня.

2. В результате анализа работы существующего электроприводного комплекса САРН стана было выяснено, что существующая система характеризуется вполне приемлемыми показателями, которые можно улучшить.

3. Для проведения анализа работы существующего электроприводного комплекса САРН, моделирования его работы, а также для дальнейшего его усовершенствования, требуется разработка математической модели технологической схемы «клеть-полоса-моталка», содержащей математические модели электродвигателя, изменения параметров рулона при намотке и средства измерения натяжения. При разработке модели в качестве допущения принимается непосредственно не моделировать датчик натяжения. Стоит отметить, что угол обхвата полосой ролика планшетности создаёт установленный над ним прижимной ролик. Существенной важности для САРН он не имеет (гидропривод подъёма трёхпозиционный, осуществляющий лишь поддержание заданного угла). Поэтому рассчитываемый по модели полосы сигнал натяжения принимается в качестве такового, как если бы он снимался непосредственно с датчика натяжения.

4. Широко используемый регулируемый высоковольтный синхронный электропривод моталок является преимущественно нелинейной системой и оказывает неблагоприятное воздействие на динамические свойства главных привод-

ных линий. Следует разрабатывать законы и принципы работы САРН двигателей, снижающие влияние данных факторов на качество регулировки натяжения.

5. Анализ существующих систем регулирования натяжения полосы станов холодной прокатки показал, что практически все современные что практически все современные системы базируются на прямом измерении натяжении стальной полосы, что подразумевает модернизацию без глубокой реконструкции моталок, поскольку всё необходимое оборудования, в т.ч. и ролики прямого регулирования натяжения, уже установлены. Поэтому усовершенствование САРН стана является работой по повышению эффективности регулирования натяжения прямого типа.

6. Стремительное повышение вычислительных мощностей ЭВМ в совокупности с развитием методов ИИ позволяет в настоящее время рассматривать варианты синтеза нейросетевых САУ для модернизации существующих САР синхронных электроприводов и внедрения их на стане холодной прокатки для регулирования натяжения с целью повышения качества регулирования, повышения энергетических показателей электропривода и осуществления различных режимов регулировки натяжения при прокатке металла.

ГЛАВА II РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ «КЛЕТЬ-ПОЛОСА-МОТАЛКА»

2.1 Состав технологической системы «клеть-полоса-моталка» и особенности намотки полосы в данной системе

На рисунке 7 представлена технологическая схема смотки полосы в рулон. Такая система называется системой «клеть-полоса-моталка».

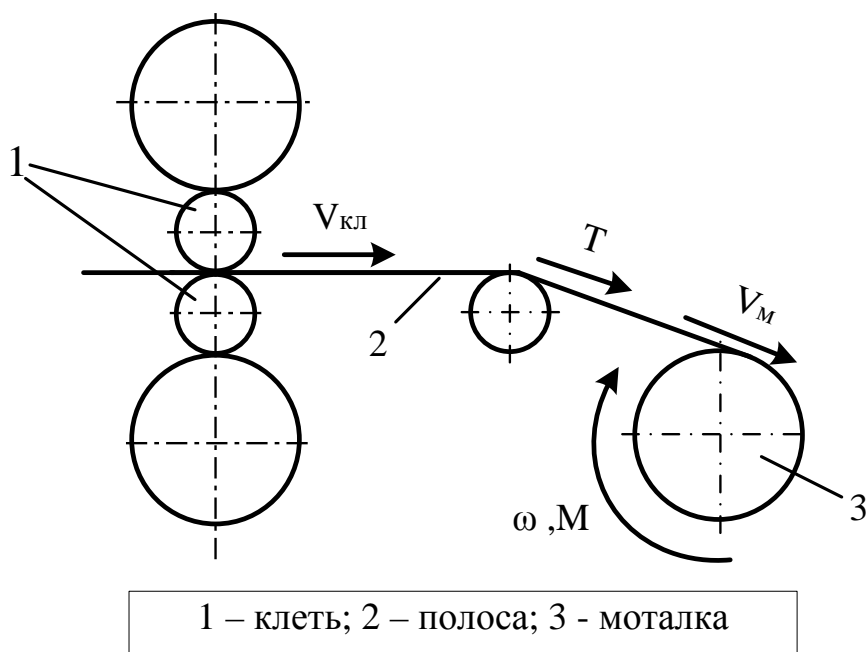


Рисунок 7 - Технологическая система смотки полосы в рулон «клеть-полоса-моталка»

Силовая часть мехатронного комплекса моталки содержит синхронный электродвигатель мощностью 3,55 МВт (205/658 об/мин) для вращения барабана с непосредственным преобразователем частоты с векторным управлением и системой регулирования натяжения (САРН). Клеть содержит синхронный электродвигатель мощностью 6 МВт (252/625 об/мин) для вращения горизонтальных валков и системой автоматического регулирования скорости (САРС).

Моталка и клеть в процессе прокатки взаимосвязаны прокатываемой полосой. Анализ физических процессов, происходящих в двух этих взаимосвязанных электромехатронных системах, позволяет с целью создания математической модели провести структурную декомпозицию на следующие подобъекты: синхронные двигатели моталки и клетки; непосредственные преобразователи частоты и тиристорные возбудители двигателей моталки и клетки; источники питания; системы векторного управления синхронных электродвигателей моталки и клетки; механизм моталки и очаг деформации металла в клетке; прокатываемая полоса.

Функциональная схема комплексной математической модели взаимосвязанных электромехатронных систем клетки и моталки, связанных полосой, представлена на рисунке 8.

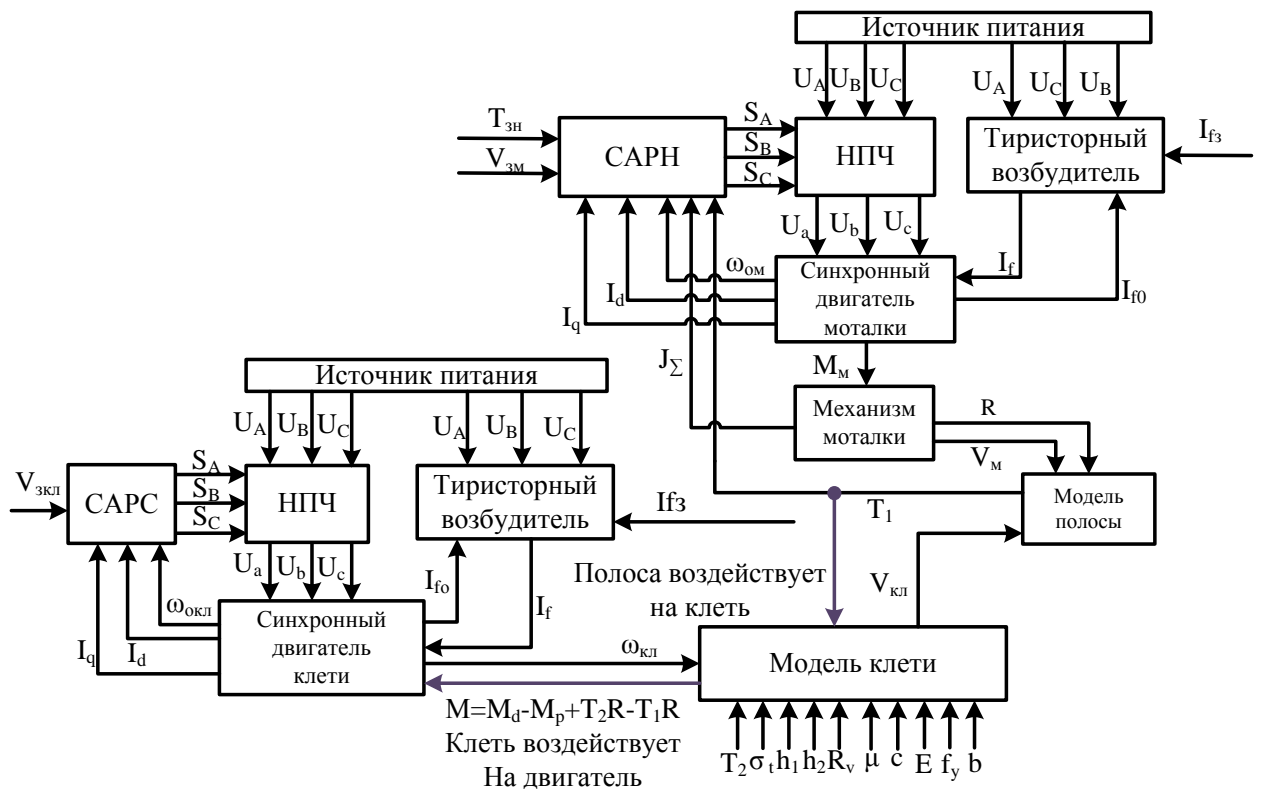


Рисунок 8 - Функциональная схема математической модели взаимосвязанных электроприводов клетки и моталки стана 2000 холодной прокатки

Далее будет рассмотрено математическое описание каждого из обозначенных объектов в отдельности.

Наличие обжатия полосы в этой системе обуславливает отличие в физике процесса смотки полосы на подобных моталках от систем, где обжатие отсутствует.

Натяжение в полосе на участке смотки математически выражается пропорционально интегралу разности между линейной скоростью рулона V_m и линейной скоростью полосы при выходе из клетки $V_{кл}$, определяемому в соответствии с выражением:

$$T = \frac{E \cdot b \cdot h}{L} \int_0^t (V_m - V_{кл}) dt + T_0, \quad (14)$$

где T_0 - начальное натяжение, Н;

E - модуль упругости материала полосы, Н/м²;

b - ширина полосы, м;

h - толщина полосы, м;

L - длина полосы между рулоном и тянущим роликом, м;

При наматывании полосы на барабан моталки радиус рулона постоянно увеличивается, что приводит к увеличению скорости наматывания полосы относительно скорости выхода металла из клетки. В связи с этим и возникает разность скоростей $V_m - V_{кл}$, которая в случае неизменной угловой скорости моталки ω_m в

процессе смотки приведёт к постоянному увеличению натяжения в полосе вплоть до её обрыва. Поэтому при смотке угловая скорость двигателя моталки изменяется в соответствии с равенством $V_M = V_{кл}$, и лишь кратковременно, при неустановившемся режиме, возможно неравенство этих скоростей.

Наличие обжатия полосы в первую очередь ведёт к различию между выражениями для линейной скорости полосы на выходе из клетки (для случая $T \leq 0,8 \cdot \sigma_T \cdot Q$ - это условие возникновения опережения):

$$V_K = \frac{\omega_K \cdot R_K}{i_K} (1 + S_0 + \alpha \cdot T), \quad (15)$$

где $\omega_{кл}$, $R_{кл}$, $i_{кл}$ - угловая скорость, радиус и передаточное число редуктора клетки;
 σ_T - предел текучести материала полосы;
 S_0 - опережение при прокатке;
 α - коэффициент пропорциональности между опережением и натяжением;

Скорость выхода металла из клетки растёт с увеличением натяжения, вызывающего дополнительное опережение металла. Это обстоятельство способствует выравниванию скоростей V_M и $V_{кл}$ при возникновении их разности.

2.2 Математическая модель явнополюсных синхронных двигателей с демпферной обмоткой моталки и клетки

Для осуществления исследования динамических процессов в электромагнитной системе необходима модель электрических машин. Описание электромагнитных и электромеханических процессов в трехфазном синхронном двигателе при различных способах управления наиболее полно и точно может быть выполнено в естественной системе координат А,В,С, оси которой сдвинуты друг относительно друга на 120° , что соответствует конструкции синхронного двигателя.

При этом следует отметить, что математическое моделирование и аналитические расчёты в трёхфазной системе координат крайне сложны и трудоёмки, особенно при построении систем автоматического регулирования синхронного двигателя. Во многих трудах [27-29] процессы преобразования электромеханической энергии предлагается рассматривать на основе моделей двухфазной машины двойного питания с гладким цилиндрическим ротором. В связи с этим, воспользуемся математической моделью двухфазного явнополюсного синхронного двигателя с демпферной обмоткой в системе координат d-q, связанной с ротором и вращающейся вместе с ним [30,31].

При построении математической модели синхронного двигателя обычно применяют следующие допущения:

- отсутствует насыщение магнитной цепи, не учитывают потери в стали, гистерезис, вихревые токи и эффект вытеснения тока;
- индуктивность рассеяния не зависит от положения ротора в пространстве;
- равномерный воздушный зазор;

- двухфазные обмотки статора симметричные и расположены под прямым электрическим углом на поверхности статора;
 - двухфазные демпферные обмотки симметричные и расположены таким же образом на поверхности ротора;
 - по обмоткам статора протекают синусоидальные токи;
 - к обмотке возбуждения ротора прикладывается напряжение постоянного тока;
 - фазные токи не содержат токов нулевой последовательности;
- Электрические уравнения двигателя в естественной трёхфазной системе координат могут быть выражены в виде:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Psi_{sA} \\ \Psi_{sB} \\ \Psi_{sC} \\ \Psi_f \\ \Psi_D \\ \Psi_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{sA} \\ U_{sB} \\ U_{sC} \\ U_f \\ U_D \\ U_Q \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{sA} \\ I_{sB} \\ I_{sC} \\ I_f \\ I_D \\ I_Q \end{bmatrix}, \quad (16)$$

где $\Psi_{sA}, \Psi_{sB}, \Psi_{sC}, \Psi_f, \Psi_D, \Psi_Q$ - потокосцепления статора по соответствующим осям, обмотки возбуждения и демпферных обмоток;

$U_{sA}, U_{sB}, U_{sC}, U_f, U_D, U_Q$ - напряжения на статоре по соответствующим осям, обмотки возбуждения и демпферных обмоток;

$I_{sA}, I_{sB}, I_{sC}, I_f, I_D, I_Q$ - токи статора по соответствующим осям, обмотки возбуждения и демпферных обмоток;

R_s - сопротивление статора;

Схема двигателя в трёхфазной системе координат показана на рисунке 9.

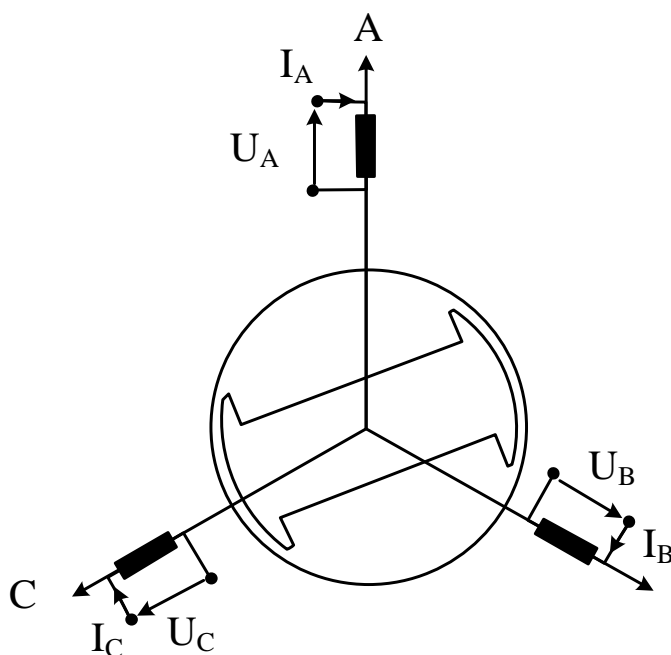


Рисунок 9 - Трёхфазный синхронный двигатель в осях ABC

Для того, чтобы получить систему уравнений для величин напряжений, токов и потокосцеплений, необходимо использовать АВС-dq-преобразование. Его можно разделить на два этапа. Первым шагом является преобразование трёхфазных параметров статора с индексами А,В,С в глобальной системе отсчета к неподвижной двухфазной системе координат с индексами α и β :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Psi_\alpha \\ \Psi_\beta \\ \Psi_f \\ \Psi_D \\ \Psi_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_\alpha \\ U_\beta \\ U_f \\ U_D \\ U_Q \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \\ I_f \\ I_D \\ I_Q \end{bmatrix}, \quad (17)$$

где Ψ_α, Ψ_β - потокосцепления по соответствующим осям

U_α, U_β - напряжения по соответствующим осям

I_α, I_β - токи по соответствующим осям;

Схема двигателя в неподвижной двухфазной системе координат показана на рисунке 10.

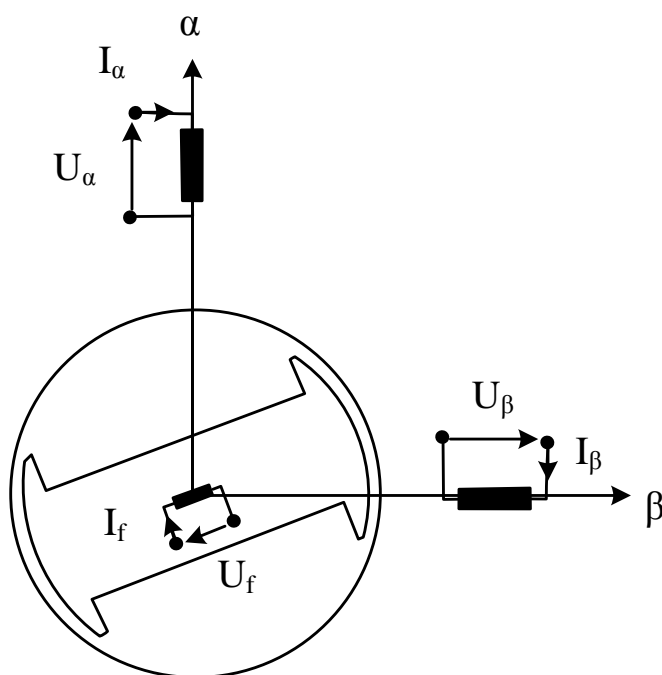


Рисунок 10 - Трёхфазная синхронная машина в осях $\alpha\beta$

После трёх- и двухфазного преобразования пространственный вектор разделяется на действительную и мнимую компоненту.

Обобщённый вектор записывается в виде:

$$U_{\alpha\beta} = U_\alpha + j \cdot U_\beta = k \cdot [U_{sA} + a \cdot U_{sB} + a^2 \cdot U_{sC}] = k \cdot [U_{sA} + e^{-j \frac{2\pi}{3}} \cdot U_{sB} + e^{j \frac{2\pi}{3}} \cdot U_{sC}], \quad (18)$$

где k - произвольная постоянная преобразования:

Если k принять равным $2/3$, получим:

$$U_{\alpha\beta} = \frac{2}{3} \cdot [U_{sA} + a \cdot U_{sB} + a^2 \cdot U_{sC}] \quad (19)$$

Тогда выражения для U_α и U_β примут вид:

$$U_\alpha = \frac{2}{3} \cdot [U_{sA} - \frac{1}{2} \cdot U_{sB} - \frac{1}{2} \cdot U_{sC}] \quad (20)$$

$$U_\beta = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot [U_{sB} - U_{sC}] \quad (21)$$

На втором шаге система уравнений параметров синхронного двигателя в неподвижной системе координат преобразуется к вращающейся системе координат dq . Вследствие сложных уравнений двигателя в неподвижной системе отсчёта, данная система координат весьма полезна для наблюдения за поведением синхронного двигателя в опорной системе, ориентированной на ротор. Опорная система вращается с угловой скоростью ротора. Из этого следует, что значения векторов прямой и квадратурной оси имеют постоянный модуль, т.е. длину. На прямой оси имеется обмотка возбуждения ротора. Демпферная обмотка заменена двумя обмотками - одна на прямой оси d , а другой - по квадратурной оси q . Статическая трехфазная обмотка также заменяется на две обмотки - одна по прямой оси d и другая по квадратурной оси q .

Модель двигателя в опорной системе, ориентированной на ротор, показана на рисунке 11.

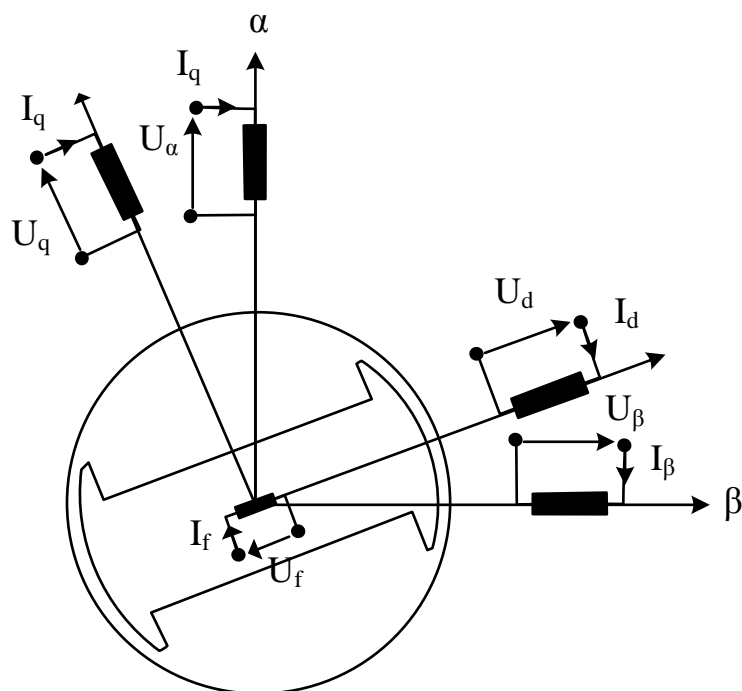


Рисунок 11 - Синхронный двигатель в осях d - q

Статические переменные в электрических уравнениях должны быть преобразованы в ориентированную по ротору систему отсчёта. После этого мы получаем два пространственных вектора, которые не меняются в функции времени и имеют устойчивые модули.

$$U_{dq} = U_d + j \cdot U_q = U_{\alpha\beta} \cdot e^{-j \frac{2\pi}{3}} \quad (22)$$

Разделяя действительную и мнимую части системы координат d-q, получим:

$$\begin{cases} U_d = [U_\alpha \cdot \cos\theta + U_\beta \cdot \sin\theta] \\ U_q = [-U_\alpha \cdot \sin\theta + U_\beta \cdot \cos\theta] \end{cases} \quad (23)$$

Вместе эти два шага дают следующие после некоторых тригонометрических вычислений выражения:

$$\begin{cases} U_d = \frac{2}{3} \cdot [U_a \cdot \cos\theta + U_b \cdot \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) + U_c \cdot \cos(\theta + \frac{2\pi}{3})] \\ U_q = \frac{2}{3} \cdot [U_a \cdot \sin\theta + U_b \cdot \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) + U_c \cdot \sin(\theta + \frac{2\pi}{3})] \end{cases} \quad (24)$$

В общем виде, уравнение напряжения статора в неподвижной системе отсчёта может быть написано как:

$$U_s^s = R_s I_s^s + \frac{d\Psi_s^s}{dt} \quad (25)$$

Умножая на $e^{-j\theta_r}$. Получаем напряжение статора U_s в опорной системе ротора:

$$U_s^s e^{-j\theta_r} = U_s^r = R_s I_s^r + \frac{d\Psi_s^r}{dt} + j\omega_r \Psi_s^r \quad (26)$$

С другой стороны, уравнения равновесий статорных напряжений имеют вид:

$$\begin{cases} \|U_s\| = R_s \|i_s\| + \frac{d}{dt} \|\Psi_s\| \Rightarrow \begin{bmatrix} U_{sa} \\ U_{sb} \\ U_{sc} \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Psi_{sa} \\ \Psi_{sb} \\ \Psi_{sc} \end{bmatrix} \\ \|U_r\| = R_r \|i_r\| + \frac{d}{dt} \|\Psi_r\| \Rightarrow \begin{bmatrix} U_{ra} \\ U_{rb} \\ U_{rc} \end{bmatrix} = R_r \begin{bmatrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Psi_{ra} \\ \Psi_{rb} \\ \Psi_{rc} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (27)$$

Потокоцепления статора равны:

$$\|\Psi_S\| = \|\mathbf{L}'_{ss}\| \|\mathbf{i}_S\| + \|\mathbf{M}'_{sr}\| \mathbf{i}_f \quad (28)$$

Матрица индуктивности статора выражается:

$$\begin{aligned} \|\mathbf{L}'_{ss}\| &= \begin{vmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} \end{vmatrix} = \\ &= \begin{vmatrix} L_{cp} + \cos\theta & -M_{cp} + L_m \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -M_{cp} + L_m \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -M_{cp} + L_m \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & L_{cp} + L_m \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -M_{cp} + L_m \cos\theta \\ -M_{cp} + L_m \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -M_{cp} + L_m \cos\theta & L_{cp} + L_m \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \end{vmatrix} \end{aligned} \quad (29)$$

где L_{cp} и M_{cp} - средние значения собственной фазы статора и взаимной индуктивности между двумя фазами статора

Матрица взаимных индуктивностей фазы статора и обмотки возбуждения:

$$\|\mathbf{M}'_{ss}\| = \begin{vmatrix} L_{af} \\ L_{bf} \\ L_{cf} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} M_f \cos\theta \\ M_f \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ M_f \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{vmatrix} \quad (30)$$

Потокоцепление обмотки возбуждения равно:

$$\begin{aligned} \Psi_f &= \|\mathbf{M}'_{rs}\| \|\mathbf{i}_f\| + L_{ff} \mathbf{i}_f = \Psi_f = \|\mathbf{L}'_{fa} \quad L_{fb} \quad L_{fc}\| \|\mathbf{i}_f\| + L_{ff} \mathbf{i}_f = \\ &= \begin{vmatrix} M_f \cos\theta & M_f \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & M_f \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{vmatrix} \|\mathbf{i}_f\| + L_{ff} \mathbf{i}_f, \end{aligned} \quad (31)$$

где L_{ff} - собственная индуктивность обмотки возбуждения;

M_f - максимальное значение взаимной индукции между обмоткой возбуждения и обмоткой статора.

Матрица этого преобразований в системе отсчёта d-q для уравнения статора имеет вид:

$$\|\mathbf{A}_s\| = \frac{2}{3} \begin{vmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin\theta & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{vmatrix} \quad (32)$$

Так, формулы преобразования токов статора к составляющим по осям d-q получим на основе выражения:

$$\|i_{d,q}\| = \|A_s\| \|i_s\| \quad (33)$$

Они имеют вид:

$$\begin{cases} i_d = \frac{2}{3} \cdot [i_{sa} \cdot \cos\theta + i_{sb} \cdot \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) + i_{sc} \cdot \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right)] \\ i_q = \frac{2}{3} \cdot [i_{sa} \cdot \sin\theta + i_{sb} \cdot \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) + i_{sc} \cdot \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right)] \\ i_0 = \frac{2}{3} \cdot [i_{sa} \cdot \sin\theta + i_{sb} \cdot \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) + i_{sc} \cdot \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right)] \end{cases} \quad (34)$$

Умножим обе части равенства на матрицу $\|A_s\|$. После преобразований получим в развёрнутом виде соответствующие выражения. Аналогично, это выражение можно разделить на действительные и мнимые компоненты, и, таким образом, мы получаем прямую и квадратурную составляющую напряжения статора:

$$\begin{cases} U_{1d} = R_1 \cdot I_{1d} + p \cdot \Psi_{1d} - \omega_{0эл} \cdot \Psi_{1q} \\ U_{1q} = R_1 \cdot I_{1q} + p \cdot \Psi_{1q} + \omega_{0эл} \cdot \Psi_{1d} \end{cases} \quad (35)$$

Другие обмотки находятся в своих естественных системах отсчёта (координаты ротора). Наличие демпферной обмотки существенно усложняет математическое описание двигателя, так как к уже рассмотренной магнитной связи между статорной обмоткой и обмоткой возбуждения добавляются магнитные связи этих обмоток с демпферной обмоткой. Аналогично тому, как это было сделано с обмоткой статора при описании синхронного двигателя во вращающейся системе координат, демпферную обмотку можно тоже представить в виде двух обмоток, оси которых направлены по осям d и q.

При этом должны быть учтены взаимные магнитные связи между статорной обмоткой по оси d, демпферной обмоткой по оси q и обмоткой возбуждения, а также между статорной и демпферной обмотками по оси q. Наличие демпферной обмотки не влияет на уравнения равновесия напряжений, которые могут быть без изменения использованы при описании синхронного двигателя с демпферной обмоткой. К ним должны быть добавлены уравнения равновесия напряжений для демпферной обмотки.

$$\begin{cases} U_B = R_B \cdot I_B + p \cdot \Psi_B \\ R_D \cdot I_D + p \cdot \Psi_D = U_D = 0 \\ R_Q \cdot I_Q + p \cdot \Psi_Q = U_Q = 0 \end{cases} \quad (36)$$

Помимо прочего, необходимо добавить и выражения для потокосцепления всех пяти фигурирующих в модели обмоток. Отношение между токами двигателя и потоковыми связями можно определить, используя различные индуктивности двигателя:

$$\begin{cases} \Psi_{sd} = L_{md} \cdot (i_f + i_d + i_D) + i_d \cdot L_{s\sigma} \\ \Psi_{sq} = L_{mq} \cdot (i_q + i_Q) + i_q \cdot L_{s\sigma} \\ \Psi_f = L_{md} \cdot (i_d + i_D + i_f) + (i_f + i_D) \cdot L_{k\sigma} + i_f \cdot L_{f\sigma} \\ \Psi_D = L_{md} \cdot (i_d + i_D + i_f) + (i_f + i_D) \cdot L_{k\sigma} + i_D \cdot L_{D\sigma} \\ \Psi_Q = L_{mq} \cdot (i_q + i_Q) + i_Q \cdot L_{Q\sigma} \end{cases} \quad (37)$$

Учитывая мощность явнополюсных синхронных двигателей, механизм создания электромагнитного крутящего момента отличается от механизма создания крутящего момента двигателей с плавным воздушным зазором.

Мгновенный электромагнитный момент создается взаимодействием между потоковыми связями и токами, находящимися в системе координат d-q. Это относится ко всем двигателям с вращающимся полем.

Таким образом, мы можем записать выражение для вектора электромагнитного крутящего момента в неподвижной системе отсчета:

$$M = \frac{3}{2} Z_p \Psi_s^s x I_s^s \quad (38)$$

И в ориентированной по ротору модели модуль крутящего момента равен:

$$M = \frac{3}{2} Z_p (\Psi_{sd} I_{sq} - \Psi_{sq} I_{sd}) \quad (39)$$

Уравнение движения ротора:

$$M - M_c = J \frac{d\omega}{dt} \quad (40)$$

Изменение нагрузки при постоянном модуле вектора напряжения статора приводит к изменению между его проекциями на осях вращающейся системы координат dq, которые определяются системой уравнений:

$$\begin{cases} U_{1d} = U_{1\max} \sin \theta \\ U_{1q} = -U_{1\max} \cos \theta \end{cases} \quad (41)$$

где $U_{1\max}$ - амплитудное значение напряжения статора;

θ - угол нагрузки;

p_n - количество пар полюсов.

С учётом изложенного, математическая модель электромагнитных процессов в синхронном двигателе с демпферной обмоткой может быть представлена в виде системы уравнений в операторной форме для проекций обобщенных векторов на оси вращающейся системы координат [30-32]:

$$\left\{ \begin{array}{l} R_1 \cdot I_{1d} + p \cdot \Psi_{1d} - \omega_{0эл} \cdot \Psi_{1q} = U_{1d} \\ R_1 \cdot I_{1q} + p \cdot \Psi_{1q} + \omega_{0эл} \cdot \Psi_{1d} = U_{1q} \\ R_B \cdot I_B + p \cdot \Psi_B = U_B \\ R_{дd} \cdot I_{дd} + p \cdot \Psi_{дd} = 0 \\ R_{дq} \cdot I_{дq} + p \cdot \Psi_{дq} = 0 \\ L_{1d} \cdot I_{1d} + M_{дв} \cdot I_B + M_{дд} \cdot I_{дd} = \Psi_{1d} \\ L_{1q} \cdot I_{1q} + M_{qd} \cdot I_{дq} = \Psi_{1q} \\ L_B \cdot I_B + M_{вд} \cdot I_{1d} + M_{вд} \cdot I_{дd} = \Psi_B \\ L_{дd} \cdot I_{дd} + M_{дд} \cdot I_{1d} + M_{дв} \cdot I_B = \Psi_{дd} \\ L_{дq} \cdot I_{дq} + M_{dq} \cdot I_{1q} = \Psi_{дq} \\ U_{1d} = U_{1max} \cdot \sin \theta \\ U_{1q} = -U_{1max} \cdot \cos \theta \\ M = \frac{3}{2} p_{\pi} (\Psi_{1d} I_{1q} - \Psi_{1q} I_{1d}) \\ M - M_c = J \frac{d\omega}{dt} \end{array} \right. , \quad (42)$$

где $\omega_{0эл} = 2 \cdot \pi \cdot f$ - синхронная скорость поля ротора;

f - частота напряжения питания;

Ψ_{1d}, Ψ_{1q} - потокосцепления статорной обмотки по осям d и q ;

Ψ_B - потокосцепление обмотки возбуждения;

$\Psi_{дd}, \Psi_{дq}$ - потокосцепления демпферной обмотки по осям d и q ;

$M_{дв} = M_{вд}$ - коэффициент взаимной индукции между обмоткой возбуждения и обмоткой статора по оси b ;

$M_{дд} = M_{дд}$ - коэффициент взаимной индукции между обмоткой статора и демпферной обмоткой по оси d ;

$M_{qd} = M_{dq}$ - коэффициент взаимной индукции между обмоткой статора и демпферной обмоткой по оси q .

Эта система уравнений образует полную систему уравнений синхронной машины.

При этом коэффициенты взаимной индуктивности между обмотками статора и ротора по осям обозначим, как L_{12d} и L_{12q} , соответственно.

Далее под параметрами вторичной обмотки ротора будут подразумеваться параметры приведенной вторичной обмотки ротора.

Удобная для моделирования в среде MATLAB Simulink нормированная структурная схема электропривода с синхронным двигателем, имеющим демпферную обмотку, во вращающейся системе координат приведена на рисунке 12.

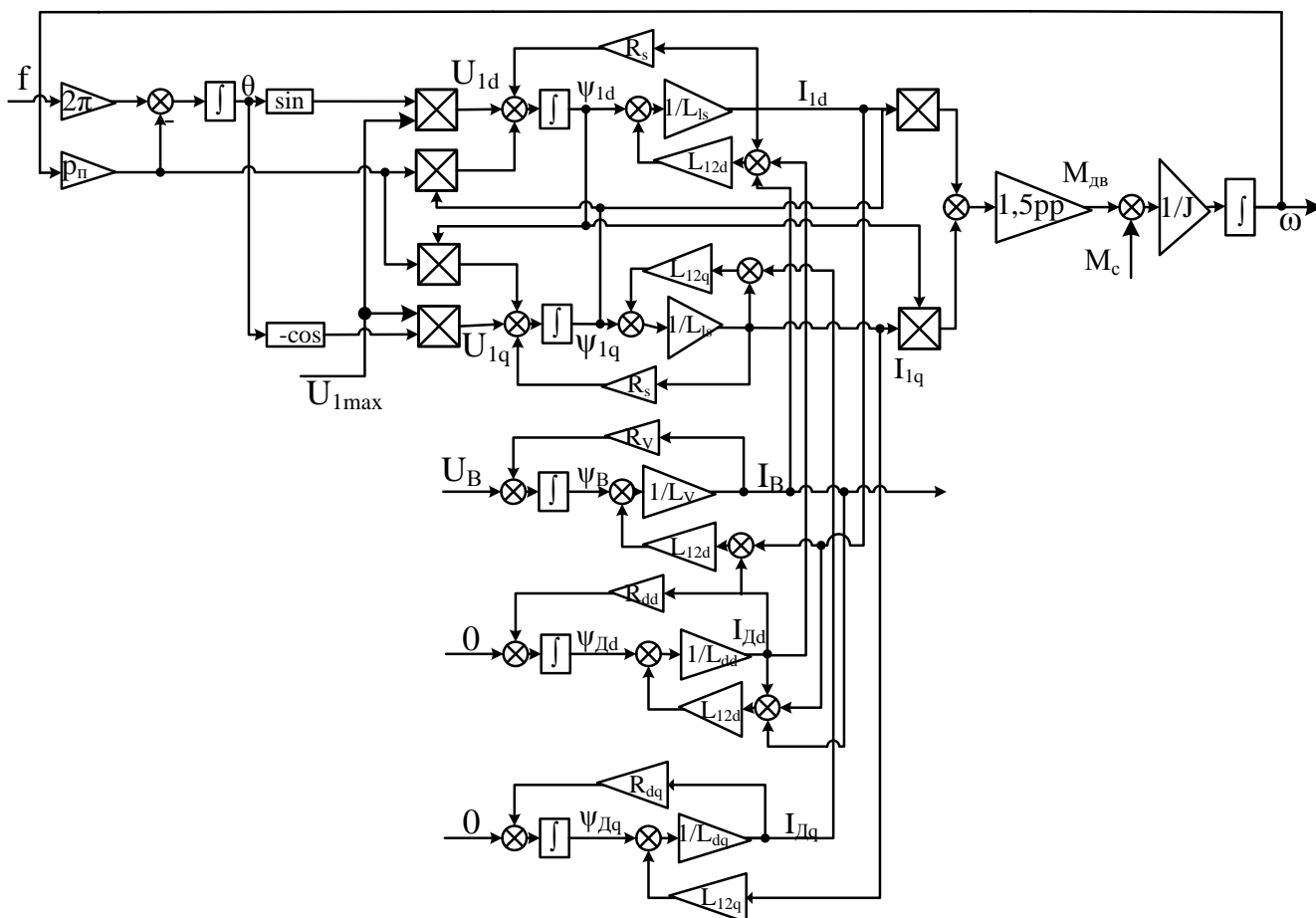


Рисунок 12 - Структурная схема синхронного электродвигателя с демпферной обмоткой во вращающейся системе координат

Параметры двигателей приведены в таблице в приложении А и Б. Некоторые параметры приведены в относительных единицах. Для расчёта параметров в абсолютных можно воспользоваться классическими методами расчёта по паспортным данным для СД, приведённым, например, в [33].

2.3 Математическое описание основных компонентов механизма моталки

В процессе прокатки полоса разматывается с одной моталки и наматывается на другую, при этом диаметры рулонов и их моменты инерции непрерывно изменяются. Математическое описание механических процессов при намотке рулона на моталку изложено в [6,34].

Чтобы поддерживать постоянной линейную скорость прокатки, необходимо скорость двигателя моталки уменьшать или увеличивать в зависимости от режима работы стана. Изменение диаметров рулонов в течение всего цикла прокатки должно учитываться при поддержании постоянства натяжения полосы прокатываемого металла. При функционировании реверсивных прокатных станов требуется вычисление текущего значения момента инерции рулона, радиуса рулона и, при необходимости, длины полосы прокатываемого металла, для системы точного останова моталки, и массы рулона.

В математической модели вычисление начального значения длины L полосы, предназначенной для подсистемы точного останова, осуществляется из зависимости:

$$L=2\cdot\pi\cdot(R_p\cdot N-h\cdot N+h), \quad (43)$$

где R_p - радиус смотанного рулона,
 N - количество витков в рулоне,
 h - толщина прокатываемой полосы.

Вычисление текущего значения массы рулона выполняется из соотношения:

$$m=\rho\cdot\pi\cdot(R_p^2-R_б^2)\cdot b, \quad (44)$$

где ρ - плотность рулона металла, учитывающая коэффициент заполнения,
 $R_б$ - радиуса барабана,
 b - ширина прокатываемой полосы.

Радиус рулона в процессе намотки:

$$R_M=R_б+\frac{\varphi_M\cdot h}{2\pi} = R_б+\frac{(\int_0^t \omega_M\cdot dt)\cdot h}{2\pi}, \quad (45)$$

где h - толщина проката,
 $R_б$ - радиус барабана моталки,
 φ_M - текущий угол поворота рулона.

Структурная схема вычисления радиуса рулона при намотке показана на рисунке 13.

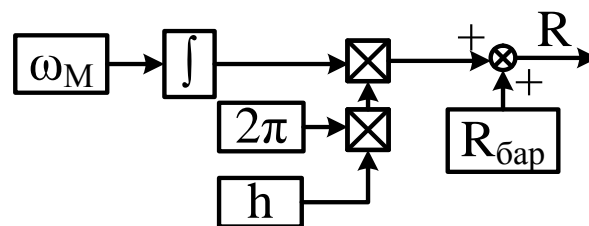


Рисунок 13 - Вычисление радиуса рулона

Момент инерции металла в рулоне на моталке определяется из зависимости:

$$J=0,5\cdot m\cdot(R_p^2-R_б^2) \quad (46)$$

Суммарный момент инерции электропривода моталки определяется суммой $J_M=J_{рул}+J_{мех}$, где $J_{рул}$ - момент инерции рулона наматываемого металла, а $J_{мех}$ -

момент инерции механизма моталки приведенный к рулону. Подставляя последнюю формулу в предпоследнюю, получим:

$$J_M = J_{\text{мех}} + J_{\text{рул}} = J_{\text{мех}} + \frac{\pi \cdot (R_p^4 - R_0^4)}{2} \cdot b \cdot \rho_{\text{рул}} \quad (47)$$

Структурная схема вычисления момента инерции рулона при намотке показана на рисунке 14.

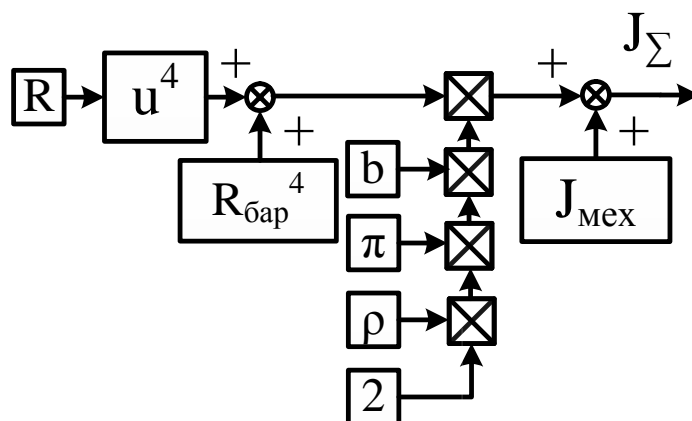


Рисунок 14 - Вычисление момента инерции рулона

С учётом переменного момента инерции электропривода моталки:

$$M_M - M_c = J_M \cdot \frac{d\omega_M}{dt} + \frac{\omega_M}{2} \cdot \frac{dJ_\Sigma}{dt}, \quad (48)$$

где M_M - момент, развиваемый двигателем моталки,
 M_c - момент сопротивления электропривода моталки,
 ω_M - угловая скорость моталки,
 J_M - момент инерции моталки.

Момент сопротивления электропривода моталки, как уже упоминалось ранее, состоит из трёх составляющих:

$$M_3 = M_{\text{нат}} + M_{\text{тр}} + M_{\text{дин}}, \quad (49)$$

где $M_{\text{тр}}$ - момент, необходимы для преодоления сил трения, Н·м;
 $M_{\text{дин}}$ - сигнал компенсации момента в переходных режимах, Н·м;
 $M_{\text{нат}}$ - момент, необходимый для создания заданного натяжения, Н·м.

Используя вышеприведенные соотношения в структурной форме, можно построить математическую модель основных механических компонентов для использования при исследовании динамических процессов системы «клеть-полоса-моталка» при изучении системы управления электроприводом моталки [35].

2.4 Модель клетки стана холодной прокатки

Модель клетки стана ХП, согласно [36-40], представлена в виде системы уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 M_d - M_p + F_2 R - F_1 R = J_{\Sigma} \cdot \frac{d\omega_M}{dt} \\
 M_p = 2P_c \psi b L_d \\
 P_c = 1,15 \cdot \sigma_T \cdot \frac{2h_2}{(h_1 - h_2)(\delta - 1)} \left[\left(\frac{h_{\gamma}}{h_2} \right)^{\delta} - 1 \right] - \frac{1}{2} \left(\frac{F_1}{bh_1} + \frac{F_2}{bh_2} \right) \\
 \frac{h_{\gamma}}{h_2} = \frac{1 + \sqrt{1 + \frac{(\delta^2 - 1)}{\left(\frac{h_1}{h_2} \right)^{\delta}}}}{\delta + 1} \\
 \delta = \frac{f_y}{\tan\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \\
 L_d = \sqrt{R_v(h_1 - h_2) + (cmRP_c)^2} + cmRP_c \\
 \alpha = \frac{L_d}{R_c} \\
 R = R_v - \Delta R \\
 \Delta R = 2R_v \frac{m^2}{4} P_c \\
 h_2 = h_2' - \Delta R \\
 V_{2k} = \omega R \frac{h_{\gamma}}{h_2} \\
 V_{1k} = V_{2k} \frac{h_2}{h_1} \\
 m = \frac{8(1 - \mu^2)}{\pi E}
 \end{array} \right. , \quad (50)$$

где M_d - крутящий момент приводного двигателя,
 J - суммарный приведённый к валу двигателя момент инерции;
 R_v - радиус вала;
 h_{γ} - толщина металла в нейтральном сечении;
 f_y - коэффициент трения;
 L_d - длина зоны деформации;
 m - промежуточный коэффициент;
 R - радиус вала с учётом сплющивания.

Для моделирования технологического процесса прокатки выбраны следующие коэффициенты: $m = 0,3$; $E = 2,06 \times 10^9$ МПа; $Y = 0,2$; $c = 1,375$. Входными координатами являются: силы переднего и заднего натяжения металла T_1 и T_2 , раствор рабочих валков h_2^* , крутящий момент приводного двигателя M_d , толщина прокатываемого металла h_1 . Выходными координатами служат: линейные скорости движения металла при входе в зону деформации V_{1k} и при выходе из неё V_{2k} , угловая скорость вращения валков w , толщина металла при выходе из зоны деформации h_2 . В результате, получена математическая модель клетки, структурная схема которой представлена на рисунке 15.

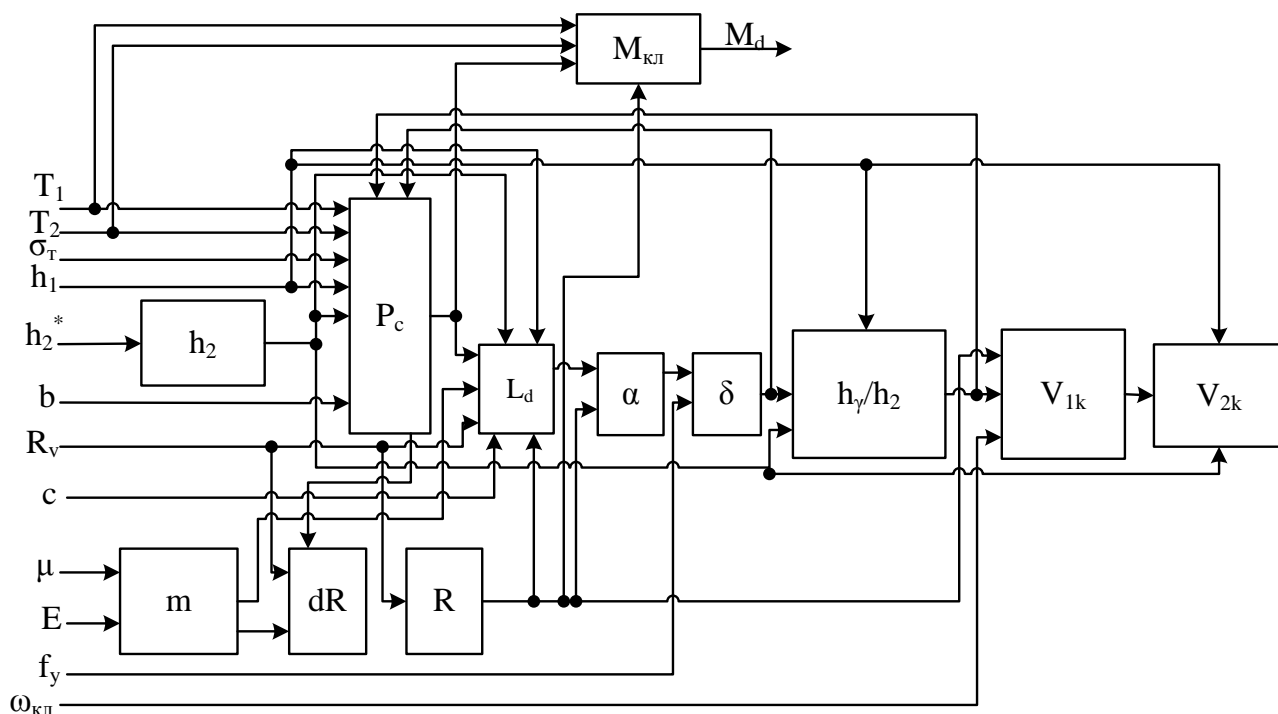


Рисунок 15 - Структурная схема математической модель клетки стана холодной прокатки

2.5 Модель прокатываемой полосы с учётом изменения жёсткости при изменении радиуса рулона

Особенностью хвостовой части стана холодной прокатки является взаимосвязь электроприводов моталки и клетки через обрабатываемую полосу. Обрабатываемая полоса выступает в качестве объекта регулирования. Поэтому, анализ формирования натяжения при смотке полосы в рулон целесообразно проводить при рассмотрении комплексной математической модели, включающей в себя как модели двигателей указанных электроприводов, так и математическое описание всех факторов, влияющих на их совместную работу, а именно:

- неравенство линейной скорости полосы на выходе из валков прокатной клетки их окружной скорости, связанное с наличием опережения металла в валках клетки;

- упругое удлинение полосы на участке между клетью и барабаном моталки;
- неравенство скорости полосы при подходе к рулону и линейной скорости намотки.

Для рассмотрения математической модели полосы требуется расчётная схема деформации полосы на поверхности рулона, как на рисунке 16.

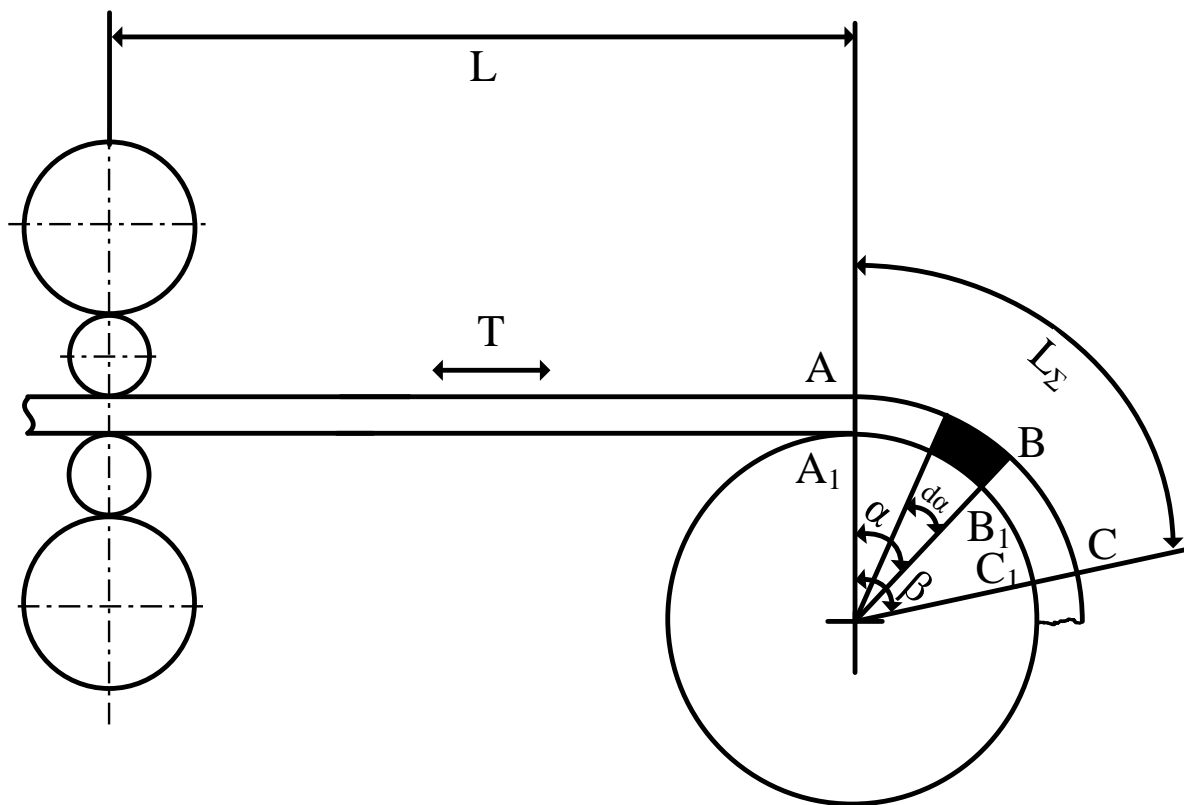


Рисунок 16 - Расчётная схема деформации полосы на поверхности рулона

Влияние первого и второго факторов учитывается выражениями, которые можно представить в операторном виде, как:

$$v_{\text{ПК}} = \frac{\omega_k \cdot R_k}{i_k} \cdot (1 + s_0 + \alpha \cdot T(p)) \quad (51)$$

$$p \cdot T(p) = \frac{E \cdot b \cdot h}{L} \cdot (V_{\text{ПМ}} - V_{\text{ПК}}) \quad (52)$$

Здесь $V_{\text{ПМ}}$ - скорость полосы в точке соприкосновения с рулоном, значение которой в общем случае отлично от линейной скорости моталки $V_{\text{М}}$. Это отличие имеет место в динамических режимах и обусловлено изменением длины упруго-удлинённой полосы на рулоне при изменении натяжения.

Следовательно, в динамическом режиме справедливо равенство:

$$V_{\text{ПМ}} + \frac{dL_{\Sigma}}{dt} = V_{\text{М}} \quad (53)$$

Учитывая, что $L_{\Sigma}=L_0+\Delta L$, зависимость (53) можно переписать как:

$$V_{\text{пм}} + \frac{d\Delta L}{dt} = V_{\text{м}}, \quad (54)$$

где L_{Σ} - суммарная длина деформированного участка полосы на поверхности рулона;

L_0 - длина деформированного участка полосы при $V_{\text{пм}}=V_{\text{м}}$ и $T=\text{const}$;

ΔL - дополнительное удлинение полосы в динамических режимах.

Согласно формуле Эйлера, изменение натяжения материала вдоль его длины в рулоне от T_0 до T происходит по экспоненциальному закону. Натяжение полосы в сечении В-В₁ (рисунок):

$$T = T_0 \cdot e^{-\mu \cdot \alpha}, \quad (55)$$

где μ - коэффициент трения между витками

Изменение величины упругого удлинения каждого элемента полосы длиной dL , соответствующего углу поворота рулона $d\alpha$, при изменении натяжения от T_0 до T осуществляется только в пределах угла β на длине $L_{\Sigma} \cdot R_{\text{рул}} \cdot \beta$ и определяется по закону Гука за время $t \rightarrow 0$, как:

$$\Delta L = \frac{R_{\text{рул}} \cdot d\alpha}{E \cdot b \cdot h} \cdot (T \cdot e^{-\mu \cdot \alpha} - T_0), \quad (56)$$

где $dL \approx R_{\text{рул}} \cdot d\alpha$

Суммарное изменение упругого удлинения полосы на поверхности рулона за время $\Delta t \rightarrow 0$:

$$\Delta L = \int_0^{\beta} \frac{R_{\text{рул}}}{E \cdot b \cdot h} \cdot (T \cdot e^{-\mu \cdot \alpha} - T_0) \cdot d\alpha \quad (57)$$

Интегрируя, получаем:

$$\Delta L = \frac{R_{\text{рул}} \cdot T}{E \cdot b \cdot h \cdot \mu} \cdot (1 - e^{-\mu \cdot \beta} \cdot (1 + \mu \cdot \beta)) \quad (58)$$

Для элемента сечения С-С₁ $T \rightarrow 0$, поэтому $e^{-\mu \cdot \beta} \rightarrow 0$. С учётом этого и последней формулы получим:

$$\Delta L = \frac{R_{\text{рул}} \cdot T}{E \cdot Q_i \cdot \mu} \quad (59)$$

При $\Delta t \rightarrow 0$:

$$\frac{d\Delta L}{dt} = \frac{R_{рул}}{E \cdot b \cdot h} \cdot \frac{dT}{dt} \quad (60)$$

Или в операторном виде:

$$\Delta L(p) \cdot p = \frac{R_{рул}}{E \cdot b \cdot h \cdot \mu} \cdot T(p) \cdot p \quad (61)$$

При совместном решении:

$$V_{пм} = V_m - \frac{R_{рул}}{E \cdot b \cdot h \cdot \mu} \cdot T(p) \cdot p \quad (62)$$

Таким образом, выражение (последнее) учитывает влияние указанного выше третьего фактора, возникающего при совместной работе электропривода клетки и моталки.

На рисунке 17 представлена структурная схема динамической математической модели хвостовой части прокатного стана, составленная в соответствии с вышеописанными математическими выкладками.

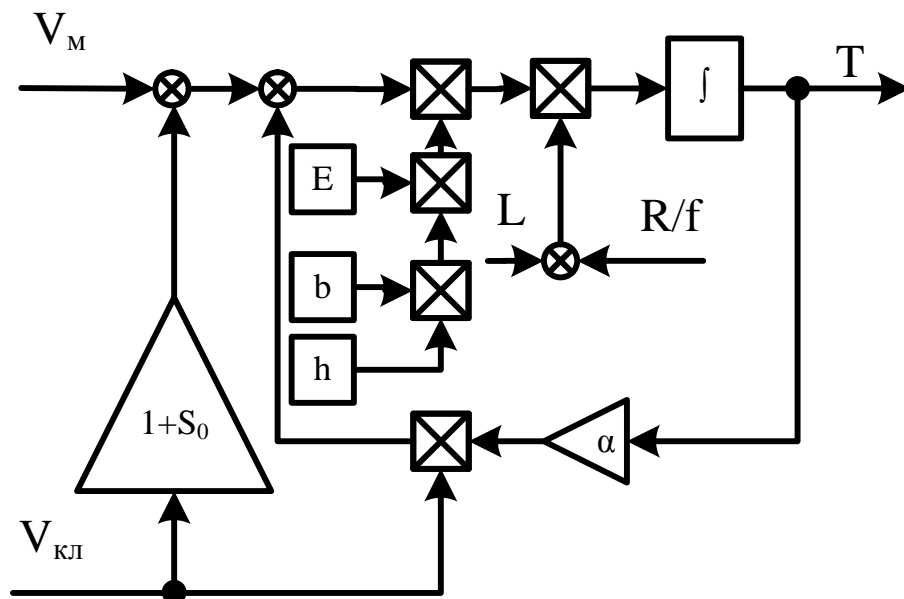


Рисунок 17 - Хвостовая часть стана холодной прокатки

Несмотря на достаточно интересный вывод математической модели полюсы, описанный выше и рассмотренный изначально в [8], данную модель необходимо дополнить. Для этого следует учесть, что при намотке рулона упругое растяжение полосы происходит не только на участке полосы, между натяжной станцией и моталкой, но и на части полосы уже смотанной в рулон [41].

На рисунке 18 приведена структурная схема растяжения полосовой стали при намотке её на моталку.

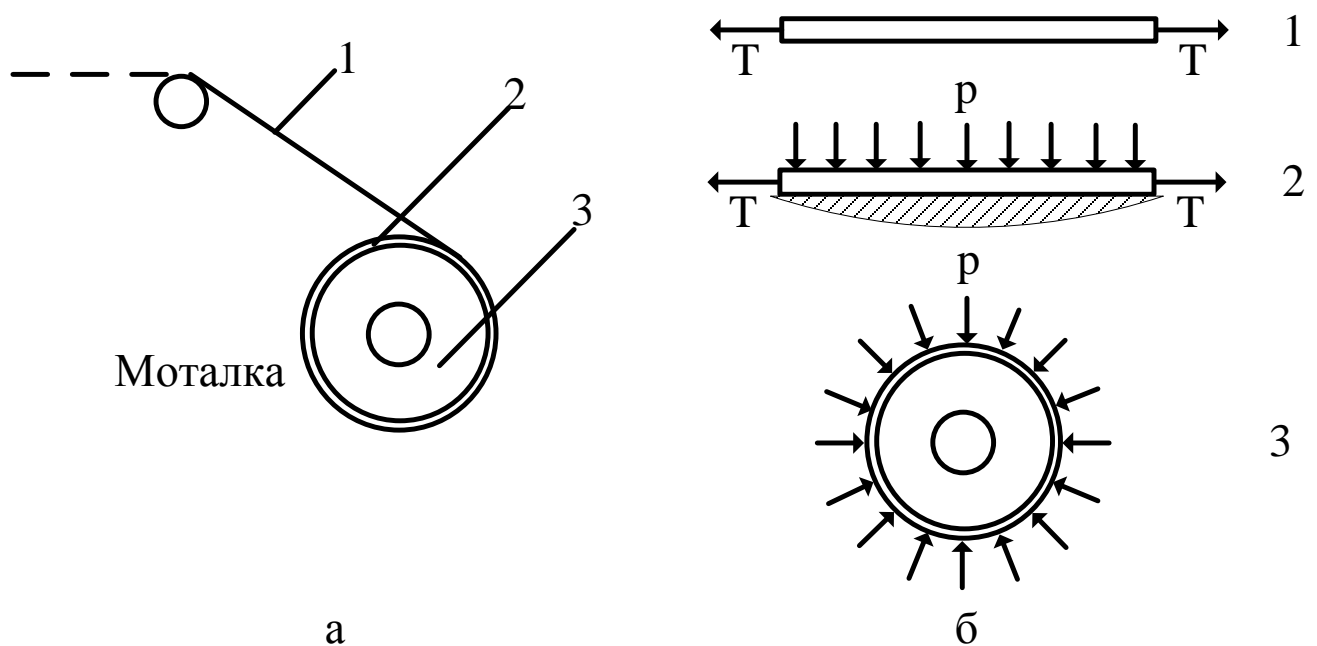


Рисунок 18 - Структурная схема напряженных состояний полосы при намотке в рулон

На рисунке 18, а приведены три участка, где полоса подвергается различным типам нагрузок, схемы которых приведены на рисунке 18, б. На участке между натяжной станцией и моталкой полоса подвержена одноосному растяжению по оси полосы силой T (схема нагрузки 1). На верхнем витке рулона полоса подвержена совместно с одноосным растяжением по оси полосы сжатию под действием равномерно приложенного давления p , возникающего при огибании полосы окружности рулона (схема нагрузки 2). Это давление выражается следующей формулой [41]:

$$p = \frac{T}{b \cdot R}, \quad (63)$$

где T - натяжение полосы, кН;

R - текущий радиус рулона, м.

На полосу, смотанную в рулон, действует внешнее давление от последнего слоя (схема нагрузки 3). Напряжения и деформации в этом случае рассматриваются как для цилиндра, находящегося под действием равномерно распределенного по всей ширине полосы наружного давления.

Полоса при нагрузке по схеме 1 подчиняется закону Гука:

$$T = c \cdot \Delta L, \quad (64)$$

где T - действующая сила, кН;

c - жесткость полосы при растяжении или сжатии;

ΔL - абсолютное удлинение полосы.

При намотке или размотке рулона на моталку с изменением радиуса изменяется положение полосы, при этом участок нагрузки по схеме 1 меняет длину.

На рисунке 19 представлено положение полосы для прямого способа намотки материала.

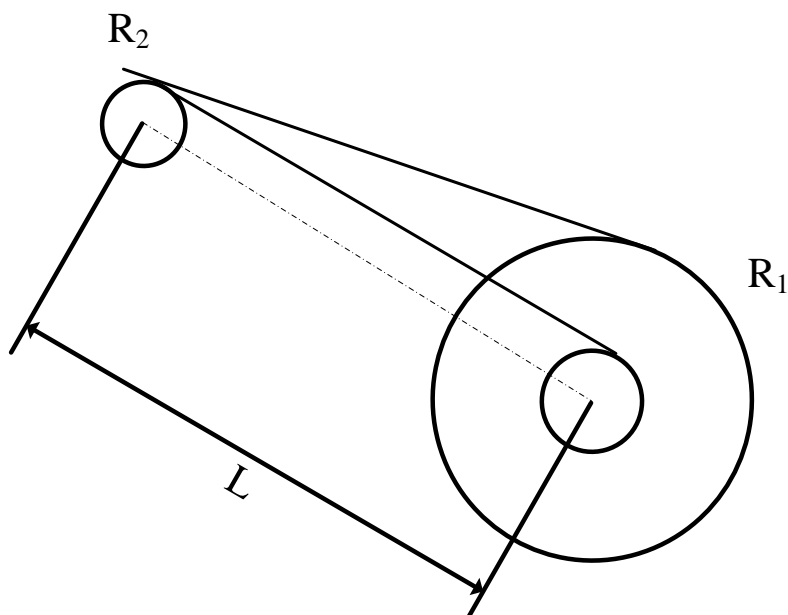


Рисунок 19 - Структурная схема прямого способа намотки рулона

Для структурной схемы, приведённой на рисунке 19, получена зависимость, характеризующая длину полосы L_{Π} :

$$L_{\Pi} = \sqrt{L^2 - (R_1 - R_2)^2} - R_2 \cdot \left(\arcsin\left(\frac{R_1 - R_2}{L}\right) - \arcsin\left(\frac{R_6 - R_2}{L}\right) \right), \quad (65)$$

где L - длина между осями барабана моталки и отгибającego ролика, м;

R_1 - радиус рулона, м;

R_2 - радиус отгибającego ролика, м;

R_6 - радиус барабана моталки, м.

Изменение длины L_{Π} связано с изменениями положения полосы и углом охвата отгибającego ролика. Знак «-» в формуле соответствует прямому способу намотки.

Значение жесткости c_1 для участка растяжения по схеме нагрузки 1 (см. рисунок 18, б) определяется по формуле:

$$c_1 = \frac{E \cdot b \cdot h}{L_{\Pi}}, \quad (66)$$

где E - модуль упругости первого рода;

b - ширина полосы;

h - толщина полосы;

$L_{п}$ - длина полосы, рассчитанная с учетом формулы (65).

При нагрузке по схеме 2 (см. рисунок 18, б) полоса находится в плоском напряженном состоянии и подчиняется обобщенному закону Гука. Так как по длине полоса испытывает растягивающее усилие T , а по толщине подвергается сжатию, то формула относительного удлинения ε примет вид:

$$\varepsilon = \frac{1}{E} \cdot (\sigma_1 + \mu \cdot \sigma_2), \quad (67)$$

где E - модуль упругости первого рода;

μ - коэффициент Пуассона (сталь углеродистая $\mu \approx 0,27$);

σ_1 - напряжение, возникающее в полосе вдоль длины;

σ_2 - напряжение, возникающие в полосе вдоль толщины.

Значение эквивалентной жесткости $c_{\text{эKB2}}$ для участка растяжения по схеме нагрузки 2 (см. рисунок 29, б) определяется по формуле:

$$c_2 = \frac{E \cdot b \cdot h}{2 \cdot \pi \cdot (R + \mu \cdot h)} \quad (68)$$

При нагрузке по схеме 3 (см. рисунок 18, б) рулон представляется анизотропным цилиндром, который нагружен внешним давлением. Радиальное перемещение в цилиндре u определяется зависимостью:

$$u_{k=R} = - \frac{p \cdot R \cdot \left((k - \mu) \cdot R^{2k} + (k + \mu) \cdot R_6^{2k} \right)}{E_1 \cdot (R^{2k} - R_6^{2k})}, \quad (69)$$

где p - внешнее давление;

R - радиус рулона;

E_1 - модуль упругости барабана моталки;

R_6 - радиус барабана моталки;

μ - коэффициент Пуассона для материала полосы; $k = \sqrt{E_2/E_1}$

E_2 - модуль упругости рулона в радиальном направлении.

Знак «-» в формуле (69) перед дробью характеризует уменьшение радиуса рулона под действием внешнего давления.

При изменении радиуса рулона под действием внешнего давления появляется абсолютное линейное удлинение полосы ΔL :

$$\Delta L = 2 \cdot p \cdot u \quad (70)$$

Значение эквивалентной жесткости $c_{\text{эKB3}}$ для участка растяжения по схеме нагрузки 3 (см. рисунок 18, б) определяется по формуле:

$$c_3 = \frac{E \cdot b \cdot (R^{2k} - R_6^{2k})}{2 \cdot \pi \cdot ((k - \mu) \cdot R^{2k} + (k + \mu) \cdot R_6^{2k})}, \quad (71)$$

где E_1 - модуль упругости барабана моталки;

μ - коэффициент Пуассона для материала полосы.

Представление рулона в качестве толстостенного цилиндра и использование формулы (69) для расчёта жёсткости возможно при выполнении условия $R \geq 1,105 \cdot R_6$, что в принципе выполняется.

При намотке тонкой стальной полосы на барабан моталки приведённое условие выполняется после достаточно небольшого количества витков, при этом значение модуля упругости рулона E_2 перестает изменяться, и коэффициент k , характеризующий нелинейные свойства рулона, согласно [41] можно принять $k=0,5$, тогда формула будет иметь вид:

$$c_3 = \frac{E \cdot b \cdot (R - R_6)}{2 \cdot \pi \cdot ((0,5 - \mu) \cdot R + (0,5 + \mu) \cdot R_6)} \quad (72)$$

Формула для расчета совокупной жесткости полосы и рулона (смрис.1) примет вид:

$$c_{\Pi} = \frac{c_1 \cdot c_2 \cdot c_3}{c_1 \cdot c_2 + c_2 \cdot c_3 + c_1 \cdot c_3} \quad (73)$$

Подставив в формулу (73) выражения для c_1 - формулу (66), для $c_{\text{ЭКВ2}}$ - формулу (68), для $c_{\text{ЭКВ3}}$ - формулу (72), получим математическую зависимость совокупной жесткости при изменении радиуса рулона:

$$c_{\Pi} = \frac{E \cdot b \cdot h}{L_{\Pi} + 2 \cdot \pi \cdot (R + (h - 1) \cdot \mu + \frac{R - R_6}{2 \cdot (R + R_6)})}, \quad (74)$$

где L_{Π} - длина полосы, рассчитываемая по формуле (65).

Полученная зависимость характеризует изменение совокупной жесткости полосы и рулона при изменении радиуса и может применяться для моделирования металлической полосы с дополненными динамическими свойствами.

Обобщённая математическая модель прокатываемой полосы с учётом изменения жёсткости при увеличении радиуса показана на рисунке 20 [8,41]. Безусловно, вышеописанные математические выкладки позволяют с одной стороны повысить имитационную точность модели наматываемой полосы, приблизив протекающие в ней процессы к реальным, а с другой стороны представить наматываемую полосу в качестве объекта управления, характеризующегося преимущественно нелинейными свойствами, в котором зависимость постоянной времени механических напряжений от различных параметров нелинейна.

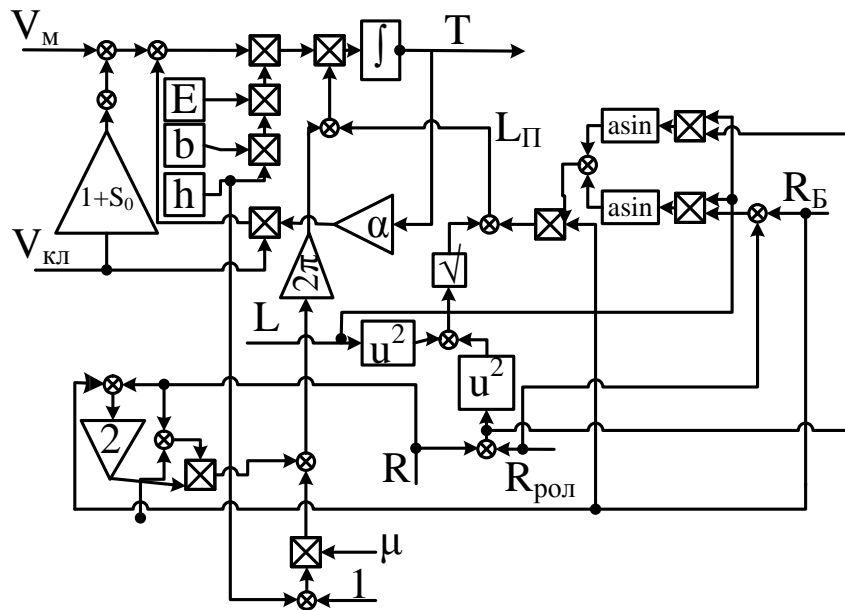


Рисунок 20 - Структурная схема динамической математической модели прокатываемой полосы с учётом изменения жёсткости полосы при изменении радиуса рулона

2.6 Модели силового электрооборудования

Непосредственный преобразователь частоты (НПЧ) в электроприводе переменного тока является силовым регулятором, вход которого подключен к питающей сети с нерегулируемыми значениями напряжения U_1 и частоты f_1 , а на выходе обеспечиваются регулируемые значения напряжения U_2 и частоты f_2 в зависимости от задания и управляющих сигналов. В НПЧ напряжение сети непосредственно без промежуточной ступени постоянного тока преобразуется в напряжение пониженной частоты. НПЧ состоит из нескольких управляемых выпрямителей, подключенных к сети переменного тока, который обеспечивает естественную коммутацию тиристоров.

Основные достоинства НПЧ с естественной коммутацией:

- полная реверсивность, высокий КПД за счет однократного преобразования энергии;
- при низких частотах форма выходного синусоидального напряжения улучшается, так как низкочастотная кривая состоит из большого количества отрезков синусоид сетевого напряжения;
- высокая надежность, перегрузочная способность и простота силовой схемы, что определяется естественной коммутацией вентиляей;
- возможность независимого плавного регулирования тока и напряжения;
- лучшие массогабаритные показатели за счет отсутствия устройств принудительной коммутации и фильтров;
- возможность свободного обмена энергией между питающей сетью и двигателем, что позволяет реализовать тормозные режимы электропривода с рекуперацией энергии в сеть;

- возможность получения сколь угодно низких частот выходного напряжения и обеспечения равномерного вращения двигателя на малых оборотах;
- устойчивый режим работы на нагрузку с любым $\cos\varphi$;
- практически неограниченная мощность НПЧ (за счет параллельного соединения вентиляльных групп).

Среди недостатков НПЧ следует отметить следующие:

- диапазон выходных частот ограничен на уровне 25 Гц;
- наличие субгармоник и постоянных составляющих выходного напряжения и тока при неблагоприятных соотношениях частот на входе и на выходе преобразователя;

- низкий коэффициент мощности, несинусоидальность и модуляция входных токов;

- многоэлементность силовых цепей и цепей управления, что является оправданным только в преобразователях большой мощности.

У НПЧ отсутствует цепь постоянного тока. Вследствие этого формирование кривой выходного напряжения преобразователя производится из отрезков кривых напряжения питающей сети благодаря циклическому подключению нагрузки на определенные интервалы времени к различным фазам питающей сети.

НПЧ в минимальной конфигурации содержит m_2 (по числу фаз двигателя) отдельных реверсивных преобразователей постоянного тока, управление которыми осуществляется переменным модулирующим напряжением. Форма, частота и амплитуда модулирующего напряжения определяют форму гладкой составляющей (основной гармонической), частоту f_2 и амплитуду напряжения U_2 на выходе НПЧ. Регулирование выходного напряжения характеризуют коэффициентом модуляции μ , который изменяется в пределах от 0 до 1 и является, по существу, относительной амплитудой модулирующего напряжения. Напряжения управления отдельными фазами НПЧ имеют одинаковые амплитуду и частоту, но сдвинуты относительно друг друга на угол $2\pi/m_2$. Управление группами тиристоров, как и в реверсивных преобразователях постоянного тока, может быть совместным или отдельным. В последнем случае для предотвращения внутреннего короткого замыкания управляющие импульсы в любой момент времени должны подаваться только на тиристоры одной из вентиляльных групп в соответствии с направлением тока в нагрузке. В этом случае нет необходимости в установке во внутреннем контуре схемы реактора. При согласованном управлении необходимы дополнительные реакторы, ограничивающие уравнивающие токи между вентиляльными группами. Преобразователи с совместным управлением вентиляльных групп имеют повышенную типовую мощность элементов силовой схемы, особенно при малом отношении входной и выходной частоты преобразователя. В связи с этим для управления вентилями НПЧ принимается раздельное управление.

В тиристорных НПЧ, как правило, используется естественная коммутация тока в вентилях, осуществляемая за счет напряжения сети. При этом выходное напряжение U_2 имеет периодический характер при частоте f_2 только для дискретных ее значений:

$$f_2 = \frac{m_1 \cdot f_1}{m_1 + k}, \quad (75)$$

где m_1 - число фаз питания НПЧ;
 f_1 - частота питающего напряжения;
 k - целые числа ($1 < k < \infty$).

При промежуточных значениях выходной частоты f_2 , при которых k не является целым числом, в напряжении U_2 появляются низкочастотные субгармоники (то есть гармоники с частотами ниже f_2), влияние которых тем больше, чем ближе значения частот f_2 и f_1 . Появление низкочастотных субгармоник в напряжении питания двигателя приводит к колебаниям электромагнитного момента. Поэтому выходные частоты НПЧ в диапазоне, соответствующем $k < 3$, обычно не являются рабочими. Так, для трехфазного мостового НПЧ максимальная выходная частота $f_{2max} < 25$ Гц. Кривая выходного напряжения содержит полный спектр нечетных высших гармоник, амплитуды которых убывают обратно пропорционально порядковому номеру гармоники. В НПЧ с трехфазным выходом при отсутствии в цепи нагрузки нулевого провода гармонический состав выходного напряжения улучшается, так как из кривой напряжения исключаются гармоники, кратные трем. На рисунке 21 показана математическая модель трёхфазного НПЧ программы MATLAB (приложение Simulink, пакет SimPowerSystems), в котором использованы мостовые реверсивные преобразователи постоянного тока, а фазы двигателя потенциально разделены, чтобы избежать межфазных коротких замыканий [42].

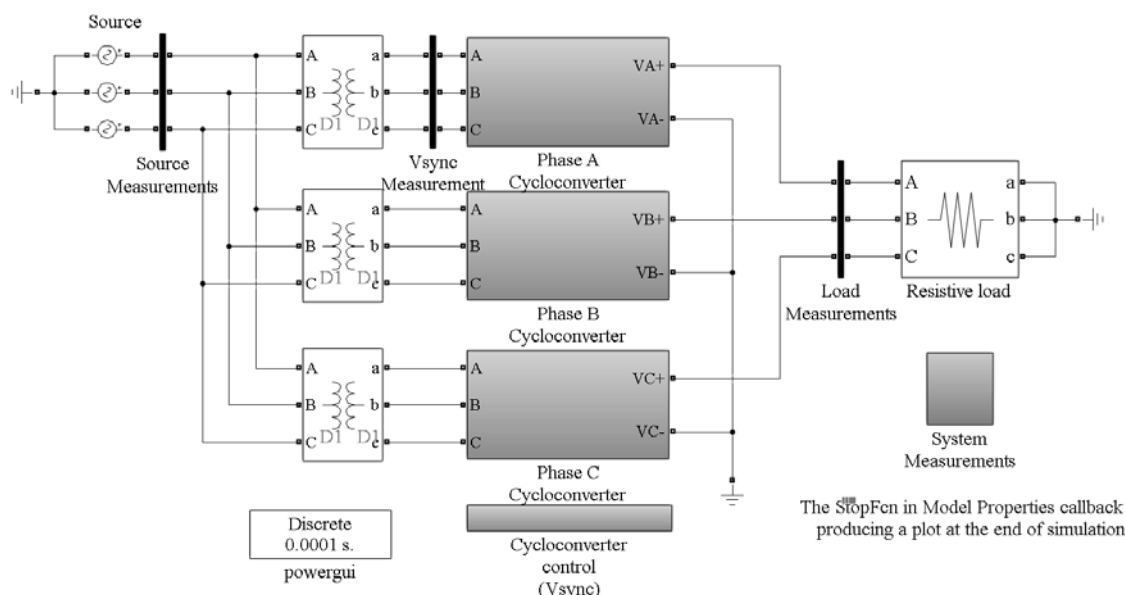


Рисунок 21 - Математическая модель непосредственного преобразователя частоты

Эта схема позволяет формировать шестипульсное напряжение на каждой фазе двигателя независимо от других фаз, что способствует заметному улучшению свойств преобразователя по управлению. Частота выходного напряжения может изменяться от нуля включительно. По мере увеличения выходной частоты

ухудшается гармонический состав выходного напряжения и происходит искажение формы тока, что вызывает пульсации момента регулируемого двигателя. Выходной ток НПЧ всегда отстает от напряжения сети, так как независимо от характера нагрузки тиристоры всегда отпираются с запаздыванием. Каждая выходная фаза преобразователя формируется двумя группами вентилей, включенных по встречно-параллельной схеме. Наличие двух вентильных комплектов позволяет получить на нагрузке напряжение изменяющейся полярности при токе, который может изменять свое направление.

Система содержит источник питания, имитирующий промышленную трёхфазную сеть переменного тока, три связывающих трансформатора, шесть трёхфазных выпрямительных комплектов (3 на отрицательный и 3 на положительный циклы). Для исключения циркуляционных токов соответствующий комплект блокируется. Имеется возможность управлять зоной нечувствительности.

Структурная схема одного выпрямительного комплекта показана на рисунке 22.

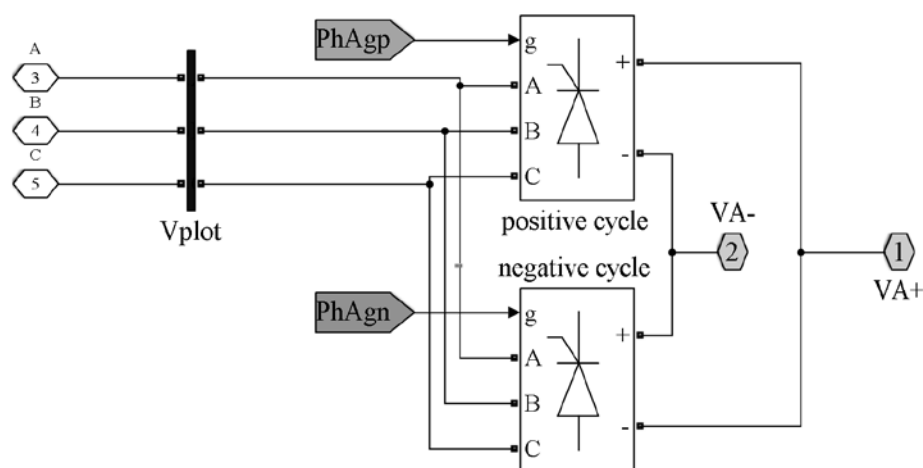


Рисунок 22 - Модель выпрямительного комплекта НПЧ

Модель СИФУ НПЧ показана на рисунке 23.

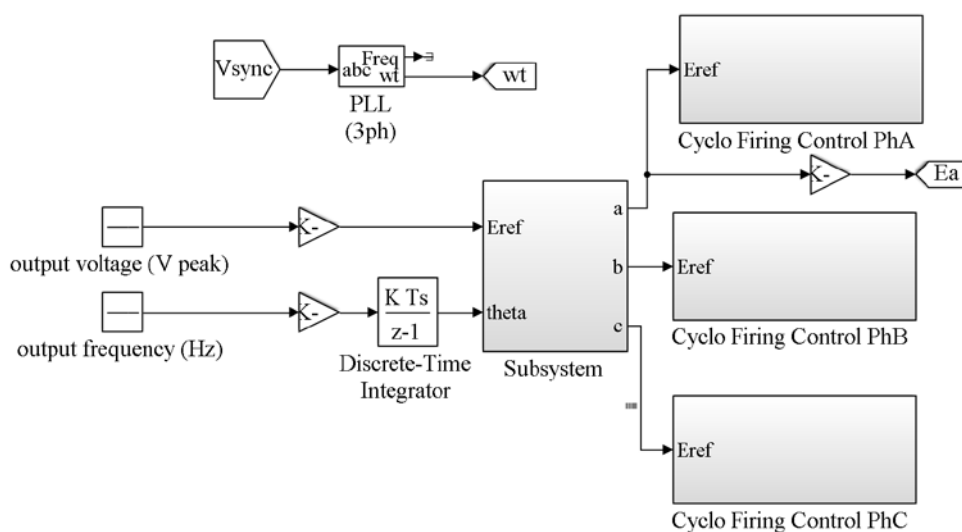


Рисунок 23 - Структурная схема СИФУ НПЧ

Система включает в себя синхронизатор напряжений, преобразователь координат и три подсистемы выработки управляющих импульсов для каждого из выпрямительных комплектов. Структурная схема одной подсистемы показана на рисунке 24.

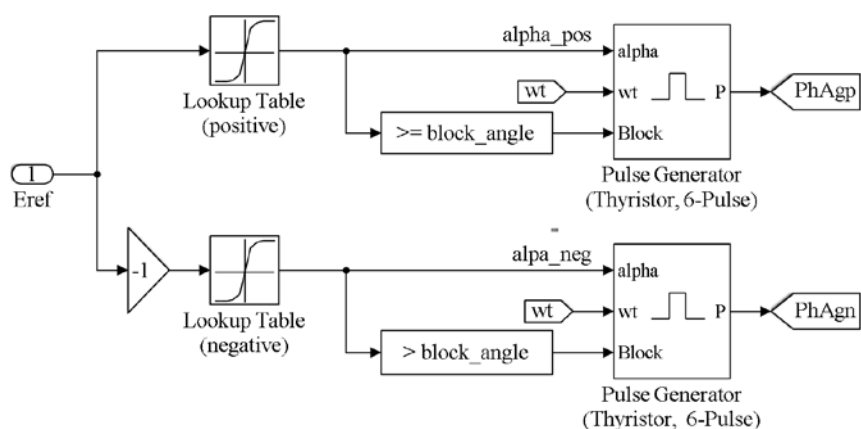


Рисунок 24 - СИФУ фазы А

Для возбуждения синхронных двигателей используются преимущественно статические возбудительные устройства (СВУ).

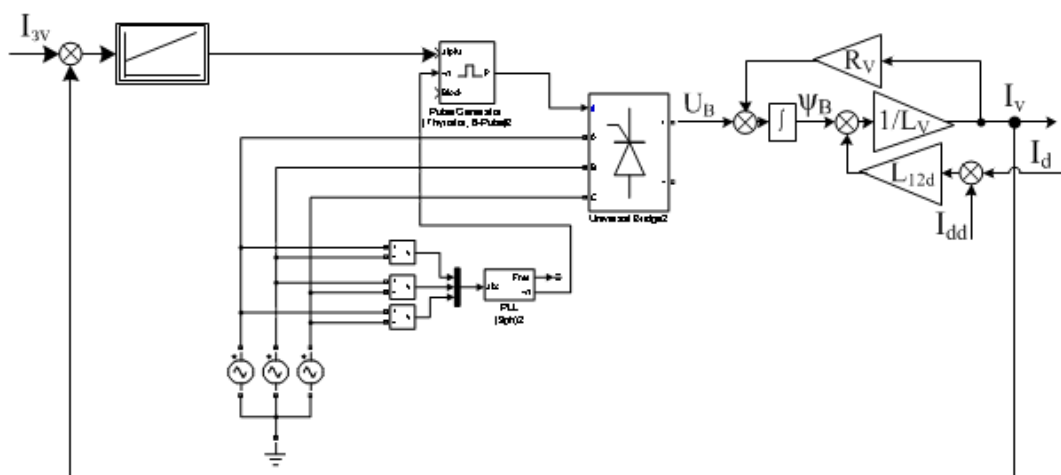


Рисунок 25 - Схема модели регулирования тока возбуждения синхронного двигателя

Схема на рисунке включает регулятор тока возбуждения, СИФУ ТВ, тиристорный преобразователь (возбудитель) и модели цепи ротора с параметрами обмотки (сопротивление, индуктивность и т.д.). Поскольку схема регулирования возбуждения не отличается какой бы то ни было сложностью, рассмотрение на более глубоком уровне не требуется. Создание модели возбуждения синхронного электродвигателя, совместно с НПЧ, позволяет завершить этап описания математических моделей силовых преобразователей и учесть их работу при дальнейшем моделировании. Отдельные исследования систем регулирования возбуждения представлены в [33, 43], а параметры преобразователей приведены в приложении В.

2.7 Упрощённый синтез системы подчинённого регулирования натяжения для исследования

2.7.1 Расчёт контура тока по оси q, d и контура регулирования тока возбуждения

Расчётная схема контура тока по оси q показана на рисунке 26.

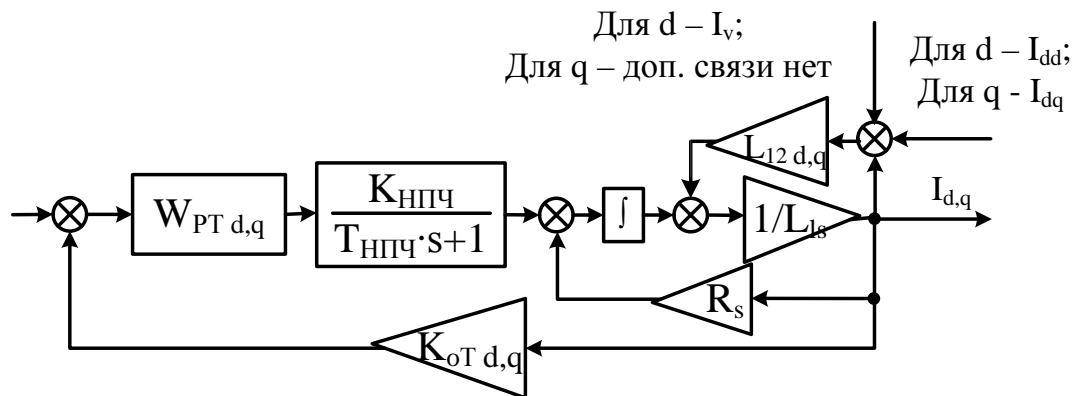


Рисунок 26 - Структурная схема контура тока по оси q

В контур регулирования тока статора по оси q и d входят статорная цепь, непосредственный преобразователь частоты и регулятор тока статора по оси q и d. Передаточная функция разомкнутого контура тока имеет вид:

$$W_{кт}^{раз} = W_{пт} \cdot \frac{K_{пч}}{(T_{\mu}s+1)} \cdot \frac{1/R_s}{T_s s+1} \quad (76)$$

Синтез регулятора тока производится при следующих допущениях:

- ориентация по вектору потокосцепления ротора Ψ_R выполнена идеально;
- влияние перекрестных связей устранено, отсутствует изначально или выражено неярко;
- динамика непосредственного преобразователя частоты (НПЧ) по каналу q приближенно описывается апериодическим звеном первого порядка с передаточной функцией [44]:

$$W_{нпч}(p) = \frac{K_{нпч}}{T_{нпч} \cdot s + 1} \quad (77)$$

где $T_{нпч} = 0,005$ с - некомпенсируемая малая постоянная времени преобразователя частоты.

Расчёт параметров регулятора тока производится по модульному оптимуму. При этом в соответствии с классическим подходом синтезу систем подчинённого регулирования данный регулятор обеспечит оптимальные по быстродействию

ствию и перерегулированию переходные процессы. Быстродействие настроенного на оптимум контура будет определяться малой некомпенсируемой постоянной времени непосредственного преобразователя частоты $T_{\text{НПЧ}}$.

Передаточная функция такого контура имеет вид:

$$W_k = \frac{1}{2T_{\mu}^2 s^2 + 2T_{\mu} s + 1} \quad (78)$$

или для разомкнутого контура:

$$W_k^{\text{раз}} = \frac{1}{2T_{\mu}^2 s^2 + 2T_{\mu} s} = \frac{1}{2T_{\mu} s(2T_{\mu} s + 1)} \quad (79)$$

Передаточную функцию регулятора тока можно получить, приравняв (76) и (79):

$$W_{\text{рtd}} = W_{\text{ртq}} = \frac{T_s \cdot s + 1}{2 \cdot T_{\text{НПЧ}} \cdot K_{\text{пч}} \cdot K_{\text{от}} \cdot \frac{1}{R_s} s} = K_{\text{рт}} + \frac{1}{T_{\text{ит}} s}. \quad (80)$$

Откуда:

$$K_{\text{рT}(d,q)} = \frac{L_{1s} + L_{12(d,q)}}{2 \cdot K_{\text{НПЧ}} \cdot K_{\text{от}(d,q)} \cdot T_{\text{НПЧ}}} \quad (81)$$

$$T_{\text{ит}(d,q)} = \frac{2 \cdot K_{\text{НПЧ}} \cdot K_{\text{от}(d,q)} \cdot T_{\text{НПЧ}}}{R_s}. \quad (82)$$

Таким образом, получен ПИ-регулятор тока по оси q . Передаточная функция замкнутого контура тока примет вид:

$$W_k^{\text{зам}} = \frac{1/K_{\text{от}(d,q)}}{2T_{\text{НПЧ}}^2 s^2 + 2T_{\text{НПЧ}} s + 1}. \quad (83)$$

Данная передаточная функция соответствует оптимальному переходному процессу.

Структура и параметры регулятора тока по оси d полностью соответствуют структуре и параметрам регулятора тока по оси q .

Для контуров тока синхронного электродвигателя клетки процесс определения передаточной функции регуляторов тока, как впрочем, и всех остальных регуляторов, осуществляется по стандартной аналогичной методике с той лишь разницей, что в качестве параметров в данных регуляторах фигурируют численные значения параметров электромехатронной системы клетки.

2.7.2 Расчёт контура регулирования скорости

Формирование задания по моментобразующей составляющей тока статора осуществляется в замкнутом контуре регулирования скорости электропривода. При синтезе регулятора скорости учтем следующее:

– выполненный ранее синтез процессов в контуре момента (активной составляющей тока) позволяет приближенно описать динамику контура тока по оси q апериодическим звеном 1-го порядка:

$$W_{кт} = \frac{1/K_{oTq}}{2T_{НПЧ}s+1}; \quad (84)$$

– в контуре скорости должен быть обеспечен астатизм к возмущающему воздействию с целью поддержания скорости на заданном уровне.

На рисунке 27 представлена структурная схема контура регулирования скорости синхронного двигателя.

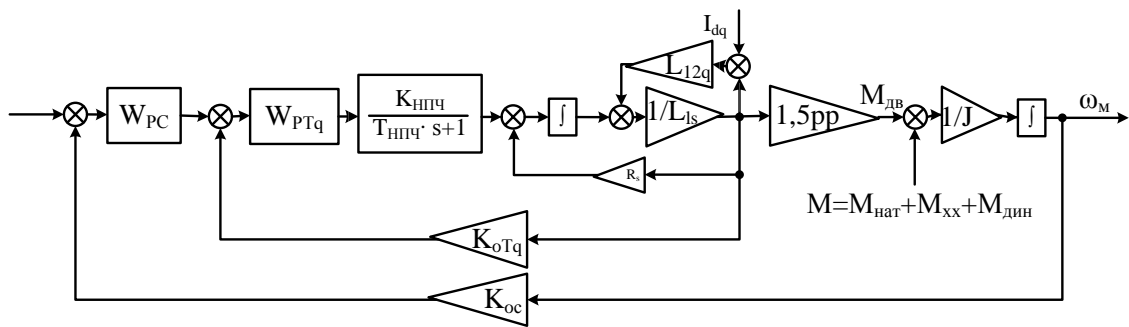


Рисунок 27 - Структурная схема контура регулирования скорости синхронного двигателя

Контур регулирования скорости настраивается на симметричный оптимум, что соответствует следующей передаточной функции разомкнутого контура скорости:

$$W_{к}^{раз} = \frac{8T_{НПЧ}s+1}{8(2T_{НПЧ})^2s^2(2T_{НПЧ}s+1)} \quad (85)$$

Передаточная функция разомкнутого контура скорости с учетом схемной линеаризации:

$$W_{к}^{раз} = W_{pc} \cdot \frac{1}{2 \cdot T_{НПЧ} \cdot s + 1} \cdot \frac{3}{2} \cdot p_{II} \cdot \frac{1}{J} \cdot s \cdot K_{oc} \quad (86)$$

Передаточную функцию регулятора скорости можно получить, приравняв (85) и (86):

$$W_{pc} = \frac{J \cdot K_{oTq} + 8 \cdot J \cdot K_{oTq} \cdot T_{HПЧ} \cdot s}{48 \cdot K_{OC} \cdot T_{HПЧ}^2 \cdot p_{II} \cdot s} = K_{p\omega} + \frac{1}{T_{и\omega} s} \quad (87)$$

Следовательно:

$$K_{p\omega} = \frac{J \cdot K_{oTq}}{6 \cdot K_{OC} \cdot T_{HПЧ} \cdot p_{II}}, \quad (88)$$

$$T_{и\omega} = \frac{48 \cdot K_{OC} \cdot T_{HПЧ}^2 \cdot p_{II} \cdot s}{J \cdot K_{oTq}}. \quad (89)$$

Таким образом, получен ПИ-регулятор скорости. Передаточная функция замкнутого контура скорости примет вид:

$$W_{kc}^{зам} = \frac{8T_{HПЧ}s+1}{8(2T_{HПЧ})^3s^3+8(2T_{HПЧ})^2s^2+8T_{HПЧ}s+1} \quad (90)$$

Контур скорости, настроенный на симметричный оптимум, обладает большим (порядка 40 %) перерегулированием по задающему воздействию.

Чтобы получить в контуре скорости процессы, соответствующие стандартному переходному процессу, на его вход включается низкочастотный фильтр первого порядка с передаточной функцией:

$$W_{\phi} = \frac{1}{8T_{HПЧ}s+1} = \frac{1}{0,008 \cdot s+1} \quad (91)$$

Для контура регулирования скорости синхронного электродвигателя клетки формула аналогичная.

2.7.3 Расчёт контура регулирования натяжения для режима прямого регулирования

Оптимизация каждого последующего контура осложняется в связи с всё более возрастающей сложностью описания объекта управления и наличием перекрёстных взаимосвязей с соседними контурами (например, с контуром регулирования скорости), в результате чего структурное преобразование схем даёт в результате нестандартные виды передаточных функций объекта управления, синтез регуляторов для которых необходимо проводить с допущениями либо при структурном преобразовании, либо при определении ЛАЧХ регулятора графическим методом.

Расчётная схема САР натяжения имеет трехзвенную структуру, аналогичную предыдущим, причем в данном случае роль объекта управления играет замкнутый контур регулирования скорости и модель механических напряжений в

полосе, полученная по рисунку (см. рисунок 29) и представляющая собой апериодическое звено. Структурная схема данного контура показана на рисунке 28.

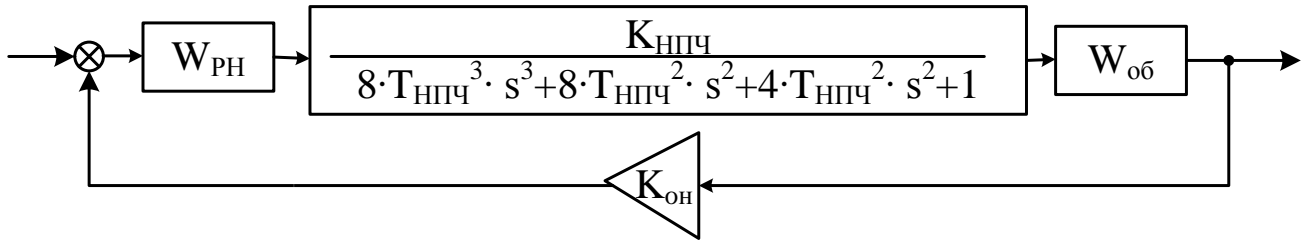


Рисунок 28 - Структурная схема контура регулирования натяжения

Рассмотрим допущения относительно структуры системы для синтеза регулятора натяжения.

Будем считать, что сигнал обратной связи, умножаемый на радиус, определяющий момент, необходимый для создания натяжения, является частным случаем нагрузки, прикладываемой к валу двигателя.

Согласно стандартной методике передаточная функция регулятора:

$$R_3 = [W_3(p)]^{-1} \cdot \frac{1}{T_3 \cdot s} \quad (92)$$

Передаточная функция разомкнутой системы регулирования натяжения:

$$W_{кн}^{зам} = R_3 \cdot W_{кс}^{зам} \cdot W_{мехнапр} = \frac{1}{8 \cdot T_{нпч} \cdot s \cdot (8 \cdot (2 \cdot T_{нпч})^3 \cdot s^3 + 8 \cdot (2 \cdot T_{нпч})^2 \cdot s^2 + 8 \cdot T_{нпч} \cdot s + 1)} \quad (93)$$

Передаточная функция разомкнутого контура натяжения с учётом схемной линеаризации:

$$W_{кн}^{раз} = W_{рн} \cdot \frac{1}{8 T_{нпч} \cdot s \cdot (8 (2 T_{нпч})^3 s^3 + 8 (2 T_{нпч})^2 s^2 + 8 T_{нпч} s + 1)} \cdot \frac{E \cdot b \cdot h \cdot \mu}{K_{он}} = \frac{E \cdot b \cdot h \cdot \mu}{(R_p + L \cdot \mu) \cdot s + E \cdot b \cdot h \cdot V_{кл} \cdot \mu \cdot \alpha} \cdot \frac{1}{8 \cdot T_{рч} \cdot s \cdot (8 T_{нпч}^3 \cdot s^3 + 8 T_{нпч}^2 \cdot s^2 + 4 T_{нпч} \cdot s + 1)} \quad (94)$$

Передаточную функцию регулятора натяжения можно получить, приравняв (93) и (94):

$$W_{рн} = \frac{(R_p + L \cdot \mu) \cdot s + E \cdot b \cdot h \cdot V_{кл} \cdot \mu \cdot \alpha}{8 \cdot E \cdot b \cdot h \cdot T_{нпч} \cdot \mu \cdot s \cdot K_{он}^2} = K_{рF} + \frac{1}{T_{иFS}} \quad (95)$$

2.8 Структурная схема обобщённой математической модели мехатронного комплекса «клеть-полоса-моталка»

Обобщённая математическая модель, структура которой показана на рисунках 29 - 31 применительно к реальному исследуемому объекту (участок смотки полосы стана 2000 холодной прокатки ОАО «ММК») состоит из:

- математическая модель синхронного электродвигателя моталки;
- математическая модель синхронного электродвигателя клетки;
- математическая модель непосредственного преобразователя частоты электродвигателя моталки;
- математическая модель непосредственного преобразователя частоты электродвигателя клетки;
- математическая модель тиристорного возбудителя электродвигателя моталки;
- математическая модель тиристорного возбудителя электродвигателя клетки;
- механизм моталки;
- очаг деформации металла в клетки;
- прокатываемая полоса.

Анализ литературы показал, что работы по моделированию взаимосвязанных электромеханических систем производились. В [44,45] авторы разрабатывали универсальную для приводов постоянного и переменного тока модель межклетевого промежутка непрерывной подгруппы стана горячей прокатки и исследовали динамические режимы.

При этом большое внимание уделяется модели очага деформации в клетки. Было выявлено, что основной причиной повышенных динамических нагрузок является несогласованность скорости выхода полосы из вертикальных валков и линейной скорости вращения горизонтальных валков. В [46] разрабатываются методы снижения динамических нагрузок. В работе [47] разрабатывается модель межклетевого промежутка широкополосного стана горячей прокатки.

При этом модель включает в себя как модели электроприводов и прокатываемой полосы, так и модели очага деформации, а также нажимных устройств. Эта модель на данный момент включает практически полный перечень основного прокатного оборудования.

Детальное моделирование динамики взаимосвязанных межклетевых систем для станов холодной прокатки было представлено в [48-51]. Краткий обзор и сравнение схем и методов управления намоткой мотальными устройствами можно найти в [8,9]. В [35,51] моделируется простой мотальный механизм. В [52,53] дано математическое описание средств прямого регулирования натяжения и их динамический анализ.

Обобщённая математическая модель содержит вспомогательные блоки логики и расчётов отдельных компонентов, позволяющих как можно точнее смоделировать процесс прокатки полосы и намотки полосы на в рулоне на моталке.

Перейдём к рассмотрению работы системы автоматического регулирования натяжения в составе разработанной математической модели с целью определения адекватности, а также изучения динамических режимов, вопросов качества адаптации регуляторов при изменении параметров мехатронной системы и возникновение дефектов в рулоне при намотке.

Результаты исследования позволят сделать вывод о качестве работы существующей системы и определить пути усовершенствования.

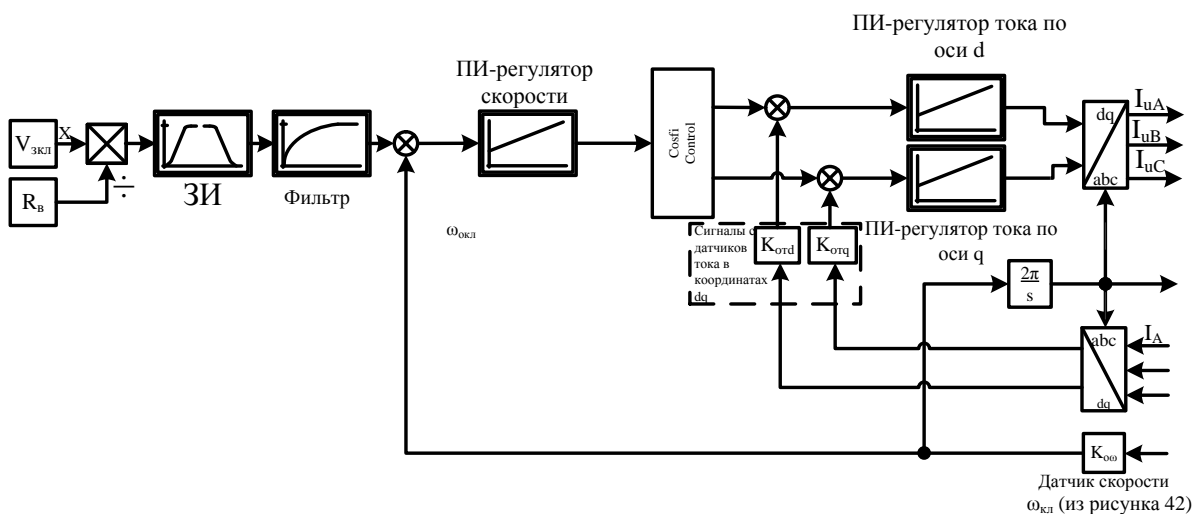
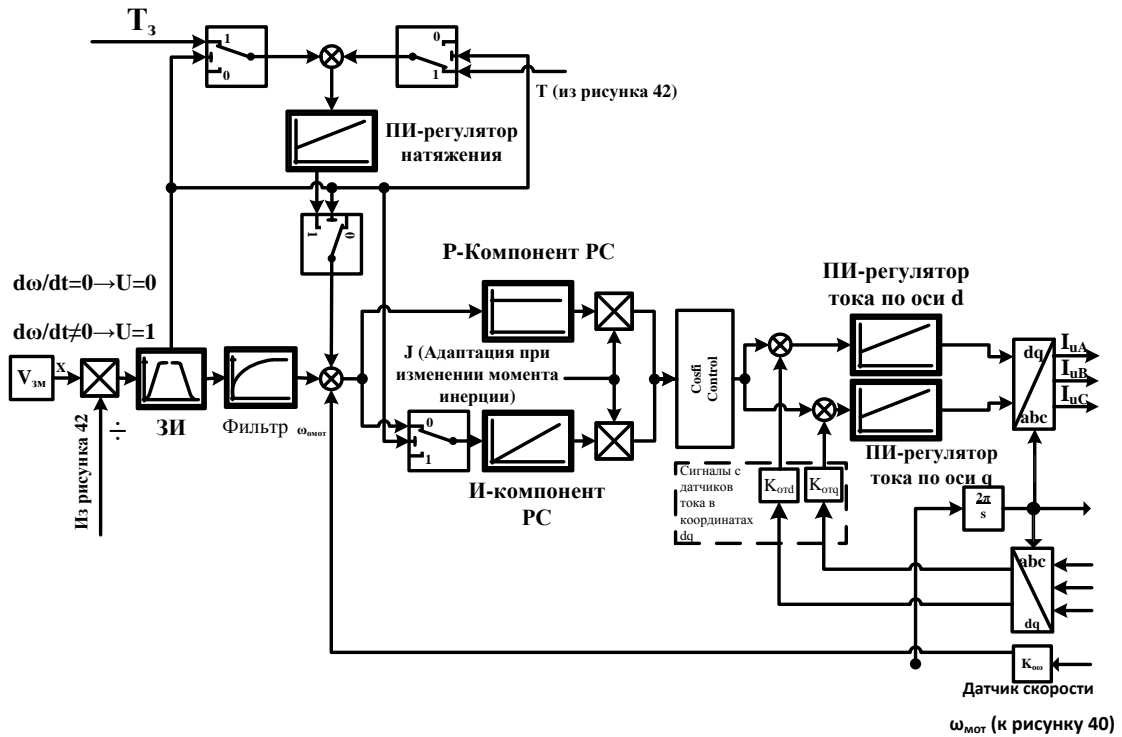


Рисунок 29 - Структурные схемы САРН и САРС

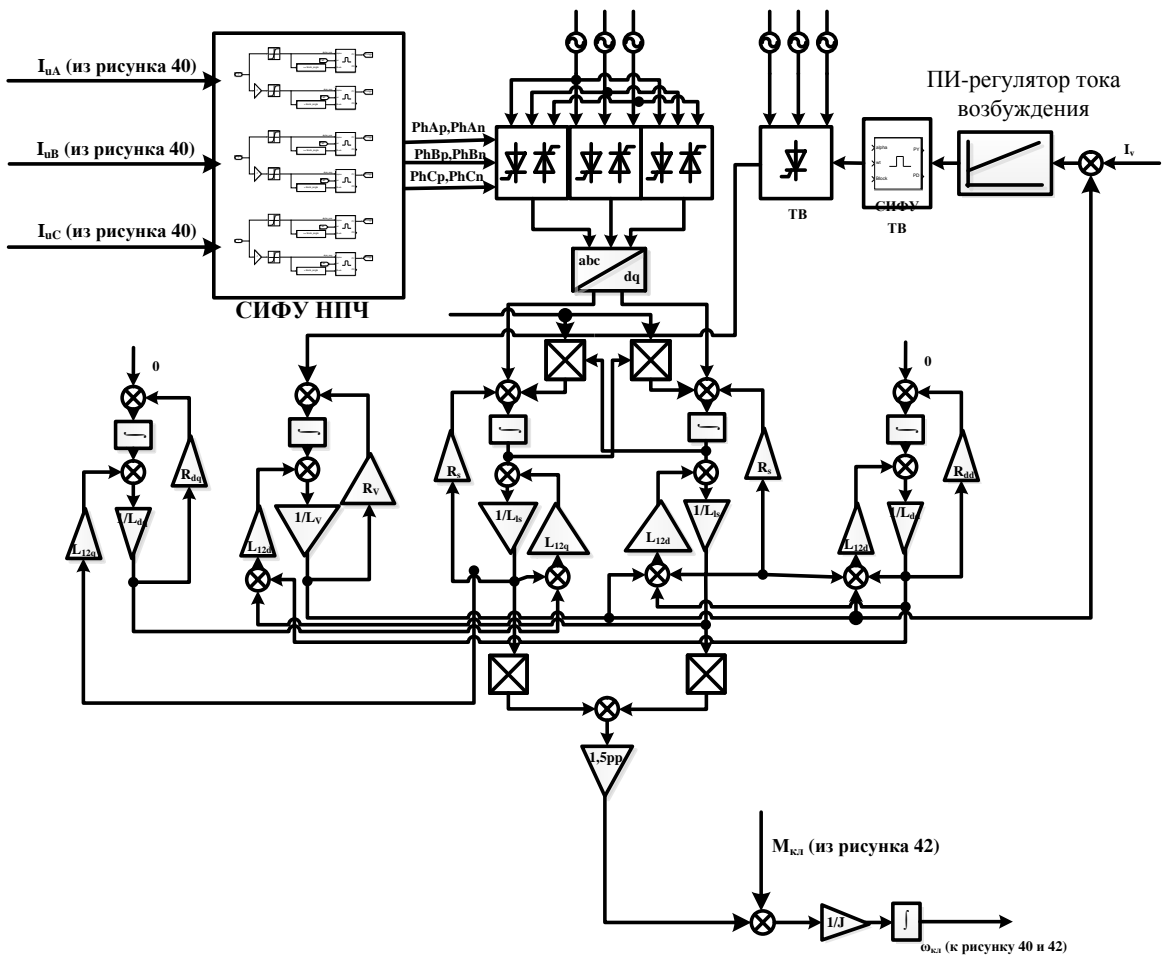
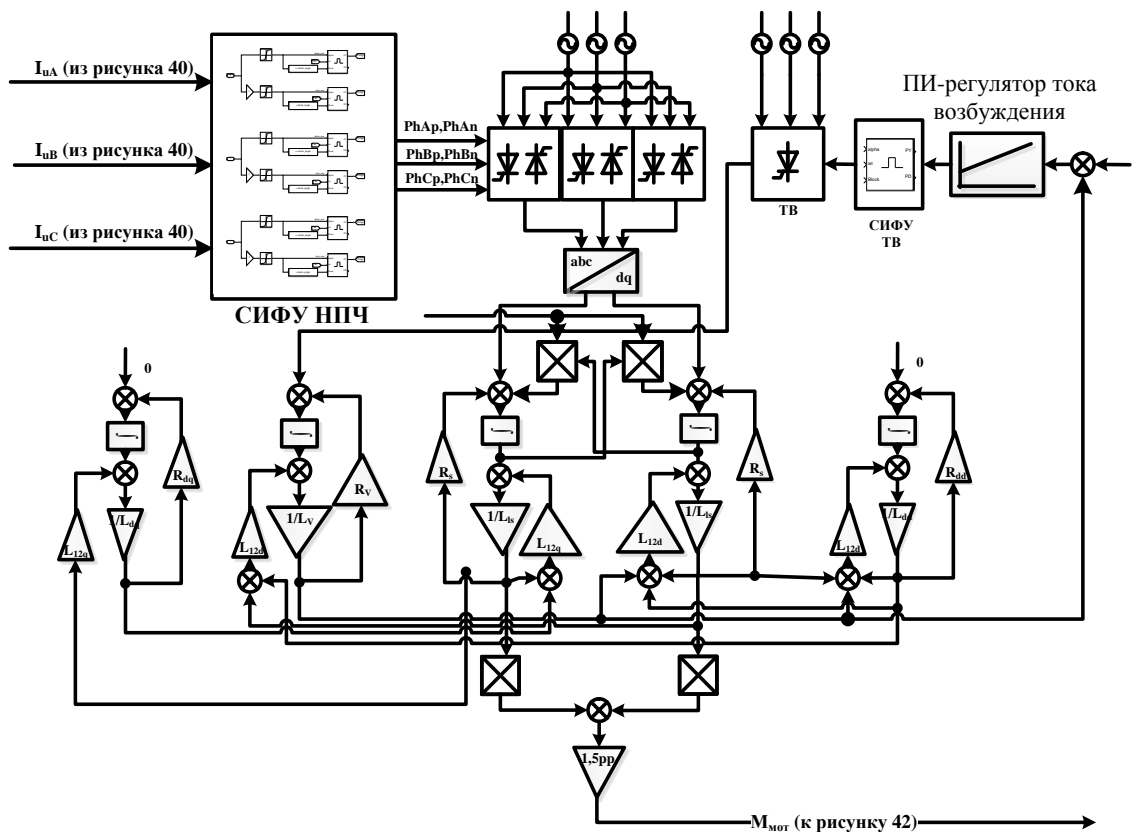


Рисунок 30 - Структурные схемы силовых частей электроприводов моталки и клетки

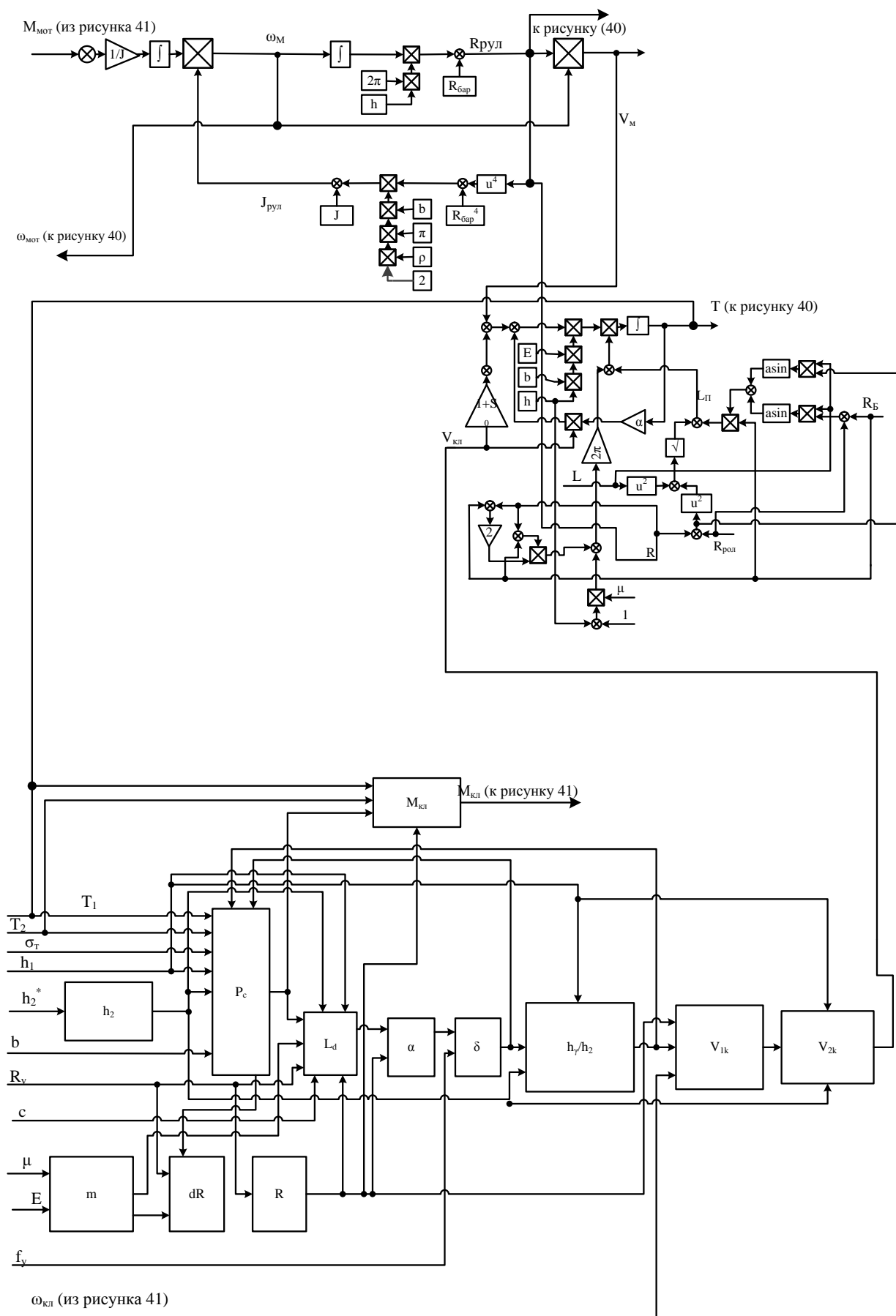


Рисунок 31 - Структурные схемы механизма моталки, очага деформации металла в клетки и прокатываемой полосы

2.9 Проверка адекватности разработанной математической модели

Для проверки адекватности разработанной математической модели выполнено моделирование типовых динамических режимов и сравнение переходных процессов с результатами, полученными путём осциллографирования на стане 2000 ХП. При проверке адекватности исследовались типовые режимы смотки и размотки рулона. Разработанная модель реализована в среде MATLAB (приложение Simulink). При моделировании приняты параметры прокатки холоднокатанной полосы шириной $b=1$ м, толщина полосы составляет $h=0,001$ м, линейная скорость намотки $V_m=5,75$ м/с соответственно. Характерные осциллограммы переходных процессов, полученные экспериментальным способом для электропривода моталки стана 2000 ХП ОАО «ММК» представлены на рисунках 32-35. На рисунках 36-39 показаны переходные процессы, полученные расчётным путём с использованием разработанной математической модели. На осциллограммах и расчётных показаны фиксированные параметры, по которым проводилось сравнение данных в характерных точках. В таблице 1 приведены некоторые значения зафиксированных параметров и указаны погрешности сравнения.

Таблица 1 – Погрешности сравнения осциллограмм и расчётов

Параметр	Осциллограмма	Модель	Абсолютная погрешность, Δ	Относительная погрешность, %
Начальное значение окружной скорости при намотке, $\omega_{нач}$	175 об/мин	154,3 об/мин	20,7 об/мин	11,8 %
Конечное значение окружной скорости при намотке, $\omega_{кон}$	76,43 об/мин	75,5 об/мин	0,93 об/мин	1,21 %
Начальное значение окружной скорости при размотке, $\omega_{нач}$	35,4 об/мин	40,04 об/мин	4,64 об/мин	11,6 %
Конечное значение окружной скорости при размотке, $\omega_{нач}$	97,5 об/мин	93,8 об/мин	3,7 об/мин	3,79 %
Установившееся значение натяжения 1	109,7 кН	112,1 кН	2,4 кН	2,05 %
Установившееся значение натяжения 2	94,41 кН	97 кН	2,59 кН	2,6 %
Установившееся значение натяжения 3	111 кН	112,5 кН	1,5 кН	1,33 %
Установившееся значение натяжения 4	102,5 кН	103 кН	0,5 кН	0,48 %
Установившееся значение натяжения 5	109,5 кН	112,5 кН	3 кН	2,67 %
Радиус рулона перед циклом намотки	0,305 м	0,305 м	0 м	0 %
Радиус намотанного рулона	0,7333 м	0,855 м	0,1217 м	13,7 %

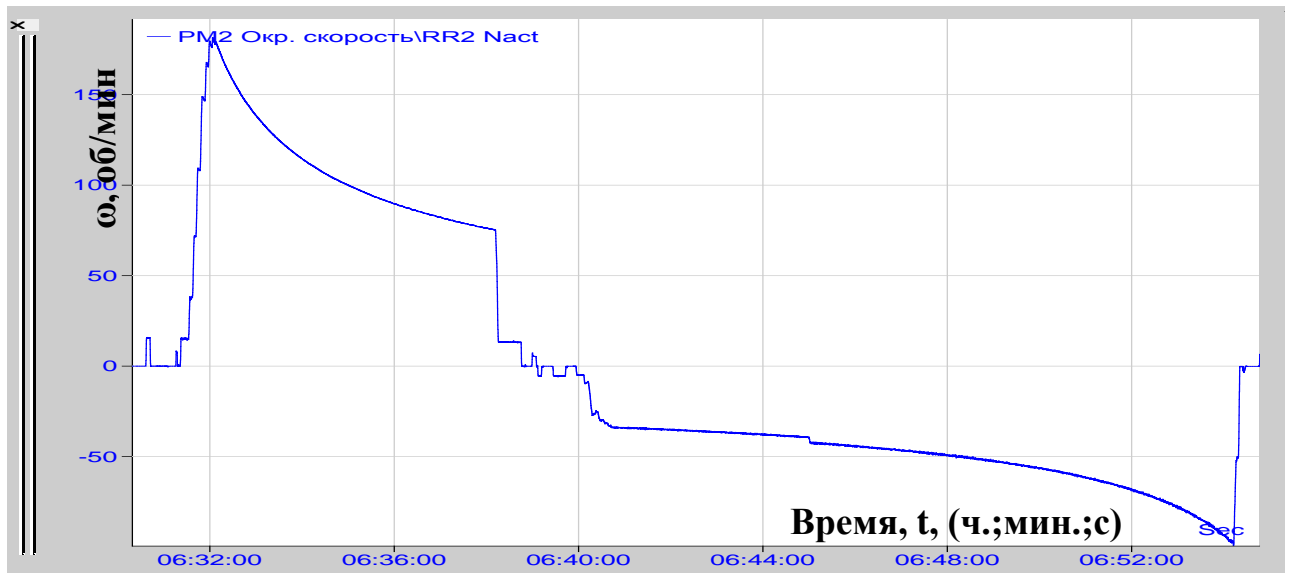


Рисунок 32 - Осциллограмма окружной скорости

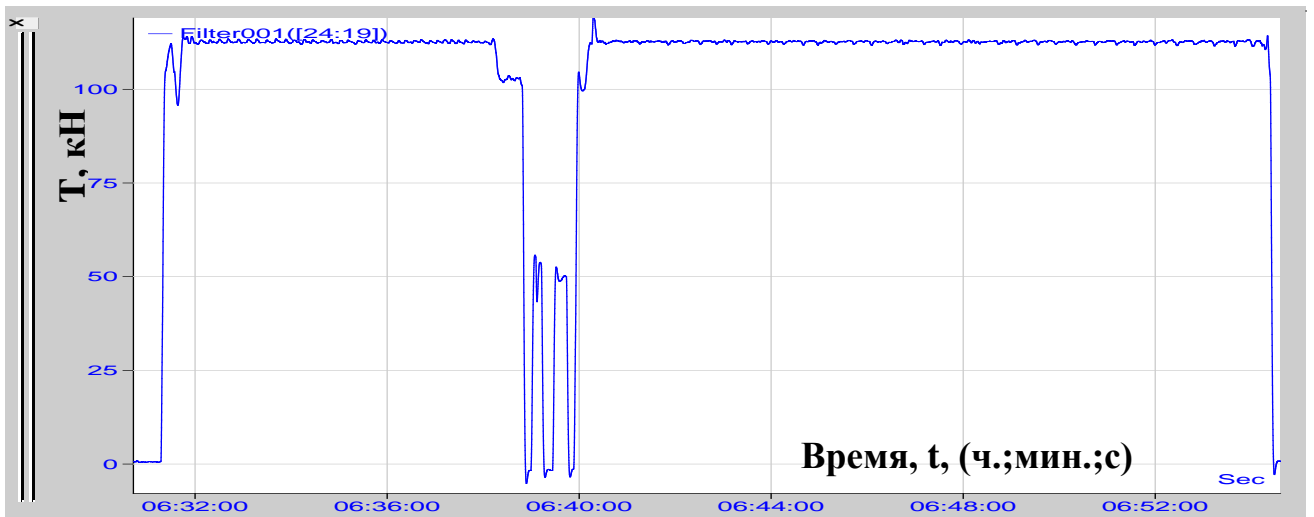


Рисунок 33 - Осциллограмма натяжения в цикле смотки и размотки

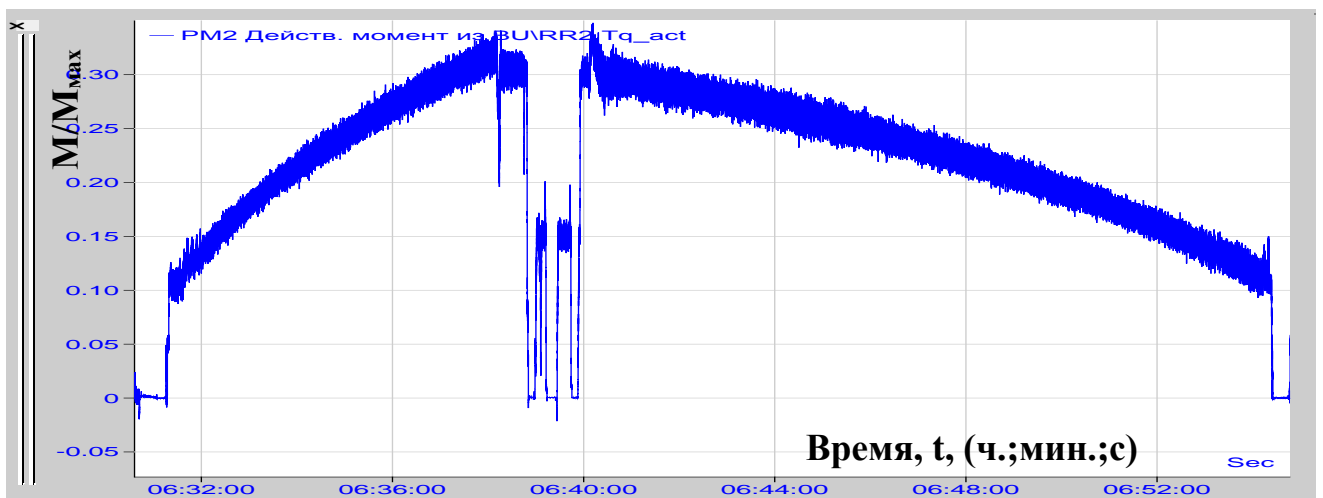


Рисунок 34 - Осциллограмма момента в цикле смотки и размотки

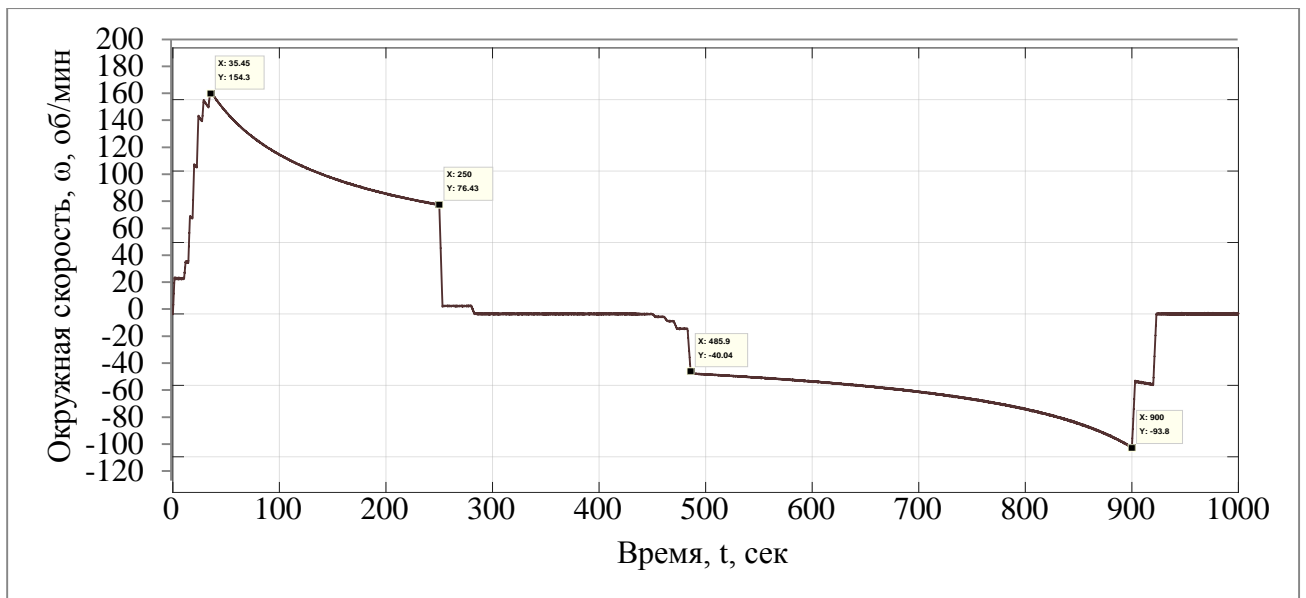


Рисунок 35 - Расчётный график окружной скорости

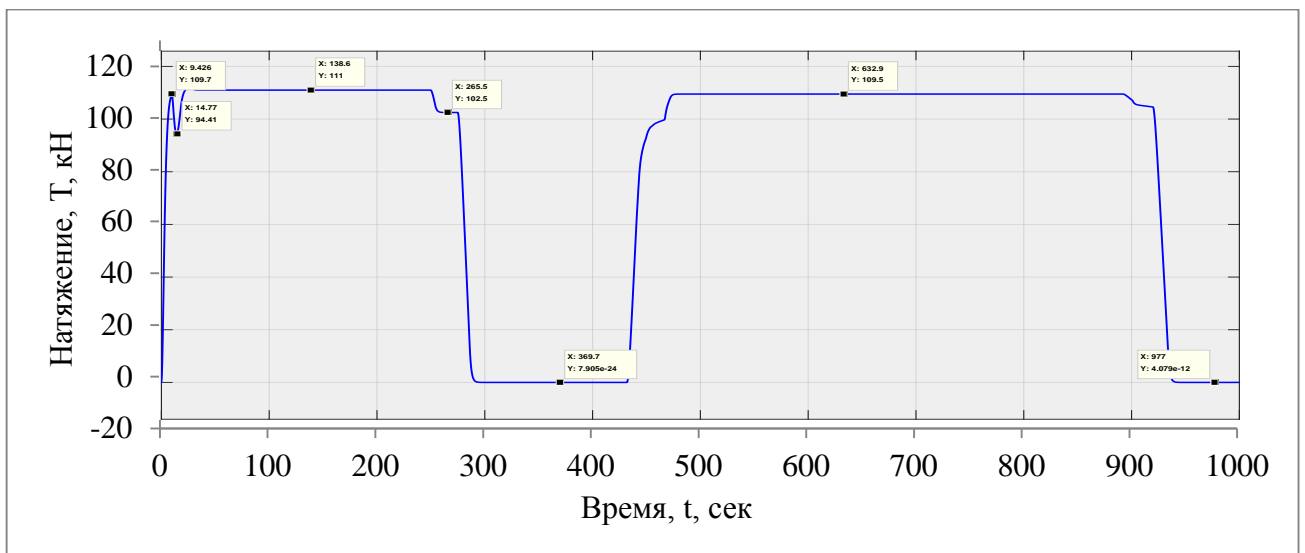


Рисунок 36 - Расчётный график натяжения

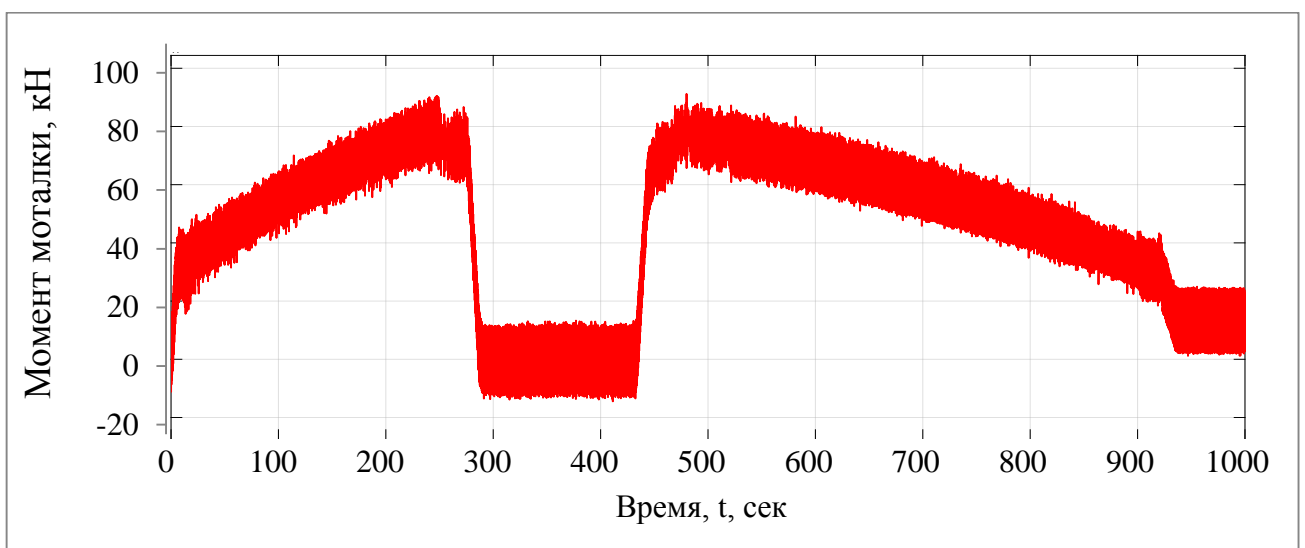


Рисунок 37 - Расчётный график момента

Из таблицы 1 следует, что в большинстве основных параметров относительная погрешность не превышает 10 % и лишь в трёх случаях составляет 10-14 %. Такие расхождения находятся в пределах погрешности измерений при моделировании сложных взаимосвязанных электромеханических систем и являются допустимыми. Таким образом, результаты сравнения экспериментальных и расчётных данных, представленные на рисунках и в таблице 1, позволяют сделать вывод об адекватности разработанной математической модели реальной электромеханической системе «клеть-полоса-моталка». Разработанная математическая модель вполне способна формировать расчётные кривые, близкие по форме с полученными путём осциллографирования [47]. Далее будем подробнее исследовать самые тяжёлые динамические режимы в стандартном технологическом процессе прокатки - намотки и размотки полосы максимально возможной толщины и ширины ($h=0,005$ м и $b=1,65$ м) на максимальной скорости прокатки. Режим расширенного контроля массы не моделируется.

Выводы по главе II

1. В данной главе описано создание обобщённой математической модели существующего мехатронного комплекса реверсивной моталки с учётом взаимосвязи с клетью, из которой выходит наматываемый металл;

2. При рассмотрении технологической схемы «клеть-полоса-моталка» определены функциональные и структурные взаимосвязи между технологическими переменными (масса, момент инерции, скорость) для отдельных электроприводов. Предложена структурная схема взаимосвязи электроприводов клетки и моталки;

3. На основе построенных отдельных моделей синхронного электродвигателя с демпферной обмоткой, непосредственного преобразователя частоты, тиристорного возбуждателя и САРН (для клетки набор компонентов аналогичный с учётом САРС) и полосы, которой клеть и моталка взаимосвязаны;

4. Адекватность разработанной математической модели исследуемому объекту подтверждена в результате сравнения переходных процессов координат электроприводов и параметров прокатки, полученных путем моделирования и осциллографирования на стане. Относительная погрешность сравниваемых показателей в характерных точках не превышает 12%, что допустимо при моделировании сложных систем. Натяжение между исследуемыми клетями, полученное в ходе моделирования, имеет высокую сходимость с реальным натяжением;

5. Оценка возможности использования разработанной математической модели позволяет сделать вывод о применимости модели для дальнейшей работы по исследованию и усовершенствованию мехатронной системы регулирования натяжения.

ГЛАВА III ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ НАТЯЖЕНИЯ НА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

3.1 Исследование базовых динамических режимов смотки и размотки

На рисунке приведены расчётные кривые переходных процессов, построенные по результатам математического моделирования для полного цикла смотки-размотки рулона (одного прохода). Моделировался самый тяжёлый режим: намотка полного рулона максимальной толщины и ширины на максимальной скорости. Значение окружной скорости в цикле смотки начинается с 514,6 об/мин и за время 37 с снижается до 184,4 об/мин. В цикле размотки значение окружной скорости начинается с -133,3 об/мин и повышается до -405,4 об/мин за время 50 с.

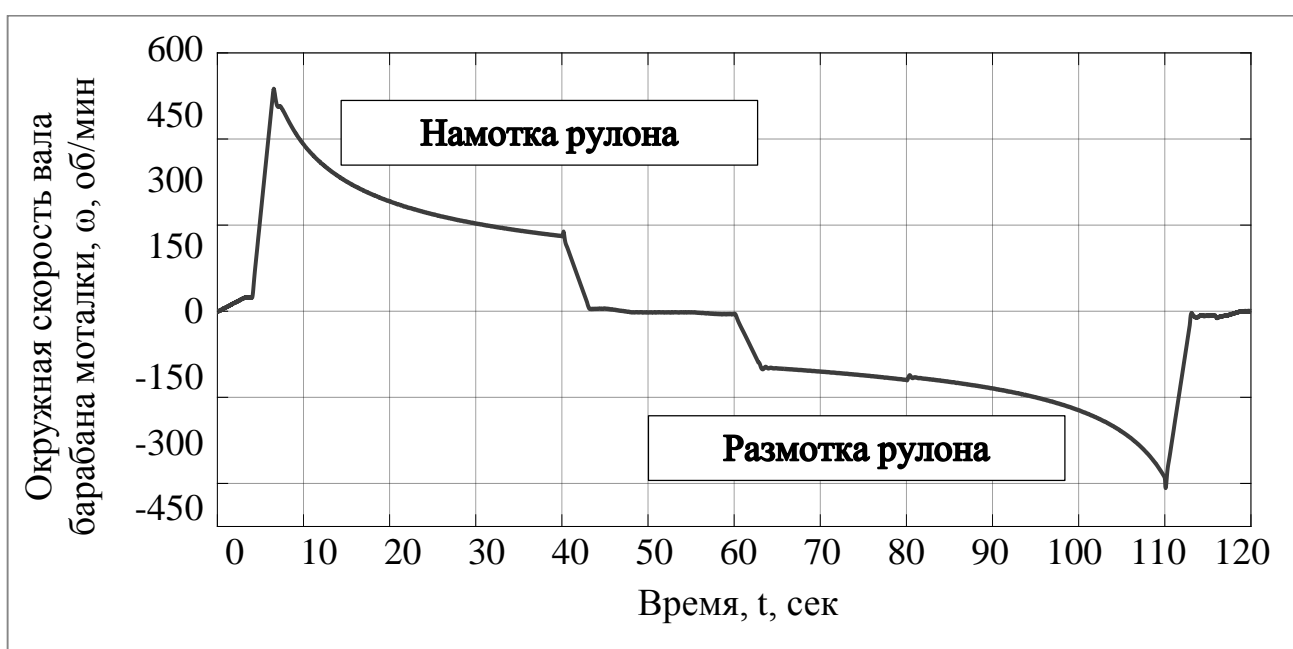


Рисунок 38 - Полный цикл окружной скорости вала барабана моталки

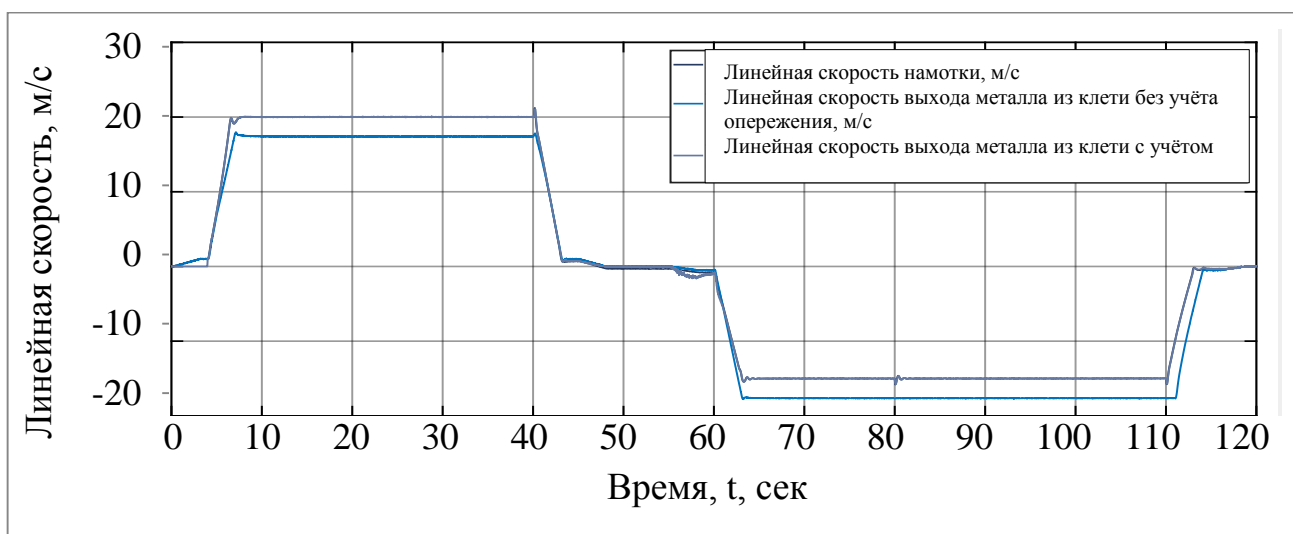


Рисунок 39 - Полный цикл линейной скорости

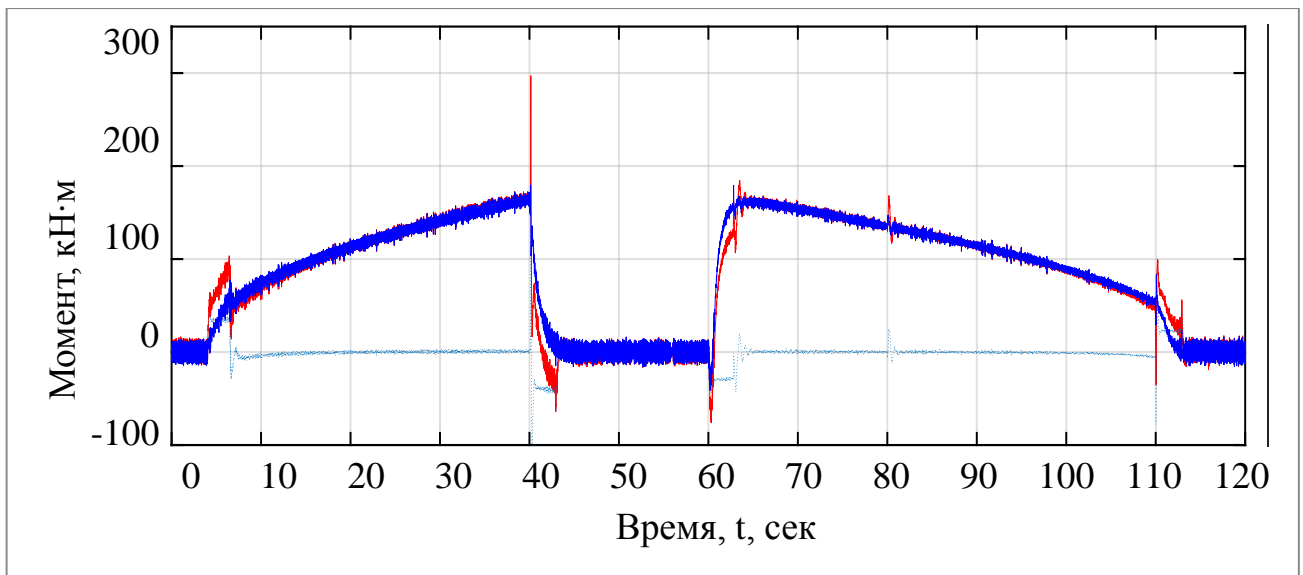


Рисунок 40 - Полный цикл момента

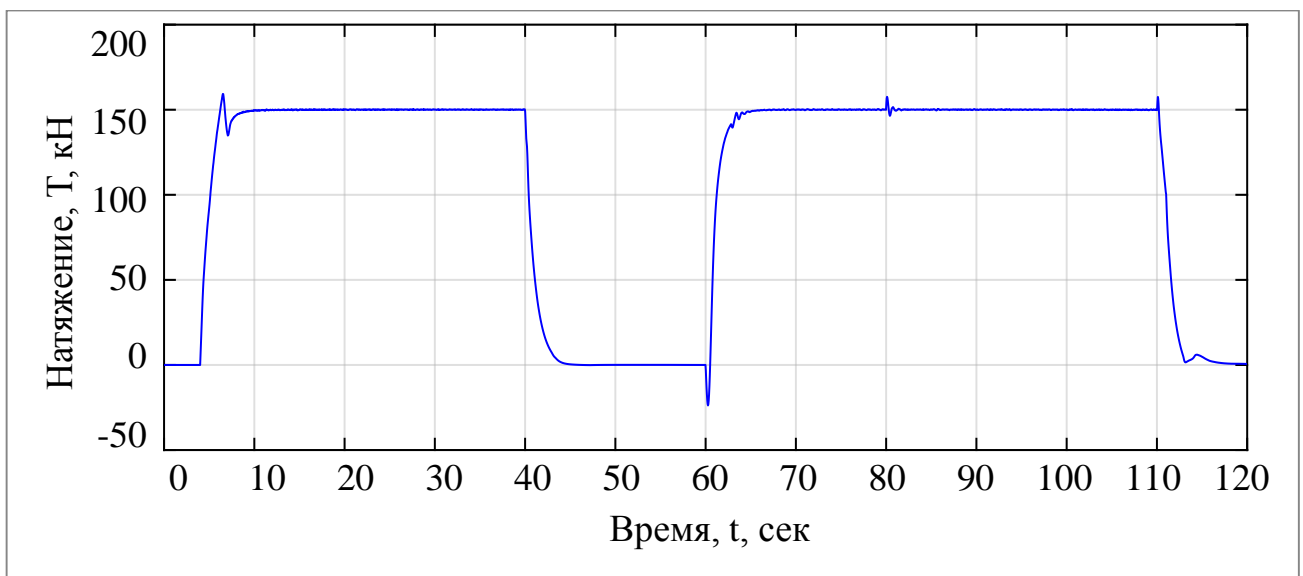


Рисунок 41 - Полный цикл натяжения

Работа участка смотки полосы стана холодной прокатки 2000 начинается с разгона клетки и моталки до заправочной скорости $V_{\text{запр}}=0,2-1$ м/с. В соответствии с требованием, в режиме разгона линейные скорости клетки и моталки строго синхронизированы. Расчётные кривые линейных скоростей показаны на рисунке 42.

По графикам видно, что разгон до заправочной скорости $V_{\text{запр}}=1$ м/с происходит в соответствии с заданным по технологии темпом разгона $t_{\text{разг}} \approx (1,25-3)$ с. Работа на заправочной скорости длится в течение 1-2 с (на других станах ХП это время может отличаться и возрастет до 5 с).

В момент времени $t=3$ с, т.е. после достижения полосой барабана моталки, происходит захват полосы. Скорость в течение времени намотки нескольких витков остаётся на уровне заправочной. При этом немного увеличивается радиус рулона, момент инерции и т.д. Это отражено на расчётных кривых 43-44.

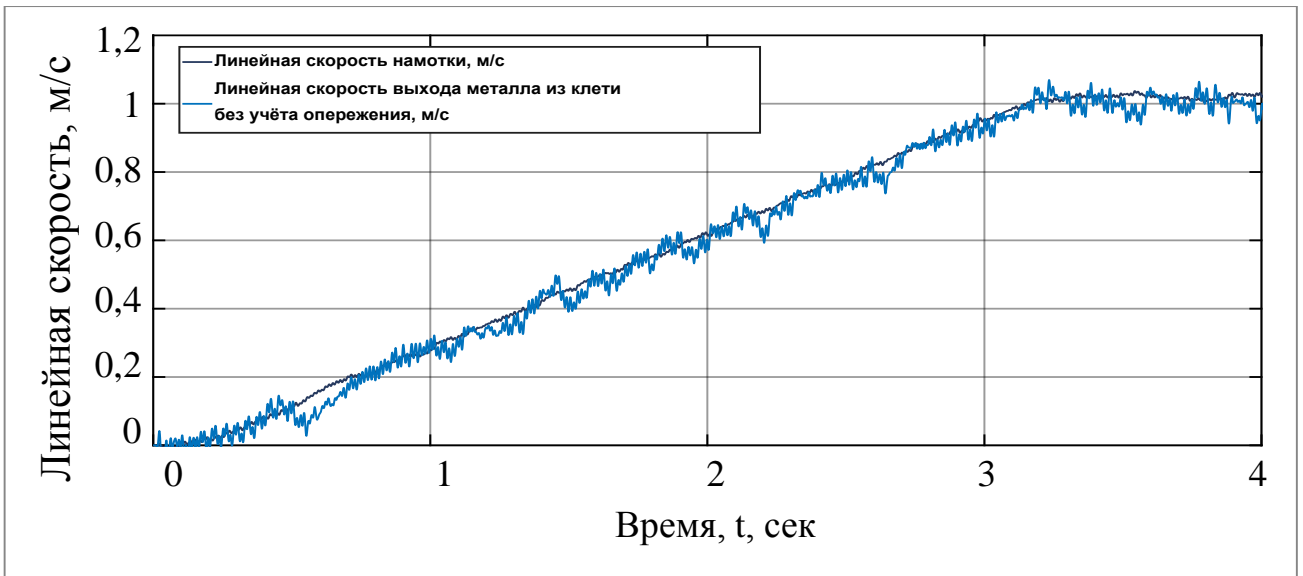


Рисунок 42 - Разгон до заправочной линейной скорости

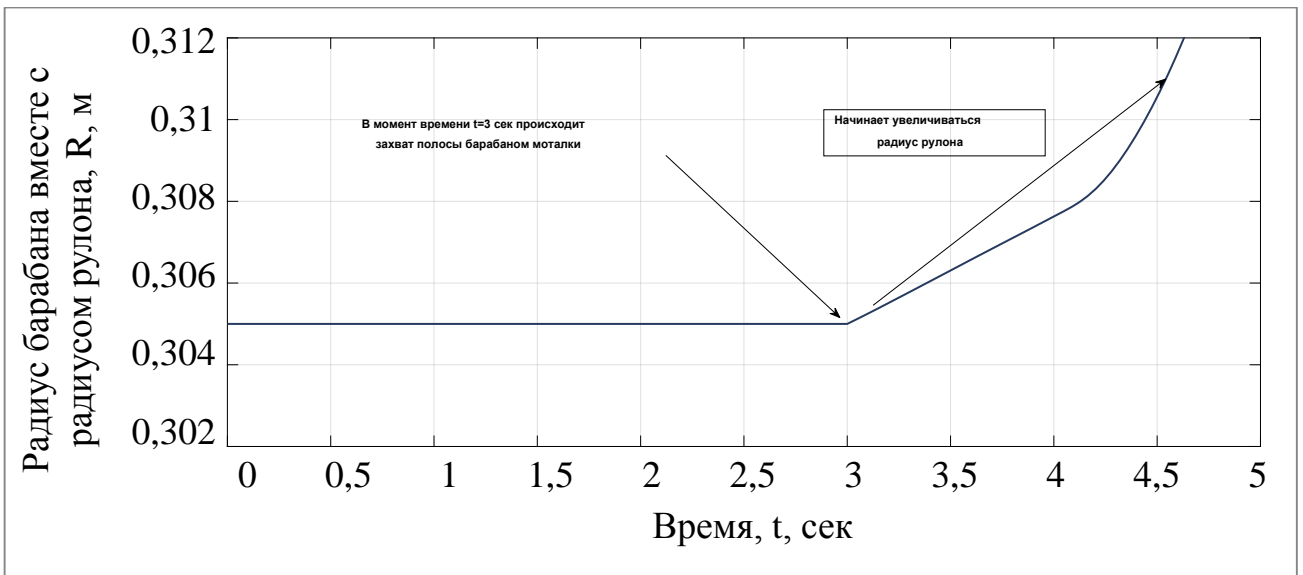


Рисунок 43 - Увеличение радиуса при захвате полосы моталкой

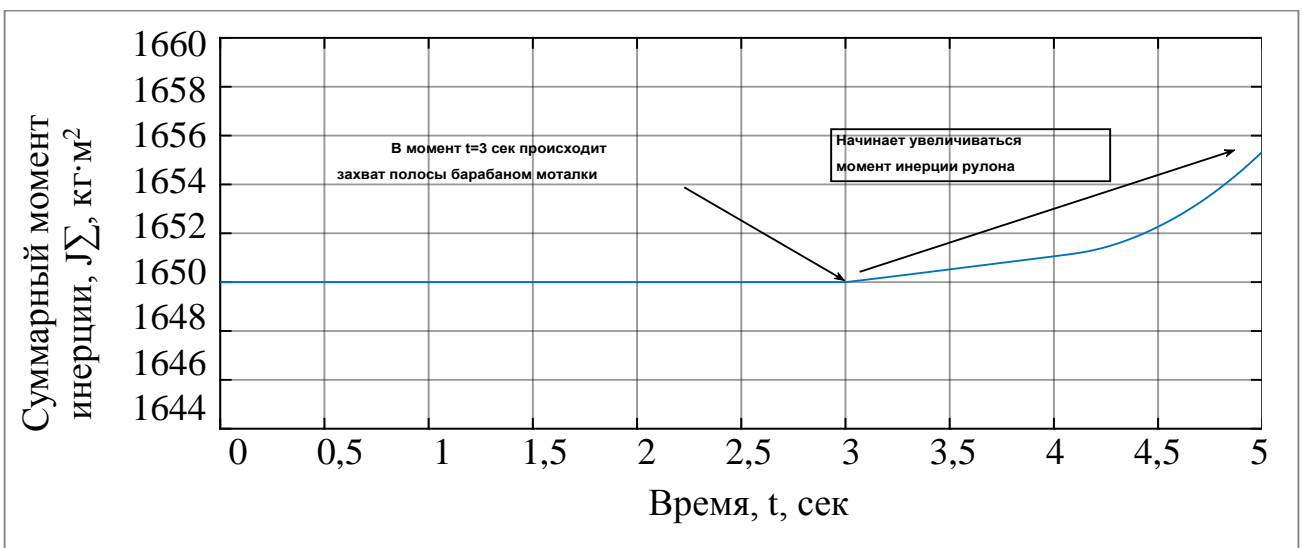


Рисунок 44 - Увеличение момента инерции при захвате полосы моталкой

После захвата полосы реверсивной моталкой и намотки нескольких витков рулона в момент времени $t \approx 3,1$ с стан разгоняется до рабочей скорости (20-22 м/с). В момент времени $t \approx 6,56$ с разгон заканчивается, система переходит в статический режим намотки, подключается контур прямого регулирования натяжения. В имеющейся САРН переключение режимов происходит следующим образом: при скоростях намотки меньше 10 м/с регулирование натяжения осуществляется исключительно косвенным методом. При скоростях намотки больше 10 м/сек в переходных режимах (в динамике) натяжение регулируется косвенным способом, а в статике в прямом.

Расчётные кривые линейной скорости, окружной скорости и момента показаны на рисунках 45, 46, 47. Разгон продолжается в течение времени $t=3$ с. Окружная скорость в начале цикла намотки составляет 514,6 об/мин, что меньше максимальной скорости вращения электродвигателя (658 об/мин).

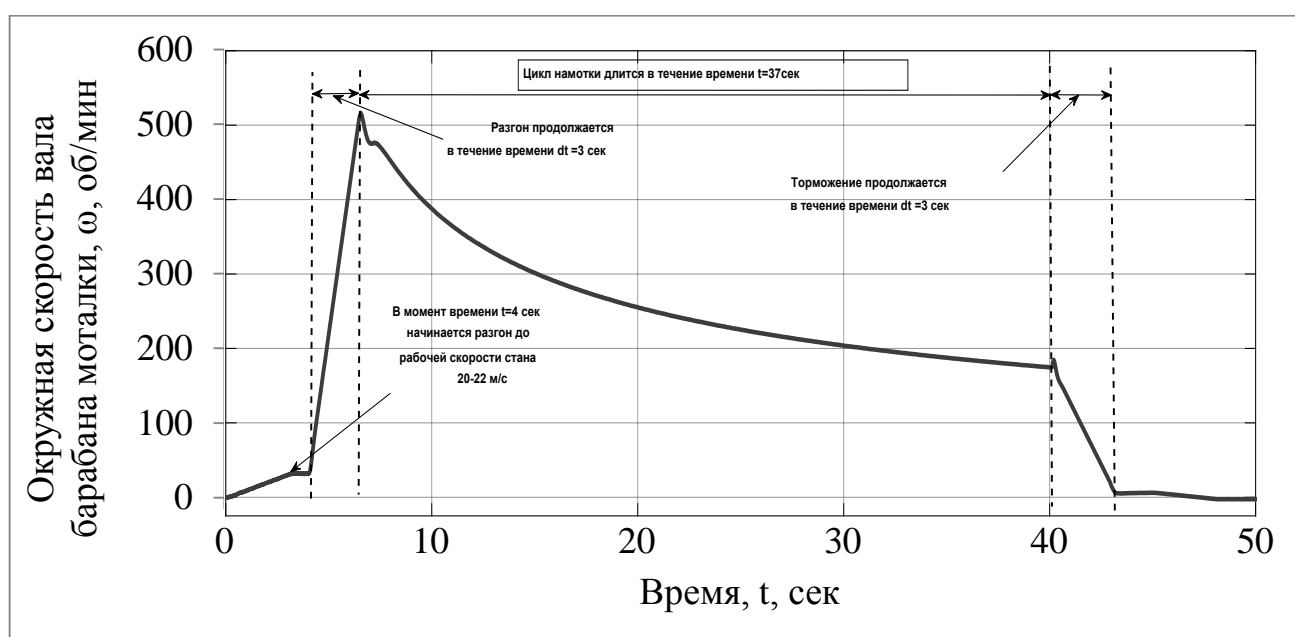


Рисунок 45 - Окружная скорость в цикле намотки

Установившееся значение линейной скорости составляет $V_m=20,01$ м/с. Линейная скорость в процессе смотки поддерживается на постоянном уровне. Перерегулирование при разгоне практически отсутствует. Установившееся значение линейной скорости клетки составляет 17,41 м/с, максимальное значение в динамике вырастает до 17,95 м/с.

Перерегулирование составляет 3,16 %. Поскольку на стане ведётся прокатка бесшовных полос, в процессе намотки не происходит снижения скорости для прокатки швов. В момент времени $t=40$ сек цикл смотки должен завершаться. В этот момент происходит торможение моталки до уровня заправочной скорости $V=1$ м/сек, клеть при этом тормозится до скорости 0,6937 м/сек.

При этом, в начале процесса торможения скорость моталки и клетки кратковременно вырастает до 21,22 м/с и 17,71 м/с. Это обусловлено несовершенством системы равномерного разгона и переключения с косвенного на прямое регулиро-

вание натяжения. Торможение происходит за время, равное $t=3$ с. В течение времени $t=7-40$ с продолжается статический цикл намотки.

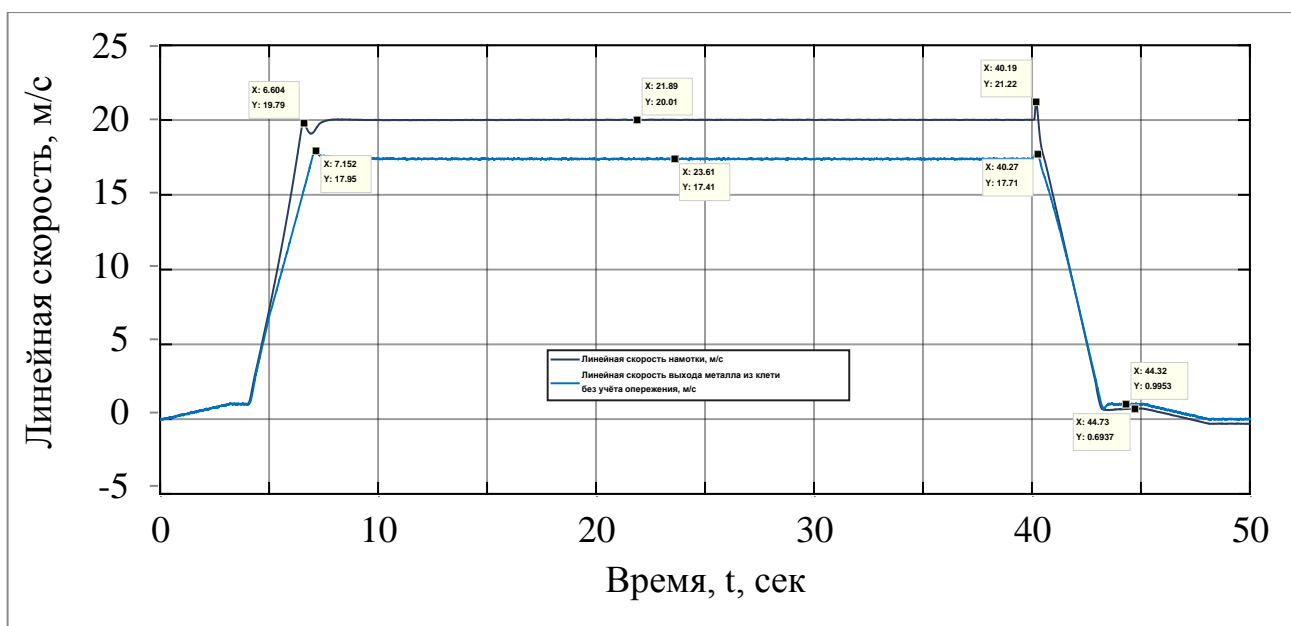


Рисунок 46 - Линейная скорость в цикле намотки

Расчётные кривые момента на валу двигателя моталки и натяжения показаны на рисунках 47 и 48. Несогласованность скоростей клетки и моталки в начале и конце цикла разгона привела к динамическим броскам момента.

Так, в динамическом режиме момент изменятся в пределах от минимума -19,38 кН·м до максимума 72,91 кН·м. Затем момент стабилизируется, увеличиваясь с ростом радиуса рулона. В режиме торможения момент изменятся в пределах от минимума 224,8 кН·м до -31,12 Н·м. На рисунке показана расчётная кривая момента с учётом компенсированных составляющих момента (натяжения).

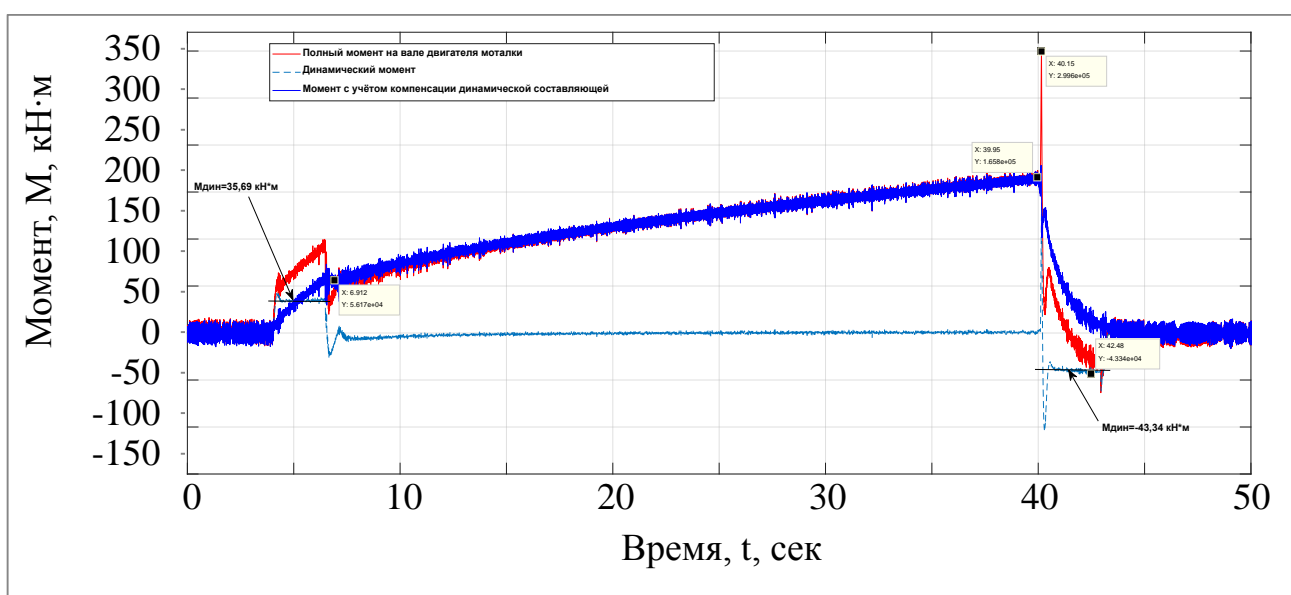


Рисунок 47 - Момент на валу двигателя моталки в цикле намотки

Натяжение при разгоне до номинальной скорости прокатки этом вырастает со значения $T=0$ до значения $T=150$ кН.

В переходном режиме из-за несовершенства системы синхронизации скоростей, а так же разной динамики разгона, происходят так же броски натяжения, отклонения от заданного уровня, просадки и т.д. Это приводит к особенностям поведения динамики натяжения в режиме разгона.

Например, для данного случая в режиме разгона натяжение изменяется от максимума 159,3 кН до минимума 134,7 кН·м (стоит заметить, что подобное явление имеет место и в реальной системе, что отражено на осциллограммах, снятых со стана 2000 ХП).

Установившееся значение составляет 150 кН и поддерживается постоянным на протяжении всего цикла смотки рулона.

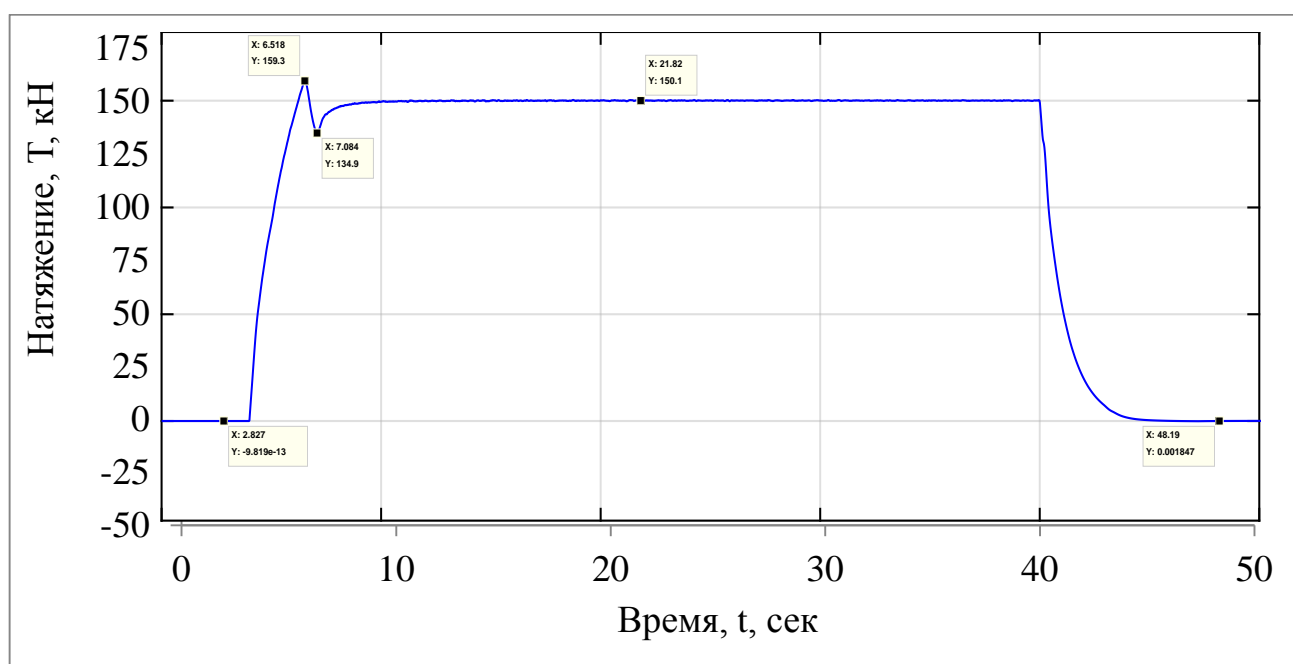


Рисунок 48 - Натяжение в цикле намотки

Анализ расчётной кривой натяжения показывает, что благодаря несовершенству системы синхронизации и различной динамики роста скоростей в переходном режиме происходит бросок натяжения, определяемый темпом роста и разностью линейных скоростей моталки и клетки.

В том случае, если натяжение в переходных режимах не компенсировать, может происходить обрыв полосы.

В момент времени $t=40$ с происходит процесс остановки моталки. После намотки рулона до радиуса $R \approx 1,1$ м происходит торможение моталки до уровня заправочной скорости $V=1$ м/с (см. рисунок линейной скорости). В этот момент начинается «домотка» рулона без натяжения.

В течение времени $t \approx 2,5$ с моталка работает с рулоном без натяжения. Расчётные кривые радиуса и момента инерции показаны на рисунке ниже. Радиус рулона возрастает с 0,305 м до 1,1 м. Момент инерции возрастает с 1650 кг·м² до 7149 кг·м².

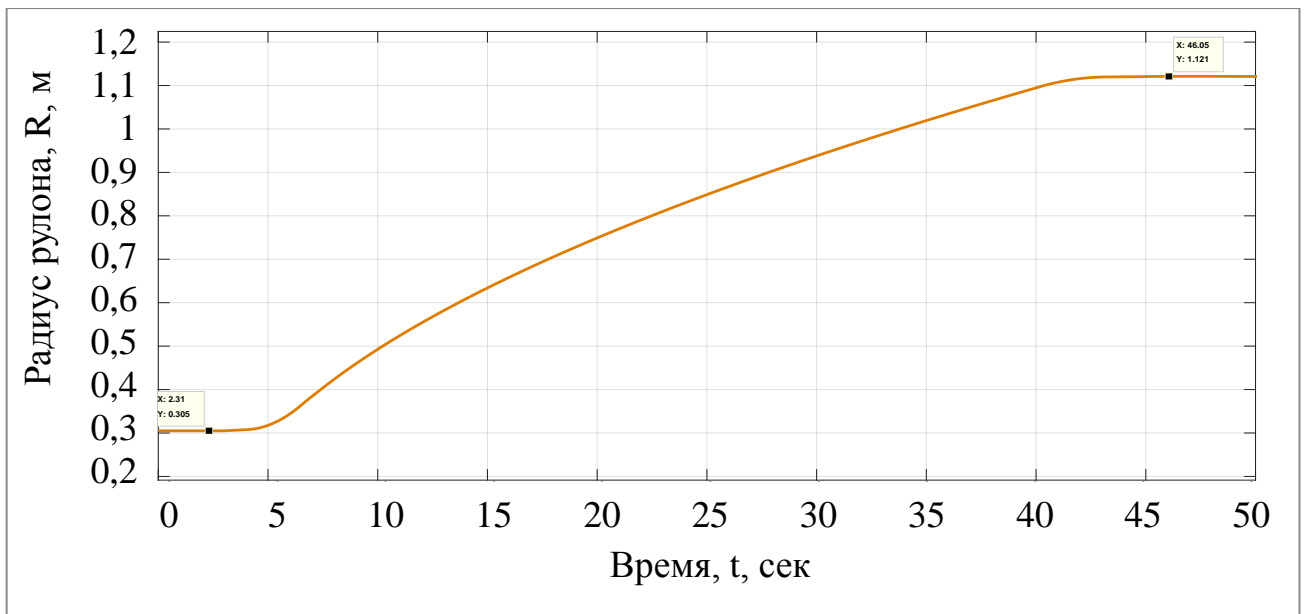


Рисунок 49 - Радиус в цикле намотки

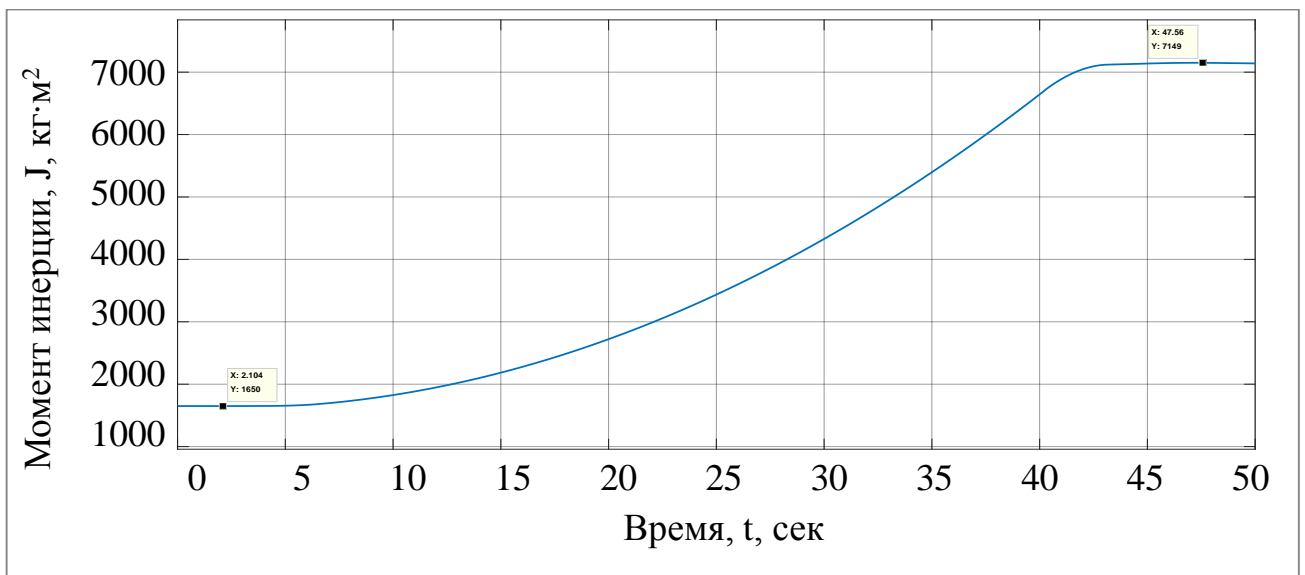


Рисунок 50 - Момент инерции в цикле намотки

Из кривых видно, что в случае отсутствия сигнала компенсации, динамический момент на валу двигателя в переходном режиме больше на величину, пропорциональную отклонению натяжения от заданной динамики в переходном режиме.

Если натяжение превысит предел прочности материала, то произойдёт обрыв наматываемой полосы. Поэтому в переходных режимах необходимо регулировать, ограничивать или компенсировать броски или падения натяжения. Для этого в существующей системе предусмотрен блок компенсации различных составляющих момента.

Режим размотки. Для создания натяжения полосы между моталкой и клетью двигатель моталки должен работать в генераторном, тормозном режиме. При разматывании полосы с барабана моталки диаметр рулона непрерывно уменьша-

ется. В этом случае при постоянной скорости движения полосы скорость вращения моталки должна увеличиваться.

При реверсе моталка сначала разгоняется до заправочной скорости. Данный режим практически полностью повторяет таковой в начале цикла смотки, обладает практически идентичными параметрами переходного процесса, и поэтому не представляет интереса для исследования.

В момент времени $t \approx 60$ с начинается разгон до рабочей скорости размотки. В момент времени $t = 63$ с разгон заканчивается, и система переходит в статический режим размотки, подключается контур прямого регулирования натяжения.

Расчётные кривые линейной скорости, окружной скорости и момента показаны на рисунках 51, 52 и 53. Разгон продолжается в течение времени $t = 3$ с. Окружная скорость в начале цикла намотки составляет $-133,3$ об/мин, а в конце $-405,4$ об/мин, что меньше максимальной скорости вращения электродвигателя (658 об/мин).

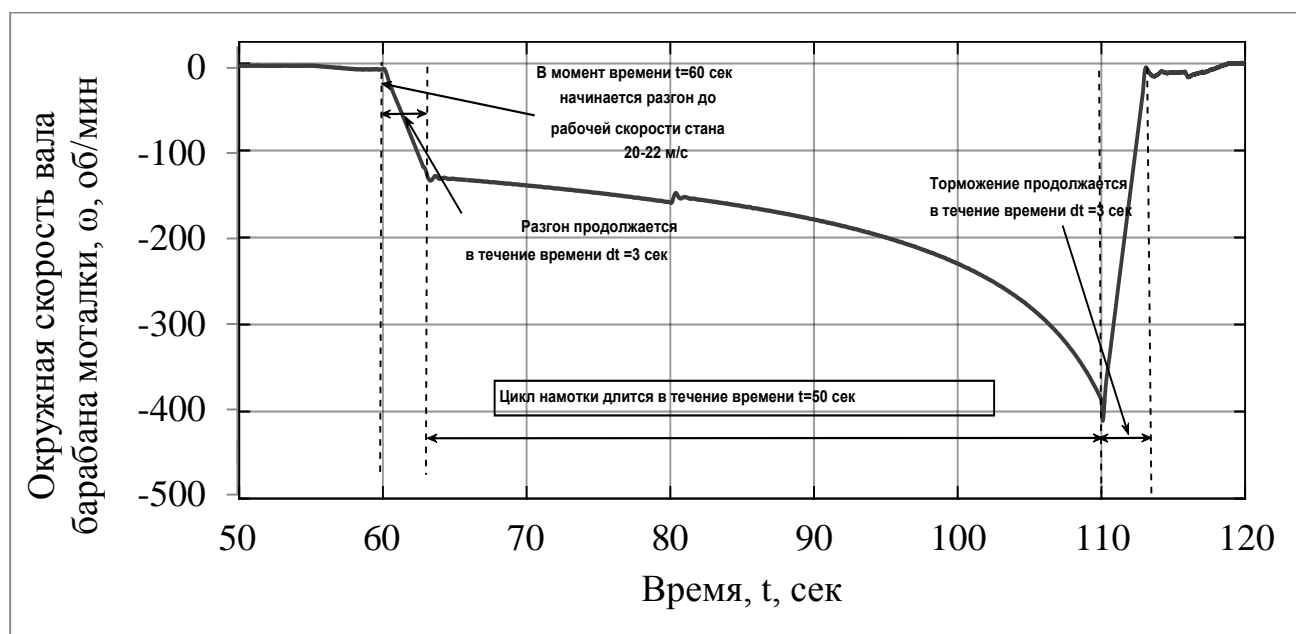


Рисунок 51 - Окружная скорость в цикле размотки

Установившееся значение линейной скорости моталки составляет $V_m = -15$ м/с. Линейная скорость в процессе смотки поддерживается на постоянном уровне. Максимальное значение в процессе разгона составляет $-15,37$ м/с. Перерегулирование составляет $2,47\%$. Установившееся значение линейной скорости клетки составляет $-17,63$ м/с, максимальное значение в динамике вырастает до $17,75$ м/с. Перерегулирование составляет $0,7\%$. В момент времени $t = 110$ с цикл размотки должен завершаться. В этот момент происходит торможение моталки до уровня заправочной скорости $V = 1$ м/с, моталка при этом тормозится до скорости $-0,3561$ м/с, а клетка до $-0,6065$ м/с. При этом, в начале процесса торможения скорость моталки кратковременно вырастает до $-15,8$ м/с. Торможение происходит за время, равное $t = 3$ с. В течение времени $t = 60-110$ с продолжается статический цикл размотки.

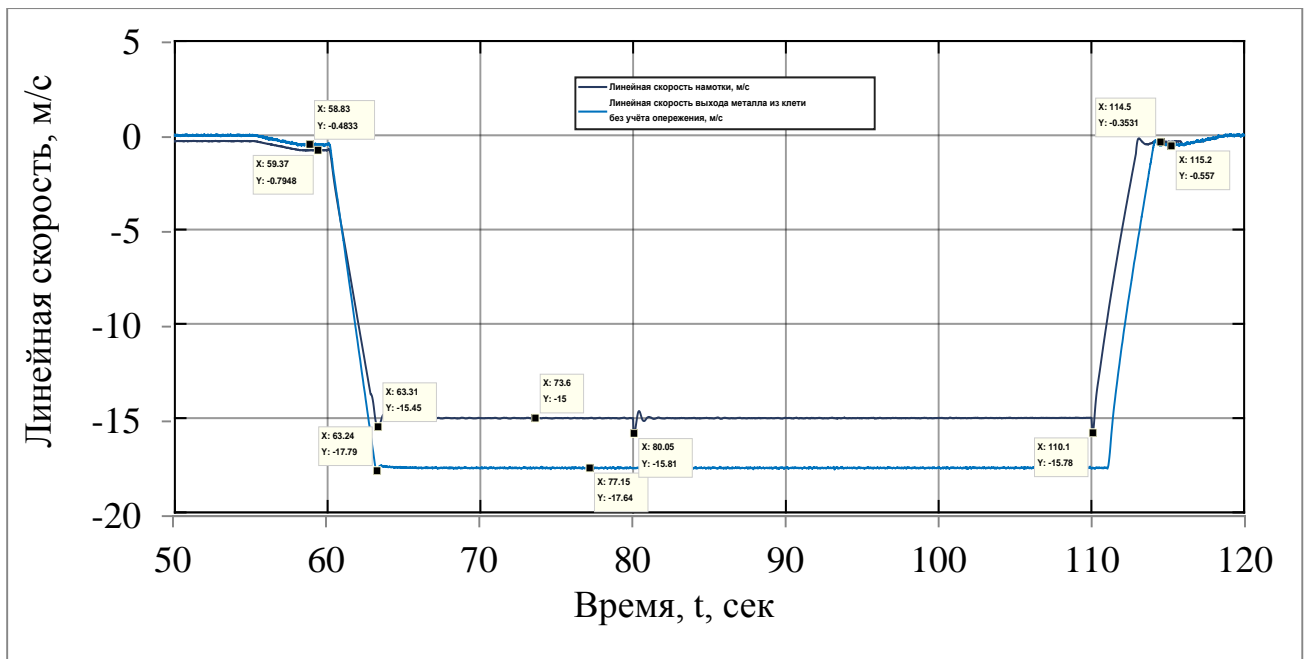


Рисунок 52 - Линейная скорость в цикле размотки

Расчётные кривые момента и натяжения показаны на рисунках ниже. В динамическом режиме момент изменятся в пределах от минимума $-89,4 \text{ кН}\cdot\text{м}$ до максимума $189,8 \text{ кН}\cdot\text{м}$. Затем момент стабилизируется, уменьшаясь с уменьшением радиуса рулона. В режиме торможения момент изменятся в пределах от минимума $-148,1 \text{ кН}\cdot\text{м}$ до $156,1 \text{ кН}\cdot\text{м}$.

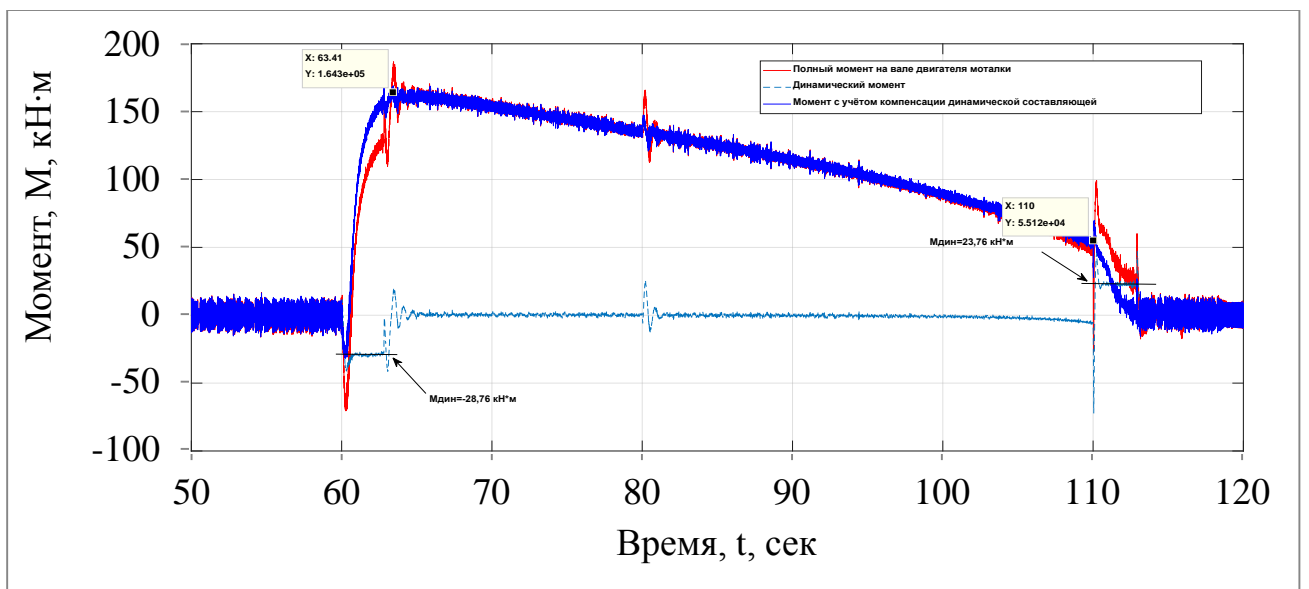


Рисунок 53 - Момент при размотке

Натяжение при этом вырастает со значения $T=0$ до значения $T=150 \text{ кН}$. Для данного случая в режиме разгона натяжение изменяется от максимума $159,3 \text{ кН}$ до минимума $134,7 \text{ кН}$. Установившееся значение составляет 150 кН и поддерживается постоянным на протяжении всего цикла смотки рулона.

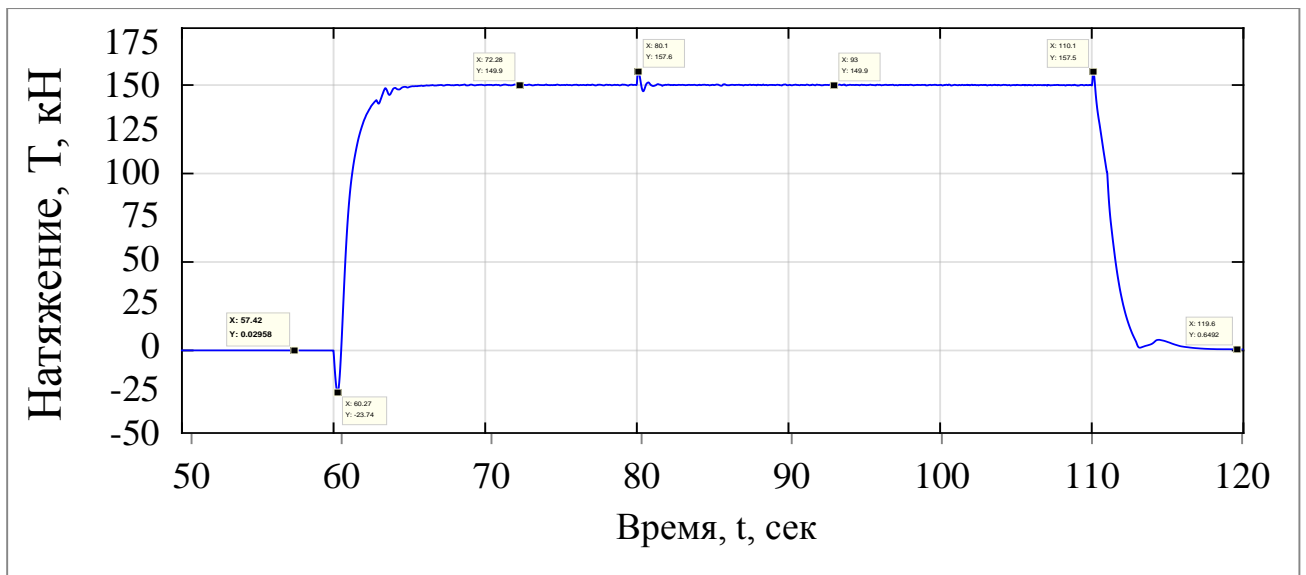


Рисунок 54 - Натяжение при размотке

При этом в начале разгона натяжение кратковременно «проседает» до уровня -22,84 кН. А в цикле торможения возрастает до величины 160 кН. В момент времени $t=80$ сек бросок натяжения при набросе скорости составляет 157,8 кН. В этом режиме, согласно технологии, моталка работает в генераторном режиме. Об этом свидетельствует отрицательная скорость и положительный момент на валу двигателя.

По мере размотки рулона происходит непрерывное уменьшение радиуса рулона и его момента инерции, что отражено на расчётных кривых ниже. После размотки рулона до радиуса $R=R_6=0,305$ м происходит торможение моталки до уровня заправочной скорости $V=-0,3561$ м/с (см. рисунок линейной скорости). Расчётные кривые радиуса и момента инерции показаны на рисунке ниже. Радиус рулона уменьшается с 1,1 м до 0,305 м. Момент инерции уменьшается с 7149 кг·м² до 1650 кг·м².

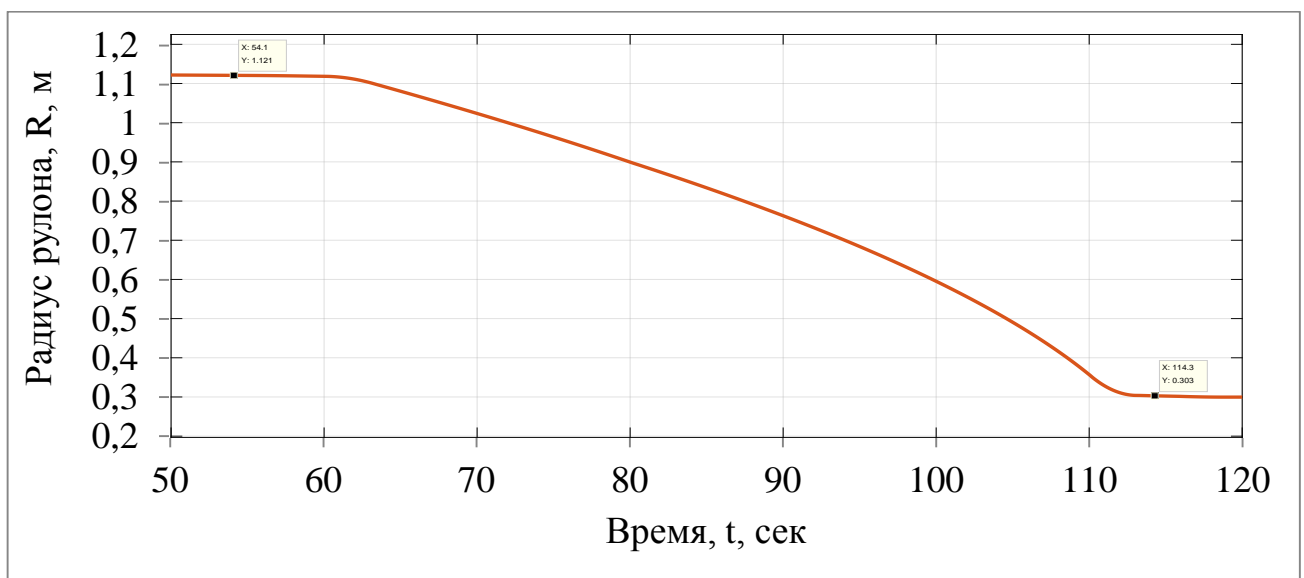


Рисунок 55 - Радиус рулона

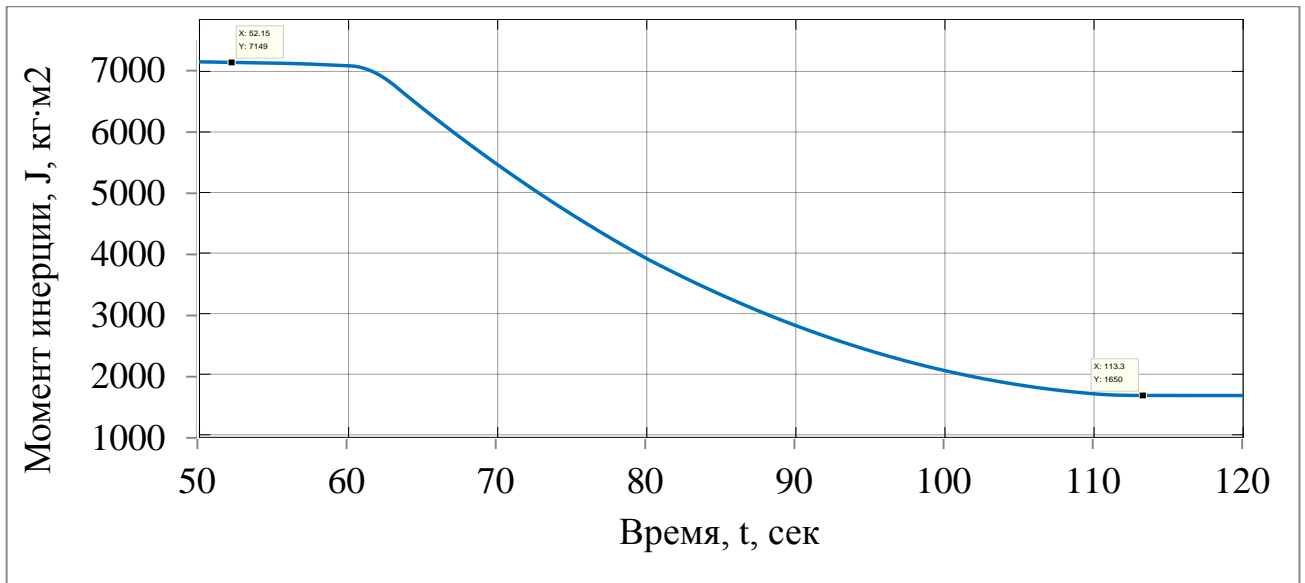


Рисунок 56 - Момент инерции при размотке

В момент времени $t=113$ с происходит торможение моталки. Рулон размотан. После этого опять начинается цикл намотки. Анализ результатов моделирования позволяет сделать вывод о том, что соотношение темпов разгона, а также значений и динамики скоростей клетки и моталки является основным фактором, определяющим величину бросков натяжения и момента в динамических процессах. Следует отметить, что статическая ошибка регулирования скорости в существующей системе полностью отсутствует, благодаря применению ПИ-регуляторов скорости, а для моталки ПИ-регуляторов скорости в косвенном режиме. В режиме прямого регулирования натяжения отклонение линейной скорости от заданной исключена благодаря применению ПИ-регулятора натяжения. Настройка регуляторов осуществлялась таким образом, чтобы обеспечить максимально возможное быстроедействие при как можно более меньшем перерегулировании. Это объясняется тем, что даже небольшое перерегулирование и рассогласование скоростей клетки и моталки осложнит процессы, протекающие при формировании натяжения. Математическая модель рассчитывает заданные значения скоростей клетки и моталки для полос с любыми параметрами. Они поступают в качестве заданий для модели. В ходе намотки измеренные и рассчитанные значения скорости используются моделью для адаптации параметров регуляторов. В процессе адаптации учёту поддаются все переменные параметры электромеханической системы: момент инерции, радиус рулона, длина полосы, скорость клетки и др.

3.2 Создание натяжения покоя в полосе

В ходе экспериментов был проведен ряд опытов по созданию натяжения покоя. На рисунках представлены результаты эксперимента, в котором осуществлялась стабилизация и изменение по заданному закону натяжения покоя полосы в существующей САРН а именно переходные процессы момента M , окружной ско-

рости вала двигателя моталки ω , линейной скорости намотки полосы в рулон V и линейной скорости валков клетки, натяжения полосы T и ошибки стабилизации натяжения ΔT .

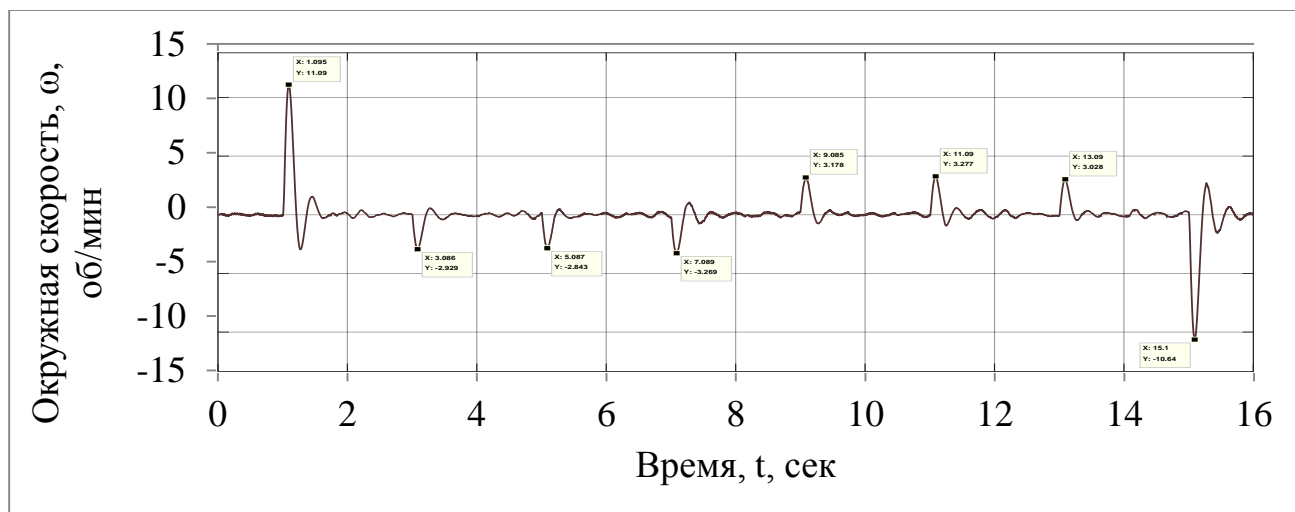


Рисунок 57 - Окружная скорость вала двигателя при остановленной клетке

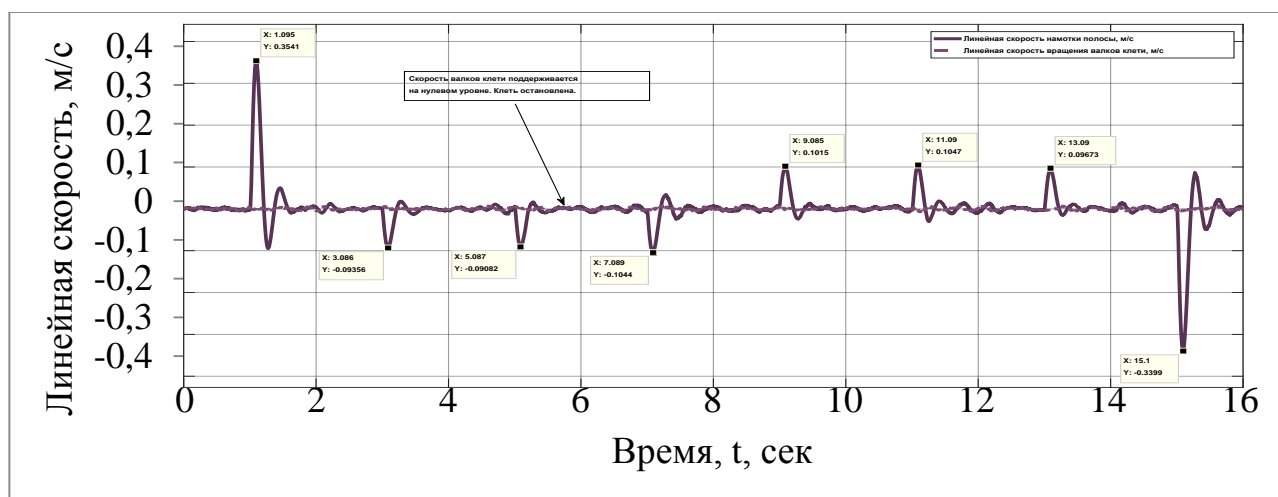


Рисунок 58 - Линейная скорость намотки и валков клетки

Отметим, что при разгоне и торможении ЭП установки наблюдались динамические ошибки, основные причины появления которых в данной системе рассмотрены ранее. Для повышения точности регулирования натяжения и ликвидации динамических ошибок необходимо применять специальные решения.

Из полученных зависимостей видно, что для создания натяжения покоя при остановленной клетке валу моталки необходимо повернуться на определённый угол, создав при этом необходимую для заданного уровня натяжения скорость. В режиме создания натяжения при остановленной клетке модель механических напряжений в полосе представляет собой интегральное звено с параметрами прокатываемой полосы и рулона E, b, h, R, L , определяющими постоянную времени модели. При достижении натяжением заданного уровня скорость моталки снижается до нулевого уровня и поддерживается на нулевом уровне постоянно до момента изменения натяжения покоя при изменении задания.

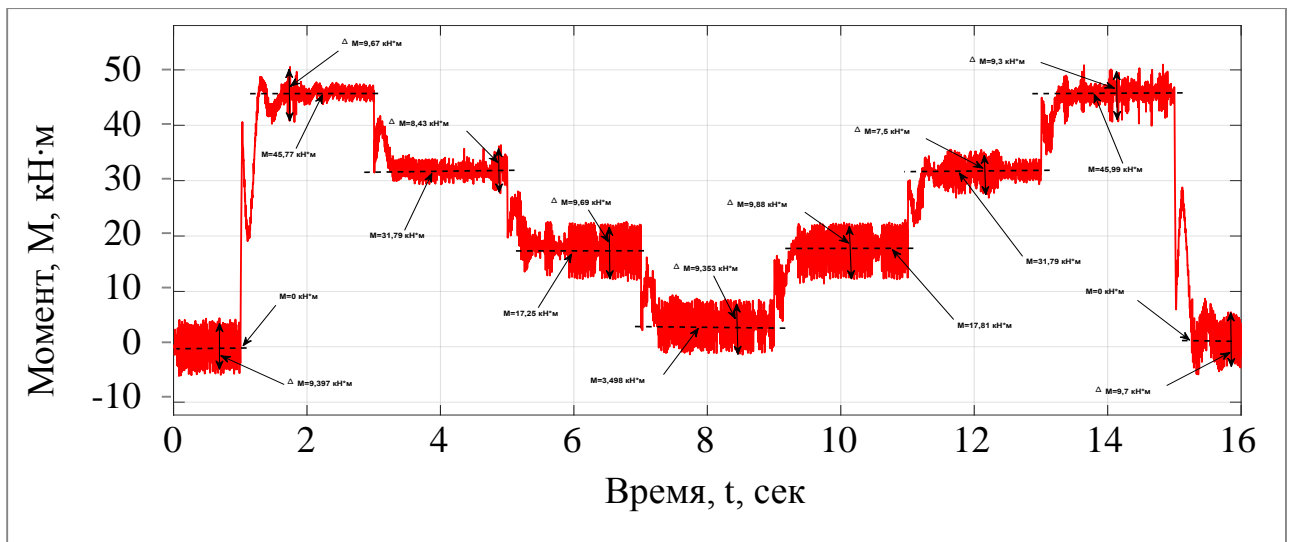


Рисунок 59 - Момент на валу двигателя моталки

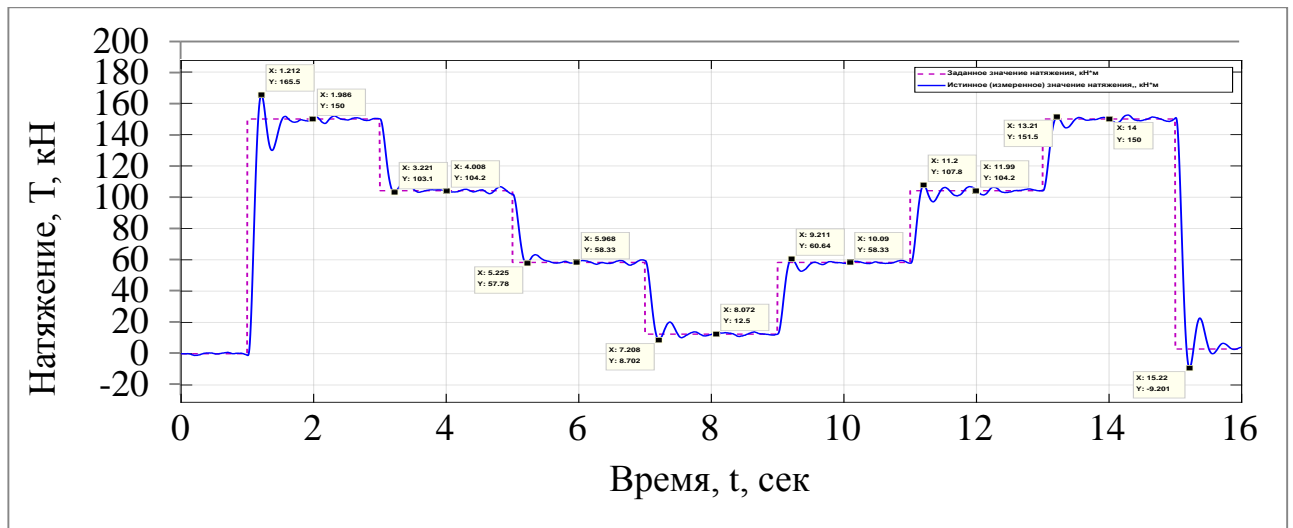


Рисунок 60 - Натяжение при остановленной клетке

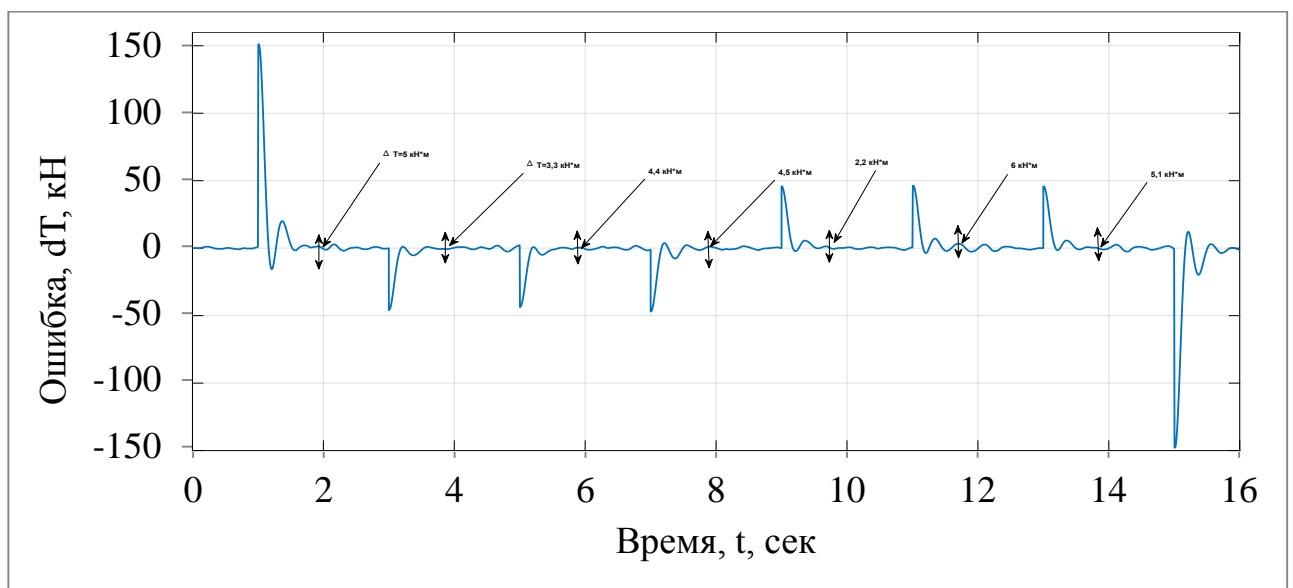


Рисунок 61 - Ошибки стабилизации натяжения

В исследуемой системе при величине размаха колебаний момента в диапазоне 7,5-9,88 кН·м, вызванных пульсациями напряжения силового преобразователя, значения пульсаций натяжения полосы входят в диапазон 2,2-6 кН. В процентном соотношении от заданных уровней натяжения и момента на валу двигателя соответственно полученные значения отклонений составят 10,564-28,087 % для момента, а для натяжения 1,583-12%. Полученные значения показывают, что наиболее сильные отклонения натяжения от заданного уровня проявляются при минимальном натяжении (12,5 кН). Если говорить о параметрах переходного процесса натяжения, то время переходного процесса определяется параметрами прокатываемой полосы, а показатели качества настройкой системы. Так, в рассматриваемой системе перерегулирование для натяжения лежит в диапазоне 0,3-9,63 %. Наибольшее перерегулирование наблюдается при росте натяжения от нулевого уровня до максимального. Следует отметить, что настройка системы наиболее приближена к оптимальной.

3.3 Влияние процессов адаптации на качество регулирования натяжения

Проблема адаптации весьма актуальна, поскольку большинство реальных объектов управления обладают нелинейными характеристиками, которые изменяются в процессе эксплуатации, в то время как управления ведётся, как и в рассматриваемом случае, с помощью линейных ПИ- или ПИД-регуляторов [54,55].

Коэффициенты таких регуляторов часто подобраны оптимально для конкретного состояния объекта, однако при переходе в другие состояния данных значения коэффициентов уже не позволяют получать требуемых по качеству переходных процессов. Это ведёт снижению качества регулирования и к росту энергозатрат на ведение технологического процесса.

Для оценки влияния адаптации параметров регуляторов и влияния на качество управления натяжением необходимо сравнить переходные процессы с- и без прямой адаптации и сделать выводы. В данном конкретном случае проблема решается автоматическим подбором изменяющегося параметра ПИ-регулятора.

Такая система позволяет учитывать нелинейные свойства объекта, не внося значительных изменений в существующую схему управления. Необходимо лишь программно отслеживать и изменять переменный параметр ПИ-регулятора. Это существенно упрощает эксплуатацию такой системы.

В нашем случае смоделирована практическая реализация применительно к моталке и выполнено сравнение результатов её работы с и без адаптации. Были сформированы графики заданного уровня натяжения.

Исходя из технологического регламента и инструкций к работе основных технологических модулей (модуль T400 и контроллер Simadyn D) в динамике основную роль играет косвенный режим, в статике прямой, поэтому в динамике основную роль играют параметры регулятора скорости, а в статике - регулятора натяжения. На рисунке 67 показаны расчётные кривые натяжения при различных вариантах адаптации параметров регуляторов в существующей системе регулирования натяжения.

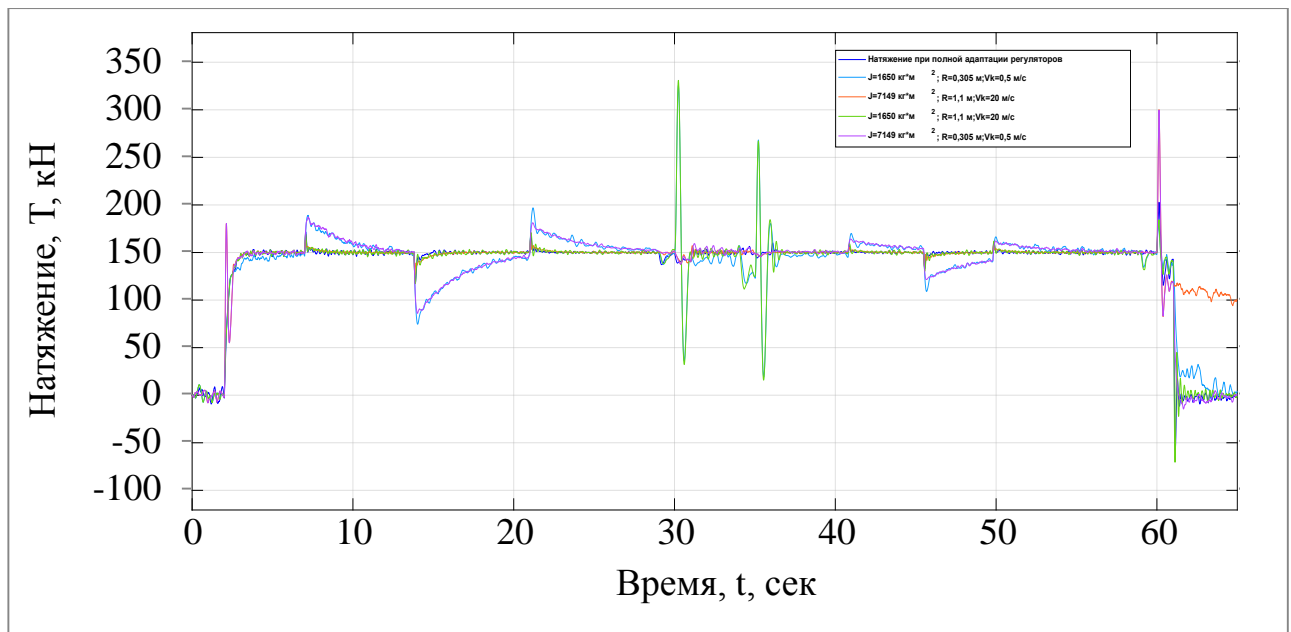


Рисунок 62 - Графики натяжений при различных вариантах адаптации

Рассмотрим пять характерных участков полученной диаграммы: пуск;

- наброс нагрузки при смотке;
- торможение при смотке, останов, и пуск на размотку;
- наброс нагрузки при размотке;
- торможение при размотке.

Все варианты показаны на рисунке выше. Результаты для наглядности занесены в таблицу 2.

Данные, содержащиеся в таблице 2, свидетельствуют о тех или иных отклонениях параметров от запланированных или заданных технологией при отсутствии адаптации. Были смоделированы два граничных случая: параметры мехатронной системы, изменяющиеся в процессе эксплуатации, были приняты постоянными на уровне минимальных и максимальных значений. Так, при минимальных постоянных параметрах момента инерции, скорости клетки, радиуса и т.д. в момент пуска для смотки наблюдается небольшой рост перерегулирования. Броска натяжения в динамике нет, т.к. при таких параметрах регулятора кривая переходного процесса меняется незначительно.

В статическом режиме наблюдается увеличение отклонения натяжения от заданного уровня при набросе нагрузки. Особенно сильно это сказывается на времени возврата на заданный уровень натяжения. В момент торможения в конце смотки рулона время переходного процесса составляет 1,5 сек, при этом перерегулирование возросло до 48%. В цикле размотки отклонение натяжения от заданного уровня при набросе нагрузки так же составляет достаточно большое значение, как и время возврата. При торможении в конце размотки перерегулирование составляет 24%, как в начале цикла.

Если говорить о случае максимальных постоянных параметрах момента инерции, скорости клетки, радиуса и т.д. то перерегулирование при пуске снижается. При этом, значительно изменяется динамика кривой разгона линейной скоро-

сти, что означает значительную разность скоростей моталки и клетки и приводит в итоге к значительному броску натяжения в процессе пуска на намотку. Отклонения натяжения от заданного уровня в цикле смотки обладают аналогичными характеристиками. В этом случае наблюдается самый большой бросок натяжения. Любой из данных бросков может привести к обрыву прокатываемой полосы. Поэтому, необходимы механизмы качественной адаптации в процессе работы.

Таблица 2 – Характеристики процессов при различных вариантах адаптации регуляторов скорости и натяжения

				Режим адаптации		
				Полная адаптация	J=1650 кг·м ² ; R=0,305 м; V _к =0,5 м/с	J=7149 кг·м ² ; R=1.1 м; V _к =20 м/с
Участок	Разгон до скорости намотки	Параметр	Время переходного процесса, сек	0,4	0,4	0,2
			Перерегулирование	9,50%	24%	4%
			Бросок натяжения на участке разгона, кН	Отсутствует	Отсутствует	55,25-180 кН
	Наброс нагрузки при смотке	Параметр	Отношение U/U _{нагр}	1,035	1,035	1,035
			Отклонение, кН	20,30,15 кН	40,60,20 кН	40,60,20 кН
			Время возврата, сек	1-1,5 сек	9-12 сек	2-2,5 сек
	Торможение, стоянка и разгон при натянутой полосе	Параметр	Время переходного процесса, сек	0,5	1,5	0,5
			Перерегулирование	25%	48%	25%
			Максимальное значение диапазон а натяжения, кН	140-157 кН; 142-154 кН	40-162 кН; 15-264 кН	140-157 кН; 142-154 кН
	Наброс нагрузки при размотке	Параметр	Отношение U/U _{нагр}	1,012	1,012	1,012
			Отклонение, кН	6,19,10 кН	32,70,15 кН	19,40,15 кН
			Время возврата, кН	1-1,5 сек	9-12 сек	2-2,5 сек
	Торможение после размотки	Параметр	Время переходного процесса, сек	0,4	0,4	0,2
			Перерегулирование	9,50%	24%	24%
			Бросок натяжения на участке торможения, кН	Отсутствует	Отсутствует	80-300 кН

Указанные выше результаты позволяют сделать вывод о том, что использование подстройки параметров ПИ-регулятора скорости и натяжения для учёта нелинейных свойств объекта управления является простым и достаточно эффективным средством сохранить оптимальность управления во всём диапазоне изменения параметров.

Однако, существующая система адаптации не позволяет учитывать иные типы нелинейностей и не позволит в дальнейшем улучшать качество управления.

3.4 Проверка рассчитанных радиальных усилий по трём критериям устойчивости

Натяжение полосы при смотке её в рулон обеспечивает как качество поверхности листа, так и устойчивость рулонов во всех последующих технологических циклах [8]. При неправильном выборе натяжения после снятия рулона с барабана моталки могут возникнуть дефекты рулона, представленные на рисунке:

- при завышении натяжения - выпучивание внутренних витков;
- при низком уровне натяжения возникает эффект «проседания» рулона, образующийся под действием собственной массы;
- осевой (аксиальный) сдвиг витков в рулоне - телескопичность;
- распушивание рулона.

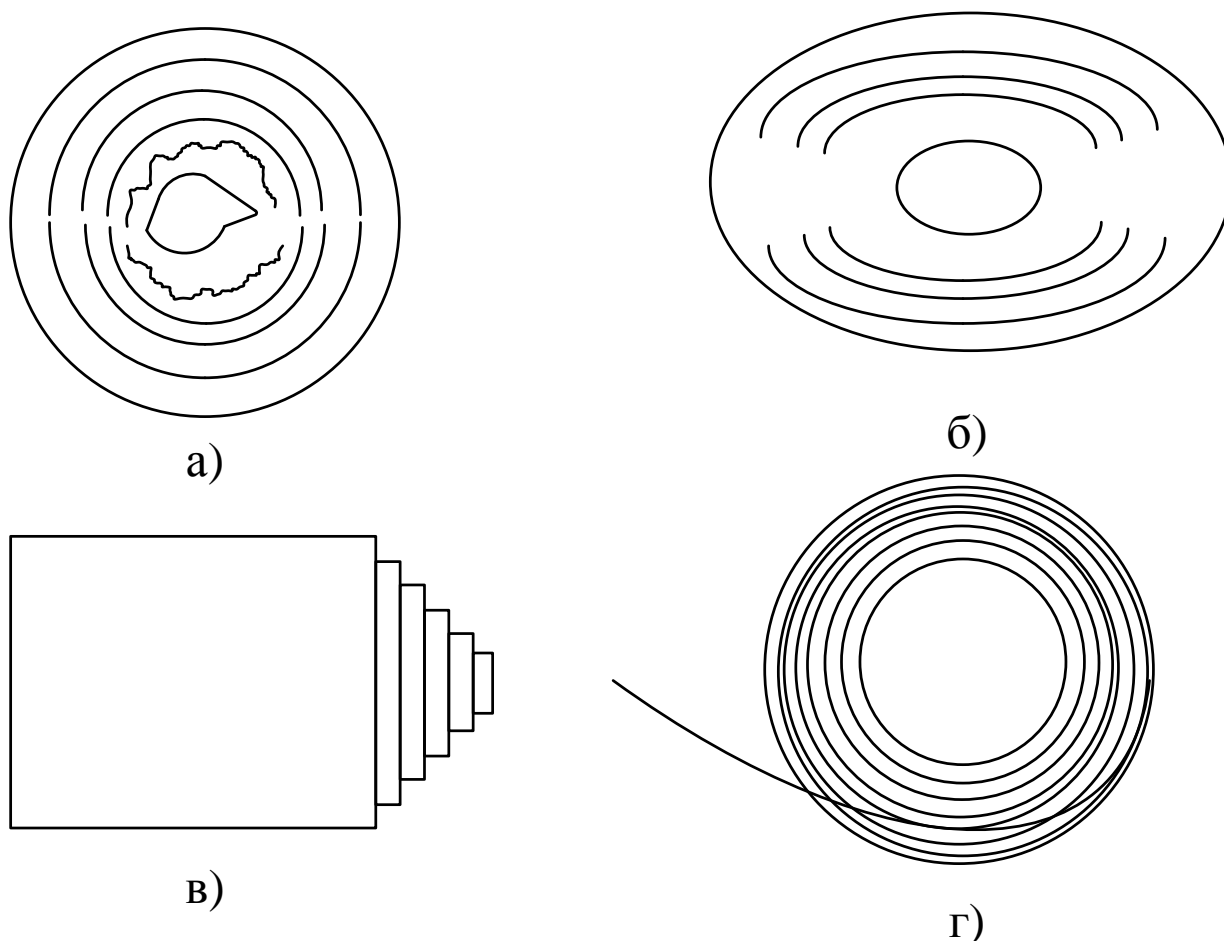


Рисунок 63 - Дефекты рулона: «птичка» а; овальность б); телескопичность в); распушивание г)

Выбор величины натяжения осуществляется на основе комплексного подхода с учётом сортамента полос, состояния их поверхности, массы и габаритов рулонов, физико-технологических свойств материала полосы. При этом в первую

очередь необходимо выполнить теоретический расчёт напряжённо-деформированного состояния в рулоне.

Нахождение точных аналитических зависимостей, связывающих давление между витками с технологическими факторами намотки, связано с большими трудностями.

В работе [8] приводятся удобные для практических расчётов решения задачи при следующих допущениях: витки рассматриваются как концентрические кольца, относительное проскальзывание между витками в рулоне отсутствует, окружное натяжение в пределах одного витка остаётся неизменным и изменяется при переходе от витка к витку; рулон представляет собой сплошное анизотропное тело лишь с упругой деформацией витков.

С использованием этих допущений получена зависимость величины радиальных напряжений в любой точке рулона при отсутствии необходимости снятия рулона с барабана [8]:

$$q(R) = (R^{K_1-1} - R^{K_2-1}) \cdot \frac{\frac{E_t}{E_\sigma} \cdot (1 - \mu_\sigma) \cdot \int_{R_B}^{R_{рул}} \sigma \cdot dR}{R_\sigma^{K_1} \cdot \left[\frac{1 - \mu_r \cdot \mu_t}{K_1 + \mu_t} - \frac{E_t}{E_\sigma} \cdot (1 - \mu_\sigma) \right] - R_\sigma^{K_2} \cdot \left[\frac{1 - \mu_r \cdot \mu_t}{K_2 + \mu_t} - \frac{E_t}{E_\sigma} \cdot (1 - \mu_\sigma) \right]} + \frac{1}{R} \cdot \int_{R_B}^{R_{рул}} \sigma \cdot dR \quad (96)$$

после снятия рулона с барабана моталки:

$$q(R) = \frac{1}{R} \cdot \int_{R_B}^{R_{рул}} \sigma \cdot dR - \frac{(R^{K_2-1} - R^{K_1-1}) \cdot R_{рул}^{K_2-K_1} \cdot \int_{R_B}^{R_{рул}} \sigma \cdot dR}{(R_\sigma^{K_2} - R_\sigma^{K_1}) \cdot R_{рул}^{K_2-K_1}}, \quad (97)$$

где R_σ , $R_{рул}$ и R - радиусы барабана, рулона конечный и текущий соответственно; $\sigma(R)$ - удельное натяжение намотки;

K_1 и K_2 - коэффициенты, вычисляемые в соответствие с зависимостями:

$$K_1 = -\frac{1}{2} \cdot \left(\mu_t - \frac{E_t}{E_\sigma} \cdot \mu_r \right) + \sqrt{\frac{1}{4} \cdot \left(\mu_t - \frac{E_t}{E_\sigma} \cdot \mu_r \right)^2 + \frac{E_t}{E_\sigma}} \quad (98)$$

$$K_2 = -\frac{1}{2} \cdot \left(\mu_t - \frac{E_t}{E_\sigma} \cdot \mu_r \right) - \sqrt{\frac{1}{4} \cdot \left(\mu_t - \frac{E_t}{E_\sigma} \cdot \mu_r \right)^2 + \frac{E_t}{E_\sigma}} \quad (99)$$

где E_t , E_r и E_σ - модули упругости в тангенциальном, радиальном направлениях и барабана соответственно, $E_t = E_r = 20 \cdot 10^9$, $E_\sigma = 200 \cdot 10^9$ [8];

μ_t, μ_r, μ_σ - коэффициенты Пуассона в тангенциальном, радиальном направлениях и барабана соответственно, $\mu_t, \mu_r = 0,17$, $\mu_\sigma = 0,2$ [8];

Набор критериев выбора величины натяжения зависит от дальнейшего использования смотанной полосы в рулон. Рассматриваемый агрегат относится ко второй группе - рулон разматывается с барабана.

Рассчитанное по зависимостям значение радиальных напряжений в рулоне проверяется по четырём критериям, три из которых являются критериями устойчивости.

Критические напряжения, превышение которых приводит к образованию «птички» находятся в соответствии с зависимостью:

$$q < q_{крI} = E \cdot \left(\frac{h}{2 \cdot R_6} \right)^2 \quad (100)$$

Для повышения устойчивости рулона к проседанию необходимо обеспечить максимально возможное сцепление витков между собой, что достигается при повышении натяжения намотки и увеличении шероховатости полосы.

Критерий устойчивости второго рода можно представить следующим образом:

$$q > q_{крII} = \frac{3}{4} \cdot \pi \cdot f \cdot \rho \cdot R_{рул} \cdot \left(1 + \frac{R_6}{R_{рул}} \right), \quad (101)$$

где f - коэффициент трения между витками;

ρ - плотность материала полосы;

Третий вид потери устойчивости - телескопичность, наиболее часто образуется при размотке крупногабаритных рулонов. В этом случае критерий устойчивости, определённый из условия равенства момента сил трения между витками в критическом сечении и динамического момента массы рулона, имеет вид:

$$q > q_{крIII} = \frac{dV}{dt} \cdot \frac{\rho \cdot R_{рул} \cdot \left[\left(\frac{R_{рул}}{R_6} \right)^2 - \left(\frac{R_6}{R_{рул}} \right)^2 \right]}{4 \cdot g \cdot f}, \quad (102)$$

где g - ускорение свободного падения;

В соответствии с зависимостью, наряду с другими факторами, устойчивость к сдвигу витков в рулоне определяется его габаритами и ускорением при размотке, а также коэффициентов трения между витками

Если смотанный рулон не снимается с барабана, а разматывается, то при выборе величины натяжения нет необходимости в проверке по первым двум критериям.

Таким образом, система неравенств, описывающая критерии выбора величины натяжения имеет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} q \ll q_{крI} = E \cdot \left(\frac{h}{2 \cdot R_6} \right)^2 \\ q > q_{крII} = \frac{3}{4} \cdot \pi \cdot f \cdot \rho \cdot R_{рул} \cdot \left(1 + \frac{R_6}{R_{рул}} \right) \\ q > q_{крIII} = \frac{dV}{dt} \cdot \frac{\rho \cdot R_{рул} \cdot \left[\left(\frac{R_{рул}}{R_6} \right)^2 - \left(\frac{R_6}{R_{рул}} \right)^2 \right]}{4 \cdot g \cdot f} \end{array} \right. \quad (103)$$

Проверку рулонов на устойчивость проведён для имеющейся системы регулирования натяжения в цикле смотки и размотки прокатываемой полосы при максимальном уровне натяжения и параметрах прокатываемой полосы. Проверять рулон необходимо по всем критериям.

Для электропривода моталки стана 2000 холодной прокатки ЛПЦ-5 ОАО «ММК» можно рассчитать графики изменения радиального напряжения по толщине рулона при отсутствии необходимости снятия с барабана.

Согласно заданным параметрам, коэффициенты K_1 и K_2 будут равны:

$$K_1 = -\frac{1}{2} \cdot \left(\mu_t - \frac{E_t}{E_6} \cdot \mu_r \right) + \sqrt{\frac{1}{4} \cdot \left(\mu_t - \frac{E_t}{E_6} \cdot \mu_r \right)^2 + \frac{E_t}{E_6}} = 0 + \sqrt{0+1} = 1 \quad (104)$$

$$K_2 = -\frac{1}{2} \cdot \left(\mu_t - \frac{E_t}{E_6} \cdot \mu_r \right) - \sqrt{\frac{1}{4} \cdot \left(\mu_t - \frac{E_t}{E_6} \cdot \mu_r \right)^2 + \frac{E_t}{E_6}} = 0 - \sqrt{0+1} = -1 \quad (105)$$

Тогда выражения с учётом того, что радиус барабана рассматриваемой моталки составляет 0,305 м примут вид:

При неснятии рулона с барабана:

$$q(R)_1 = -\frac{\sigma \cdot (0,985 \cdot R^2 - R + 0,014)}{R^2} \quad (106)$$

При снятии рулона с барабана:

$$q(R)_2 = -\frac{\sigma \cdot (0,714 \cdot R^2 - R + 0,285)}{R^2} \quad (107)$$

На рисунке 64 представлены рассчитанные по полученным значениям графики создаваемых существующим законом регулирования натяжения радиальных усилий в рулоне, чья величина может привести к возникновению тех или иных дефектов. Рассчитанные значения представляют собой радиальные усилия, распределённые по радиусу. Проверка значения с соответствующими критериями позволяет определить возникновению соответствующего дефекта.

рии в данном случае выполняются, т.е. при неснятии рулона с барабана моталки возникновение проседания и телескопичности рулона можно считать несущественным. В случае снятия рулона с барабана моталки дефекты проявляются крайне мало, лишь на небольших диапазонах радиуса рулона. Поскольку проверка проводилась для максимальных значений параметров прокатываемой полосы, можно ожидать, что при сохранении оптимальности управления натяжением для случаев прокатки менее толстых и широких полос при неизменном и заданном на данном этапе технологией закона изменения натяжения расчётные значения критериев и радиальных усилий при изменении натяжения будут пропорционально снижаться таким образом, чтобы минимизировать возникновение дефектов рулона. Однако, стоит заметить, что снижение, например, толщины полосы снижает границу I критерия, что повышает риск возникновения дефекта «птичка» при прокатке более тонких полос. В качестве рекомендации не стоит так же занижать величину ускорения, т.к., исходя из формулы III критерия, это приведёт к снижению границы критерия и риску возникновения телескопичности рулона. Завышать ускорение так же не рекомендуется, но это обусловлено другими причинами, выходящими за рамки данного раздела. Обобщая вышесказанное, можно сделать вывод, что для качественного управления натяжением и сведения к минимуму риска возникновения различных дефектов требуется формировать закон изменения натяжения. Данный вопрос будет рассмотрен в последующих разделах.

Выводы по главе III

1. В данной главе была протестирована созданная на основе структурной декомпозиции технологической схемы математическая модель взаимосвязанной электромеханической системы «клеть-полоса-моталка», включающая модели следующих элементов:

- синхронный двигатель моталки и клетки;
- непосредственные преобразователи частоты и тиристорные возбудители моталки и клетки;
- САРС для клетки и САРС для моталки;
- механизм моталки и модель очага деформации металла в клетке;
- прокатываемая полоса с учётом изменения жёсткости при изменении радиуса рулона.

2. С помощью математического моделирования исследован самый тяжёлый режим работы моталки и режим создания натяжения при остановленной клетке;

3. Рассмотрены вопросы адаптации параметров регуляторов скорости и натяжения при изменении параметров системы в процессе намотки или размотки рулона;

4. Было выявлено, что соотношение темпов разгона, а также значений и динамики скоростей клетки и моталки является основным фактором, определяющим величину бросков натяжения и момента в динамических процессах. При различных вариантах адаптации происходит отклонение настроек переходных про-

цессов и статических режимов от оптимальных, в результате чего в динамике происходят броски и просадки натяжения, а в статике высокое отклонение натяжения от заданного уровня;

5. Существующая система управления на основе линейных ПИ-регуляторов, в принципе, является простой и работоспособной системой. В процессе смотки и размотки дефекты возникают на достаточно небольших участках рулона. Наибольшее проявление имеет дефект «птичка» при неснятии рулона с барабана.

6. Для качественного управления натяжением и сведения к минимуму риска возникновения различных дефектов требуется формировать закон изменения натяжения.

7. Разработанная математическая модель может применяться для дальнейшей работы по исследованию и усовершенствованию электроприводного комплекса САРН.

ГЛАВА IV РАЗРАБОТКА УСОВЕРШЕНСТВОВАННОЙ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ НАТЯЖЕНИЯ НА БАЗЕ НЕЙРОСЕТЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

4.1 Выбор закона регулирования натяжения. Обоснование выбора нейросетевых технологий для управления натяжением

Исследование системы регулирования натяжения в предыдущей главе подтвердило, что при поддержании уровня натяжения постоянным в течение всего процесса смотки полосы в рулон не всегда удаётся выполнить все указанные критерии устойчивости рулонов (см. формулу 103).

Проводя анализ возникающих в рулоне радиальных усилий и возможных в зависимости от их величины дефектов, возникло предположение о том, что создавая закон регулирования натяжения и чётко ему следуя, система регулирования натяжения будет способна формировать в рулоне радиальные напряжения, соответствующие всем трём указанным критериям (формула 103), в результате чего рулон с высокой вероятностью будет намотан или размотан без возникновения дефектов.

Учитывая тот факт, что все эти критерии в той или иной степени опираются на величину радиуса рулона, фактически определяя конкретное значение радиального напряжения в той или иной точке рулона, применяются такие режимы смотки [8], которые предусматривают изменение величины натяжения полосы в функции радиуса наматываемого витка рулона. Стоит отметить, что подобный подход уже давно применяют на практике [8]. Некоторые законы изменения натяжения показаны на рисунке 65:

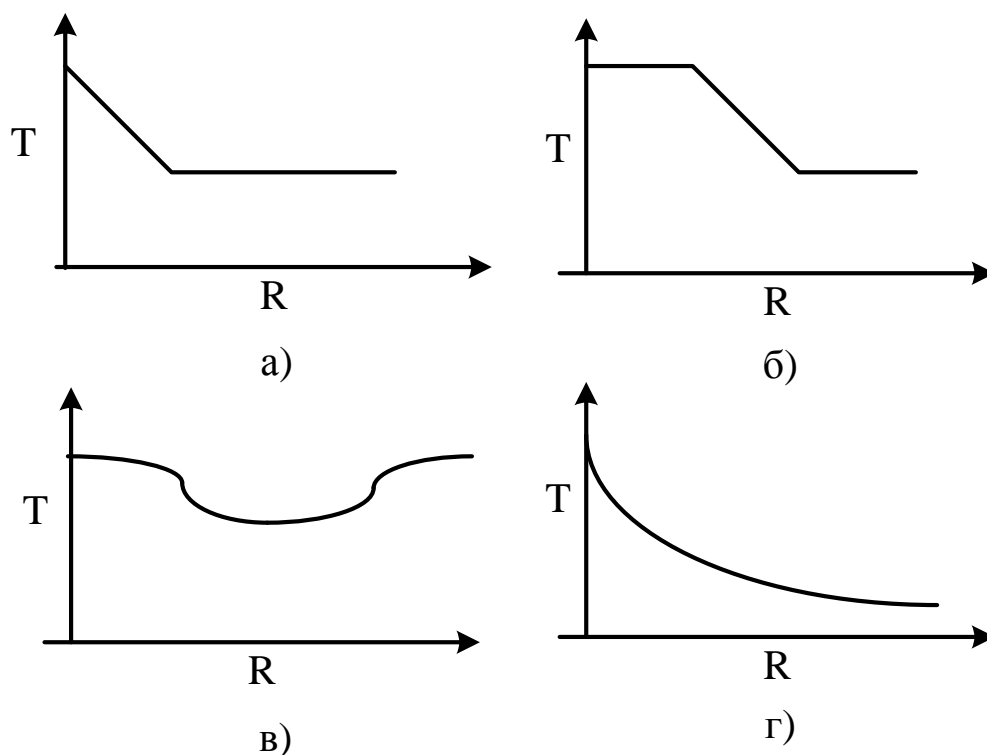


Рисунок 65 - Режимы натяжения при смотке холоднокатанных полос

На рисунке 65 (а) показан способ изменения натяжения в процессе смотки, применяемый для предотвращения потери устойчивости внутренних витков холоднокатанных рулонов. При этом способе первые 5...10 витков сматывают с натяжением в 2...5 раз превышающим технологическое, с последующим снижением до технологического на 50...100 оборотах моталки. С целью выравнивания межвитковых давлений в рулоне применяют способ, представленный на рисунке 65 (б). Способ заключается в том, что при намотке трети рулона натяжения снижают примерно в 1,5...2 раза. Также используют способ, изображённый на рисунке 65 (в), при котором натяжение меняют в течение всего времени намотки рулона с амплитудой примерно 0,1...0,3 от номинальной величины натяжения. В работах [8] рекомендуется синусоидальный закон изменения натяжения в процессе смотки полосы, который можно представить в виде:

$$\sigma_0 = \sigma_{0\text{ном}} \cdot \left[1 + A \cdot \sin \left(2 \cdot \pi \cdot \Omega \cdot \frac{R^2 - R_0^2}{R_{\text{рул}}^2 - R_0^2} + \varphi_0 \right) \right], \quad (108)$$

где σ_0 - удельное натяжение полосы, МПа;

$\sigma_{0\text{ном}}$ - номинальное удельное натяжение

A, Ω, φ_0 - амплитуда, частота и начальная фаза колебаний соответственно;

Выбор параметров смотки, входящих в формулу, производят расчётным путём [8]. Этот способ обеспечивает повышение устойчивости внутренних витков и уменьшение межвиткового давления в рулонах. Необходимо отметить, что в этом случае частота изменения натяжения не должна быть кратной частоте собственных колебаний приводной линии барабана моталки.

Для устранения «изломов» и предотвращения «расползания» рулонов применяют способ намотки, который заключается в изменении удельного натяжения в зависимости от текущего радиуса рулона по закону.

$$\sigma_0(R) = \frac{2.5}{R - 0.2} + 43 \quad (109)$$

Во всех рассмотренных формулах применяется термин «удельное натяжение». Однако момент электродвигателей моталки создаёт полное натяжение в полосе, которое связано с удельным натяжением в соответствии с зависимостью.

$$T = \sigma_\gamma \cdot b \cdot h \cdot k, \quad (110)$$

где σ_γ - предел текучести материала полосы;

h и b - ширина и толщина полосы соответственно;

$k = \sigma_T / \sigma_0$ - коэффициент натяжения;

σ_0 - удельное натяжение.

На основании анализа экспериментальных данных значение коэффициента k определяют по эмпирическим формулам (см. раньше, они были в пункте про проверку на устойчивость).

Таким образом, применение указанных режимов смотки полос, а также правильный выбор величины натяжения, позволяют исключить дефекты рулона и значительно повысить выход годного листа [8].

На основе условий устойчивости и распределения радиальных усилий в рулоне можно получить закон изменения натяжения, предотвращающий возникновение дефектов в рулоне. Рассмотрим формулы 103. Если построить график зависимости трёх данных условий в зависимости от рулона, получим следующий график.

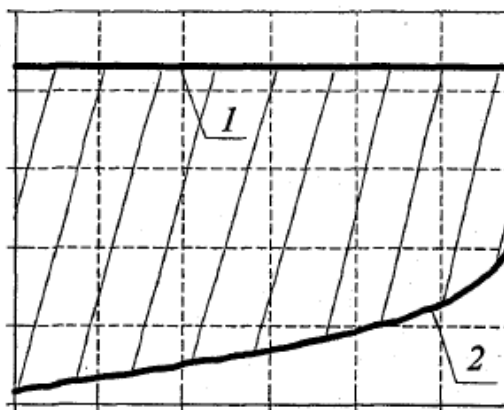


Рисунок 66 - Область допустимых значений радиальных усилий в рулоне при соблюдении условий невозникновения «птички», выпучивания и телескопичности. 1 - верхняя граница, 2 - нижняя.

На рисунке выше заштрихованная область, ограниченная кривыми, представляет собой, в сущности, область допустимых значений радиальных напряжений в рулоне. Любая величина радиального усилия за пределами этой области будет свидетельствовать о возникновении дефекта, определяемого в соответствие с условиями (см. формулу 103).

Из этого следует, что можно задавать произвольный закон изменения натяжения при условии, что создаваемые им радиальные напряжения в рулоне не будут выходить за границу данной области.

Что касается концепции и способа формирования закона, то возможны два случая:

- произвольный закон в рамках ограниченной области, о чём было сказано выше;
- задание граничного закона. Под граничным законом следует подразумевать возможность задания такого закона натяжения, который позволит перемещаться значениям радиальных усилий в рулоне по нижней или верхней границе заданного диапазона, либо между ними, в функции радиуса.

Теперь, когда получено подтверждение того, что в рассматриваемой мехатронной системе есть обоснование применять формирование указанных выше весьма сложных с точки зрения управления законов, необходимо оценить суммарный опыт текущей эксплуатации реверсивных моталок и системы регулирования натяжения.

Первое, на что уже неоднократно было обращено внимание – это изменение параметров при намотке и размотке рулонов в достаточно больших пределах.

Второе – это то, с помощью чего осуществляется движение. В нашем случае в качестве создающего движение компонента выступает синхронный электродвигатель, отличающийся с точки зрения электромеханических процессов, происходящих внутри него, достаточно сложным преобразованием электрической энергии в механическую. С этой точки зрения синхронный электродвигатель – сложный труднолинеаризуемый нелинейный объект.

В качестве обеспечивающего питанием двигателей компонента выступает силовой преобразователь – в нашем случае это непосредственный преобразователь частоты. Принцип работы НПЧ, входящих в его состав силовых тиристоров, а также форма кривой выходного напряжения свидетельствует о сложности и нелинейности процессов, происходящих внутри данного объекта. Для контроля натяжения в данном комплексе предусмотрена система управления, смоделированная и изученная в главе II.

Изучение принципа работы, несмотря на классический подход к синтезу систем управления, обладает такими особенностями, как коррекция входящих в состав настроек регулятора параметров при изменении реальных параметров ОУ. Это было сделано для того, чтобы сохранять принятую оптимальность настроек при изменении параметров объекта. При этом, были выявлены значительные недостатки, присущие классическим подходам.

Линеаризация объекта, фактическое «упрощение», приводит к тому, что истинное представление о возможностях управления таким объектом будет утеряно, а текущее носит только оценочный характер. Проявляется это в том, что управление носит требуемый характер, но оно не лишено влияния различных возмущений, в результате чего взаимное влияние параметров переходных процессов, немного отличающихся от оптимальных, происходящих в клети и моталке, сказывается на качестве регулирования натяжения.

В совокупности мы имеем сложный нелинейный состав таких же сложных и нелинейных подобъектов, объединённых в единый мехатронный комплекс второго уровня, предназначенный для формирования достаточно сложного функционального движения с целью поддержания и формирования определённого технологического параметра (натяжения).

Классические подходы теории управления вполне работоспособны, но содержат недостатки, которые можно устранить. Учитывая характер представленного агрегата, необходимо рассмотреть приложение к требующему адаптации сложному нелинейному и нестационарному агрегату нейросетевых технологий и нейроуправления. Совершенствование системы на базе данных методов позволит повысить качество управления, а саму моталку рассматривать с позиций уже не просто современного электропривода (мехатронного комплекса второго уровня), а мехатронного комплекса третьего, высшего уровня.

С развитием методов искусственного интеллекта, и в частности нейросетевых технологий, появилась возможность заменить применяемые классические методы теории автоматического управления нелинейными, которые при правильно

выбранной структуре нейронной сети и алгоритме обучения могут формировать требуемое выходное управляющее воздействие для объекта регулирования.

С этой целью возможна реализация нелинейного регулятора в виде нейроконтроллера [56], который представляет собой нейронную сеть, функционирующую по принципу биологических нейронов [57].

Повышение качества управления с использованием нейросетевых технологий обосновано следующими положениями [58,59]:

- нейросетевые модели рассматриваются как естественное развитие традиционной теории автоматического управления;

- нейронные сети имеют способность к самообучению, что исключает необходимость иметь большой объем информации для нейроконтроллеров и делает пригодными их для регулирования в условиях существенных неопределенностей;

- реализации эвристических и эмпирических алгоритмов управления;

- нейронные сети могут диагностировать или прогнозировать намечающиеся нарушения технологических процессов и отказы работы технологического оборудования;

- способность переформулировать алгоритмы управления на основе новых данных о параметрах объекта;

- выбор подходящих законов управления на основе текущих оценок состояния объекта;

- объяснение текущей ситуации оператору (пользователю);

Анализ литературы [59,60] показал, что существующие варианты работы нейроконтроллеров можно обобщить в виде трёх вариантов:

- создание нейронной сети, имитирующей некий линейный регулятор;

- синтез оптимального нелинейного нейросетевого регулятора [59];

- создание нелинейного нейросетевого регулятора, обучающегося и работающего в режиме реального времени в соответствии с заданной динамикой.

4.2 Технология искусственных нейронных сетей для систем управления в мехатронике

4.2.1 Средства интеллектуализации мехатронных комплексов

Согласно одному из определений, мехатронная система - единый комплекс электромеханических, электрогидравлических, электронных элементов и средств вычислительной техники, между которыми осуществляется постоянный динамически меняющийся обмен энергией и информацией, объединенный общей системой автоматического управления, обладающей элементами искусственного интеллекта [61].

Рассматриваемая реверсивная моталка и САРН является чисто электромехатронной системой. И если в отличие от классической электромеханики, суть которой, в первую очередь, заключается в объединении механики и электротехники, в мехатронике на первый план выходит именно интеллектуализация, заключаю-

щаяся помимо объединения механики и электроники ещё и в том, что система обладает элементами искусственного интеллекта.

Рассматриваемая мехатронная система является объединением собственно электромеханических компонентов с новейшей силовой электроникой, которые управляются с помощью различных микроконтроллеров, ПК или других вычислительных устройств.

При этом, если речь идёт об усовершенствовании уже имеющихся комплексов, система в истинно мехатронном подходе, несмотря на использование стандартных компонентов, должна строиться как можно более монолитно.

Благодаря интенсивному внедрению последних достижений научно-технического прогресса и новой элементной базы, возникают новые технологии реализации принципов и законов создания искусственного интеллекта.

В соответствии с теорией автоматического управления, под управлением всегда подразумевается специальным образом организованное взаимодействие объекта (ОУ) и устройства управления. Под ОУ подразумевается мехатронное устройство, осуществляющее некий технологический процесс, на которое подаются специально организованные воздействия. Под устройством управления подразумевается устройство, формирующее эти воздействия.

Появление мощных вычислительных машин сказалось и на развитии мехатроники. Довольно скоро выяснилось, что ЭВМ представляет собой универсальный преобразователь информации, способный на нечто большее, чем быть просто сверхбыстродействующим арифмометром. Переориентация применений вычислительных машин на выполнение интеллектуальных алгоритмов послужила главной предпосылкой появления совершенно нового класса мехатронных систем.

В мехатронных комплексах нового поколения именно ЭВМ отводится важнейшая роль. Первые результаты появились благодаря исследованиям, связанным с созданием машинных алгоритмов, имитирующих процессы, происходящие в природе и мозге человека в частности. В дальнейшем это позволило окончательно сформулировать концепцию ИнтСУ, в которых для формирования управляющих воздействий с привлечением средств современных информационных технологий используются механизмы обработки знаний.

Интеллектуализация мехатроники, внедрение интеллектуальных систем в мехатронику, мехатронные и робототехнические системы стоят в ряду новых теоретических и практических проблем. Так, с точки зрения интеллектуализации обучение и адаптация в системах приобретает всё большее значение.

Процессы интеллектуализации можно описывать в терминах нейронных сетей, фаззи-логики, эволюционных (генетических) алгоритмов.

Важнейшим направлением будет нахождение алгоритмов «гибкой» логики при принятии решения и выработки управления. В этом случае эффективным окажется комплексирование робастных, нейро-нечетких и адаптивных алгоритмов в базе знаний интеллектуальных систем [62].

4.2.2 Задача автоматического управления с помощью нейронных сетей

На стыке теории управления и теории нейронных сетей возникло нейрорегулирование, которое является разделом теории интеллектуального управления и является важной составной частью мехатроники. В книге [56] рассматривается концепция нейронных сетей и их применение в системах управления реального времени. Нейроуправлением называется применение полностью определённых нейронных сетей для выработки управляющих воздействий. Нейронные сети способны обучаться в процессе функционирования, поэтому они могут обеспечить относительно простые решения для сложных задач управления. Кроме того, нейронные сети - нелинейные элементы, следовательно, нейронные сети в основе своей являются нелинейными системами, пригодными для решения задач управления, принципиально связанных со сложной динамикой и наличием нелинейных характеристик. Это означает, что интеллектуальное управление является подходящим решением совершенствования системы регулирования натяжения. В инженерном контексте данное управление будет обладать следующими свойствами:

- способность к обучению и адаптивность;
- живучесть;
- «простой» алгоритм управления;

В таблице 1 представлены результаты сравнения классических и интеллектуальных регуляторов, полученные в результате многочисленных исследований для динамических систем [63].

Таблица 4 - Обзор характеристик регуляторов, находящихся в разных условиях

Характеристика	ПИ- и ПИД-законы регулирования	Обобщённый прогнозирующий регулятор	Регулятор на основе нечёткой логики	Нейроуправление
Качество регулирования существенно нелинейным объектом	Плохое	Среднее	Среднее	Лучшее
Вычислительная сложность	Невысокая	Максимальная	Минимальная	Очень Высокая
Качество регулирования при наличии возмущений	Наихудшее	Среднее	Плохое	Лучшее
Качество регулирования при изменении параметров ОУ	Наихудшее	Среднее	Лучшее	Среднее

Из таблицы видно, что нейроуправление лучше всего подходит для управления ОУ с нелинейными характеристиками в условиях возмущений и изменении параметров объекта, но отличается высокой вычислительной сложностью.

Об одной важной функции нейросетевого управления следует упомянуть отдельно. В работе [64] отмечено, что с точки зрения адаптивного управления, важнейшей функцией, выполняемой нейронной сетью, является функция адаптивного регулятора нелинейного многосвязного объекта. Здесь возможны два варианта функционирования нейросети.

В первом варианте работа сети состоит из двух этапов: предварительного обучения сети заданной оптимальной функции управления и этапа воспроизведения аппроксимации этой функции в режиме управления объектом при тех же условиях или близких к ним.

Во втором - нейросеть обучается и одновременно формирует управляющее воздействие на входе исполнительного устройства системы управления. Цель обучения сети и цель управления объектом совпадают, что отражается в задании единой целевой функции для системы (или для подсистемы, которой управляет нейрорегулятор). Сеть обучается в реальном времени, в темпе протекания процессов в системе (режим on-line).

Выбор конкретного подхода к обучению сети зависит от специфики задачи и, более того, определяет конкретный вид алгоритма обучения сети.

Так, например, в отраслях промышленности, где накоплены огромные массивы данных о поведении исследуемого технического объекта более разумным представляется использование off-line техники обучения. С другой стороны, для объектов, технические характеристики которых меняются в процессе эксплуатации, предпочтительным становится применение on-line алгоритмов.

Другими словами, адаптивность нейросетевых структур вследствие их обучения в процессе функционирования, в принципе, позволяет корректировать в реальном времени функцию управления при неконтролируемых изменениях динамических и статических характеристик объекта, используя для этого текущую измерительную информацию о системе и её внешней среде.

В работе [65] сказано, что одной из перспективных технологий позволяющих удовлетворить современным требованиям систем управления (требования по быстродействию, надёжности функционирования, точностным характеристикам, обеспечению высоких показателей качества системы управления, адаптивности при значительной вариации параметров объекта и условий внешней среды), является технология нейронных сетей.

Одним из возможных направлений развития нейроуправления является комплексное применение нейросетевых структур для создания быстродействующих адаптивных нейроподобных структур, как это сделано в [66]. Это позволяет повысить гибкость управления.

4.2.3 Архитектура нейронной сети

Нейронные сети, рассматриваемые как вычислительные системы, преобразующие информацию по образу процессов, происходящих в нервной системе человека и в мозге в частности, в основе своей содержат аналогичную элементарному функциональному звену нервной системы единицу - нейрон.

Обобщённая модель непрерывного нейрона показана на рисунке 67:

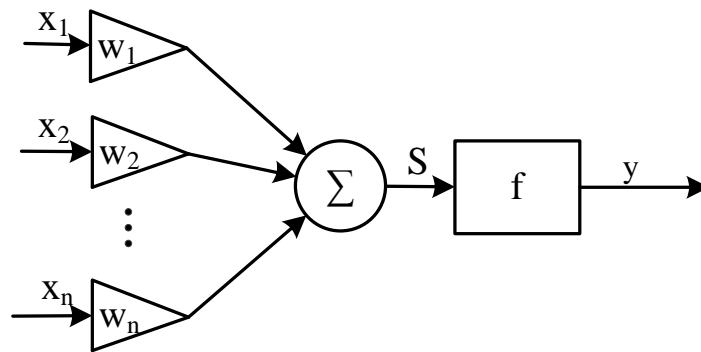


Рисунок 67 - Обобщённая модель непрерывного нейрона (каноническая форма)

На нейрон поступает набор входных сигналов x_1, x_2, \dots, x_n от других нейронов или из окружающей среды. Каждый входной сигнал умножается на соответствующий ему вес связи (w_1-w_n) и поступает на суммирующий блок, обозначенный символом Σ , на выходе которого – взвешенная сумма входных сигналов. Вес может принимать любое вещественное значение и соответствует «силе» синаптической связи. Суммирующий блок складывает алгебраически взвешенные входы и передаёт полученный сигнал на выход, вычисляя, таким образом, уровень активности (суммарное возбуждение) нейрона:

$$S = \sum_{i=1}^m w_i x_i \quad (117)$$

Реакция на выходе нейрона вычисляется путём пропускания сигнала S через нелинейную функцию f . Эта функция называется функцией активации нейрона, физический смысл которой заключается в способе реакции нейрона на взвешенную сумму факторов внешней среды. В качестве функции активации используются следующие функции:

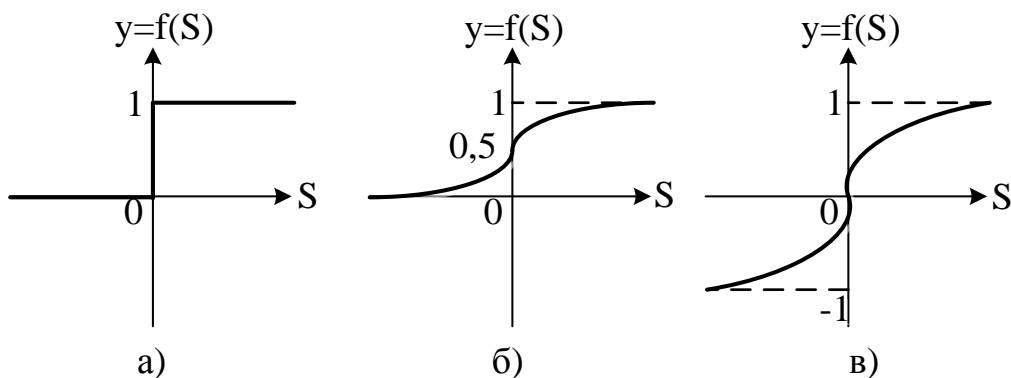


Рисунок 68 - Ступенчатая (а), сигмоидальная (б) функции и гиперболический тангенс (в)

Множество связанных по входам и выходам нейронов составляет искусственную нейронную сеть (ИНС). Подобные структуры позволяют решать широкий круг различных задач. На основе таких элементов строятся базовые многослойные персептроны. Общая схема показана на рисунке 69.

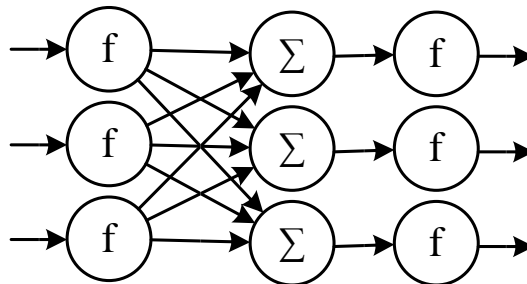


Рисунок 69 - Структурная схема многослойного персептрона.

4.2.3 Базовая структура системы регулирования с нейроконтроллером

В задачах нейруправления для представления мехатронной системы как объекта управления используют модель чёрного ящика, в котором наблюдаемыми являются текущие значения входа, различные измеряемые с помощью датчиков величины, а также вспомогательные расчётные величины (в нашем случае, это может быть радиус рулона, момент инерции и др.).

Для нейросетевого управления натяжением полосы с помощью моталки нет необходимости в получении и использовании точной математической модели. Для управления необходимо лишь иметь возможность подавать сигнал на ОУ и с помощью различных датчиков измерять его состояние. При этом внутреннее состояние объекта считается недоступным для внешнего наблюдения, хотя размерность вектора состояний обычно считается фиксированной [67].

Другими словами, разработчик знает и понимает, как осуществляется процесс создания натяжения во внешнем случае, так и предназначенные для этого процессы внутри самой системы, но при этом совершенно не оперирует точным математическим описанием данных процессов для синтеза САУ. Получение информации о внутренних и внешних процессах называется процедурой идентификации и рассмотрено в главе II.

Динамику поведения объекта управления можно представить в дискретном виде:

$$S(k+1)=\Phi(S(k),u(k)) \quad y(k+1)=\psi(S(k)), \quad (111)$$

где $S(k) \in R^N$ - значение N-мерного вектора состояния объекта на k-м такте;

$u(k) \in R^P$ - значение P-мерного вектора управления;

$y(k+1) \in R^V$ - значение V-мерного выхода объекта управления на такте k+1.

Для оценки вектора состояния динамического объекта может быть использована модель нелинейной авторегрессии с дополнительными входными сигналами (NARX) [67]:

приводной системы НПЧ-СД на базе всего лишь одного нейрорегулятора потребовало бы, во-первых, большое количество данных во входном векторе (как минимум сигналы обратных связей с датчиков токов, датчика скорости и датчика натяжения), а во-вторых задержанные на несколько тактов «прошлые» состояния, соответствующих динамике данных величин. Число данных во входном векторе может достигать 500.

При таком входном векторе, для управления таким объектом потребовалось бы минимум 500 нейронов в скрытом слое (применяемый метод, в котором число нейронов в скрытом слое меньше, чем во входном, именуемый «пирамидой» [67] не всегда эффективен) и несколько нейронов (по числу управляемых величин) в выходном.

Число синаптических связей в таком регуляторе посчитать нетрудно. Минимум для трёхслойного регулятора потребовалось бы $(500 \cdot 500) + 500 \cdot 5 = 252500$ синаптических связей, которые ещё и необходимо корректировать в соответствие с выбранным алгоритмом обучения нейронной сети. Для этого потребовались бы чрезвычайно высокие вычислительные ресурсы. Подобных вещей не стоит отвергать, т.к. вычислительные мощности растут и т.д. Но на данный момент для металлургической отрасли это не является эффективным решением. Для управления системой НПЧ-СД следует выбирать другие подходы и методы, выбор которых будет произведён далее.

4.2.4 Обучение искусственных нейронных сетей, обучающие данные и динамический алгоритм обучения нейрорегулятора в режиме on-line

Для получения требуемых преобразовательных характеристик нейронная сеть должна быть настроена. Процедура настройки заключается в подборе значений весовых коэффициентов для выбранной топологии сети. Такая процедура называется процедурой обучения или тренировкой сети. Существует два вида обучения ИНС:

- самообучение;
- обучение с «учителем».

Обучение ИНС с «учителем» принято называть обучением по эталону. Данный метод применяется в алгоритмах прогнозирования и диагностики, в задачах идентификации и адаптации к требуемому закону изменения управляемой величины. Поскольку в нашем случае таким законом является необходимость регулирования натяжения, остановим свой выбор на обучении ИНС с «учителем». В такой процедуре для каждого воздействия внешней среды параметры ИНС настраиваются таким образом, чтобы получить заданную эталоном реакцию сети, или как можно более близкую к ней.

Для последующей работы в супервизорном режиме (в режиме off-line, называемый ещё фазой «вспоминания») метод обучения с «учителем» требует наличия набора данных, определяющих эталонные пары вход-выход. В качестве примера, для нейросетевого регулятора с управлением по отклонению входом является «входной эталонный сигнал $\langle r_k \rangle$ », а выходом «управляющее воздействие

исходного регулятора « u_k ». Эти данные можно получить при наблюдении за функционированием системы управления или на основе её математической модели. Однако возникает вопрос об оптимальном объёме данных, а также о наилучшем пробном сигнале для обучения ИНС, выступающей после обучения к качеству имитатора обычного регулятора.

В работе [59] этот вопрос исследовался достаточно подробно и мало где больше встречается в таком виде. При настройке любых линейных регуляторов в контуре, как правило, используются детерминированные сигналы уставки ступенчатой или гармонической формы. В то же время, в процессе работы уставка обычно изменяется случайным образом из-за наличия различных помех, т.е. сигнал является стохастическим.

Таким образом, функционирование стандартных обучаемых статических (работающих в супервизорном режиме) многослойных нейронных сетей происходит в два этапа. На первом этапе - этапе процесса обучения в процессе настройки весовых коэффициентов базовых элементов на минимум критерия обучения $Q(e(w,k))$ для заданного входа $r(k)(k=1,N)$ - сеть формирует аппроксимацию $u(k)$ обучающей функции $u^*(k)$ для тех же значений $k=1,N$. На втором этапе - этапе рабочего режима - обученная сеть с постоянными весовыми коэффициентами при поступлении на её входы функции $r(k)$, близкой к $r(k)$ на этапе обучения, практически без ошибок восстанавливает функцию $u(k)$ на выходах базового элемента выходного слоя.

В этом исследовании [59] проводился эксперимент, который позволил определить, какой из перечисленных трех видов формы сигнала обеспечивает обучение НС-Р для наилучшей имитации исходного регулятора. Для этого генерировались три временных ряда одинаковой длительности: прямоугольные импульсы, моногармонический сигнал и цветной шум. По плану эксперимента, уставка выбранного вида подавалась на вход системы управления с исходным принятым в эксперименте ПИД-регулятором, после чего временные ряды ошибки управления $e(t)$ и управляющего воздействия $u(t)$ сохранялись. С их помощью осуществлялась настройка НС-Р. Обученный НС-Р помещался на место исходного ПИД-регулятора в контур управления, т.е. наступал этап контроля качества имитации

Наилучшее качество имитации ПИД-регулятора должно было обеспечивать наилучшее качество управления. В эксперименте наихудшим оказался НС-Р, настроенный на ступенчатой уставке, так как он привел к высокочастотным осцилляциям в системе без каких-либо признаков стабилизации состояния объекта. НС-Р, обученный на гармонической уставке, обеспечил устойчивое управление объектом, однако величина перерегулирования, время переходного процесса и остаточная ошибка при постоянном уровне уставки оставались на достаточно высоком уровне. Наилучший результат показал НС-Р настроенный на стохастической уставке. При чуть меньшем перерегулировании он обеспечил гораздо более короткий переходный процесс и существенно меньшую остаточную ошибку.

Причины значительного преимущества стохастических пробных сигналов перед детерминированными кроются в более равномерном покрытии области

определения функции нейронной сети обучающими точками. Более подробное объяснение данного явления основано на методах функционального анализа и приведено в [59]. Выявлено, что чем больше плотность покрытия рабочей плоскости, тем обучение сети считается наиболее полноценным. Так, уставка-меандр дает 14% покрытия, моногармоническая уставка — 43%, стохастическая — 72%. Для обозначения границ, в пределах которых нейронная сеть функционирует с эффективностью, полученной при обучении вводится термин - область гарантированного качества. Данное понятие легко конкретизируется на случай обучения нейросетевого регулятора: если для системы управления известны диапазоны допустимых (или возможных) уставки и ошибки управления, область гарантированного качества НС-Р должна охватывать как можно большую часть этих диапазонов. Обучающие выборки, полученные на исходной системе управления, должны покрывать как можно большую часть рабочих диапазонов уставки и ошибки управления. Если рабочие диапазоны не заданы, можно оценить параметры распределения уставки, ошибки и накапливать данные в обучающем множестве до тех пор, пока наиболее вероятный диапазон значений не будет заполнен с желаемой плотностью. Плотность обучающих пар должна быть тем выше, чем больше нейронов (весовых коэффициентов) имеется в нейронной сети регулятора.

В контексте ассоциативной памяти работа после обучения называется фазой вспоминания. Для реализации этого свойства в нейросетях вообще, и в статических в частности, необходимо заданий *всей* обучающей выборки объемом N . В случае управления динамическим объектом - это задание оптимального в каком-либо смысле управления $u(k)$ на интервале времени управления $k=1, N$ для формирования ошибки обучения $e_u(k)=u^*(k)-u(k)$. Такой режим работы сети называют автономным (режим off-line).

Как правило многие системы управления динамическими объектами, в силу особенностей технологического процесса, не имеют заранее известной оптимальной траектории управления $u(k)$ и если в качестве ошибки обучения принимается ошибка управления, то необходимое условия обучения такой сети по методу ВР нарушается. Это объясняется тем, что ошибка обучения сети и она же ошибка управления (например, ошибка воспроизведения заданной функции $r(k)$ на выходе инерционного или более сложного объекта) является функцией, развертывающейся на интервале времени $k=0, 1, 2, \dots, N \rightarrow \infty$. Статическая нейронная сеть в данном случае будет вырабатывать сигнал, неспособный за короткий промежуток времени перевести инерционный объект в желаемое состояние, а сама ошибка будет обусловлена инерционным запаздыванием выходного сигнала ОУ.

Для использования многослойной нейросети в реальном масштабе времени необходимо ввести в неё динамику, учитывающую текущие и предыдущие значения измерительной информации. Обсуждение возможных подходов к реализации режима работы нейросети в реальном масштабе времени содержится в обзорной статье [68].

В принципиальном плане применение рекуррентных сетей к обработке временной последовательности является вполне очевидным вариантом. Стандартная архитектура этой динамической по своей природе сети обладает очень мощными

аппроксимирующими свойствами, необходимыми для воспроизведения желаемых функций времени. Во-вторых, динамика может быть введена в алгоритм или алгоритмом обучения нейросети [69]. В этом случае аргумент функции обучения $Q(e(t))$ изменяется согласно уравнениям объекта или его модели. Алгоритм обучения в некотором смысле играет роль «модулирующей» функции нелинейного статического преобразования входной функции $r(t)$, выполняемой сетью [69,70]. Процесс обучения по динамическому алгоритму позволяет объединить в единый процесс настройку весовых коэффициентов сети и формирование функции управления объектом, используя для этого различные измеряемые или рассчитываемые сигналы.

Схему, приведённую на рисунке 71, можно воспринимать как систему воспроизведения входной функции $r(t)$ на выходе динамического объекта управления. В этом случае $r(t)$ может быть эталонной траекторией. Одновременно $r(t)$ будет и обучающей траекторией для нейросети. Обучение сети осуществляется путём настройки векторов весовых коэффициентов $w_j(i)$ нейронов в i -х слоях сети ($i=1, K$) с учётом условия минимума критерия обучения $Q=(e(w_j(i), t))$. В результате с момента t_0 формируется управляющий сигнал $u(t)$, при котором $y(t) \rightarrow (t=t_1)r(t)$. Единичный интервал непосредственной работы, определяемый временем квантования, составляет однократный цикл движения сети к состоянию обученности и одновременно это интервал времени, за который ИНС вырабатывает такой сигнал, гарантированно приводящий ОУ в заданное состояние с минимально возможной ошибкой в замкнутой нейросетевой системе управления динамическим объектом.

Любой метод определения настроечных параметров требует решения задачи оптимизации. В первом случае это минимизация разбаланса выходов эталона и ИНС. Во втором это минимизация какого либо критерия (интегральный критерий, дисперсия, ошибка по фазовым координатам).

Задача оптимизации параметров ИНС является многоэкстремальной и требует специальных приёмов для её решения. В настоящее время интенсивно развиваются генетические алгоритмы оптимизации [71].

Как показывают многократные компьютерные эксперименты, обучение РНС может быть успешно выполнено с использованием классического градиентного алгоритма под названием «алгоритм обратного распространения ошибки».

Обозначим через $U^l=(u_1^l, u_2^l, \dots, u_{n_k}^l)^T$ набор выходных сигналов нейронов l -о слоя; $W^l=||w_{ij}^l||$ - матрицу весов синаптических связей, соединяющих нейроны l -о слоя с нейронами $(l+1)$ -го слоя, ($l=1, 2, \dots, N-1$).

Тогда работа нейронной сети описывается следующими уравнениями:

Для входного слоя ($l=1$):

$U^l=X$, где $X=(x_1, x_2, \dots, x_n)$ - входной вектор;

Для 1-го скрытого слоя ($l=2$):

$$u_j^2=f\left(\sum_{i=1}^n w_{ij}^1 \cdot u_i^1\right), j=1, 2, \dots, n_2; \quad (113)$$

Для второго скрытого слоя ($l=3$):

$$u_j^3 = f\left(\sum_{i=1}^{n_2} w_{ij}^2 \cdot u_i^2\right), j=1, 2, \dots, n_3; \quad (114)$$

Для выходного слоя ($l=N$):

$$u_j = f\left(\sum_{i=1}^{n_{N-1}} w_{ij}^{N-1} \cdot u_i^{N-1}\right), j=1, 2, \dots, m; \quad (115)$$

где n_l - число нейронов l -го слоя ($n_1=n$; $n_N=m$);

N - число слоёв НС;

$f(\cdot)$ - функция активации нейрона.

Предполагается, что, выбрав соответствующим образом веса синаптических связей w_{ij}^l ($l=1, 2, \dots, N-1$), можно обеспечить желаемый характеристики «вход-выход». Данная процедура носит название обучения сети и состоит в выполнении следующих шагов:

1. инициализируются случайным образом веса синаптических связей НС. На практике в качестве начальных значений w_{ij}^l обычно принимают малые числа, например $[-0,05; 0,05]$;

2. на входы НС поочерёдно подаются входные векторы X^r из обучающей выборки $\Omega = \{(X^1, D^1); (X^2, D^2); \dots; (X^R, D^R)\}$. Здесь $D^r = (d_1^r, d_2^r, \dots, d_m^r)^T$ - желаемая реакция (вектор «эталон») НС в ответ на входной вектор $X^r = (x_1^r, x_2^r, \dots, x_n^r)^T$ в r -м эксперименте;

3. вычисляется реакция $Y^r = (y_1^r, y_2^r, \dots, y_m^r)^T$ нейронной сети на соответствующий входной вектор X^r ;

4. вычисляется вектор ошибки сети $\varepsilon^r = D^r - Y^r$, т.е. разность между желаемым и фактическим значением вектора выходов НС;

5. вычисляется суммарная квадратичная ошибка:

$$E = \frac{1}{2} \sum_{r=1}^R \sum_{j=1}^m (d_j^r - y_j^r)^2 \quad (116)$$

подсчитываемая по всем выходам НС и для всех её входных образов;

6. производится изменение весов НС в направлении уменьшения ошибки обучения ($E \rightarrow \min$), после чего переход к шагу 2.

Наиболее простой способ настройки весов НС - использование градиентного алгоритма минимизации ошибки E

$$w_{ij}^l(k) = w_{ij}^l(k-1) + \Delta w_{ij}^l(k-1) = w_{ij}^l(k-1) - \alpha \cdot \left[\frac{\partial E}{\partial w_{ij}^l(k)} \right], \quad (l=1, 2, \dots, N-1), \quad (117)$$

где $k=0,1,2,\dots$ - номер итерации (цикла обучения);

α - параметр, определяющий скорость обучения сети (обычно, $0 < \alpha < 1$, но может быть и больше).

На практике процесс обучения требует достаточно много итераций, причём длительность процесса обучения тем больше, чем выше сложность НС, т.е. чем больше число входящих в неё нейронов и связей между ними. Учитывая, что число таких связей (а значит и число настраиваемых весовых коэффициентов) может достигать достаточно большого количества, необходимо использование специальных алгоритмов обучения.

Одним из таких алгоритмов, получившим широкое распространение в задачах построения НС, является алгоритм обратного распространения (Back Propagation Algorithm). Основными преимуществами данного алгоритма состоит в том, что подстройка весов синаптических связей осуществляется послойно, используя достаточно простые математические выкладки и, что самое главное, быстро, что подходит для обучения в реальном времени. Для вычисления частных производных $\partial E / \partial W_{ij}^l$ можно воспользоваться правилом дифференцирования сложной функции. Полагая для простоты, что обучающая выборка состоит из одной пары (X,D), т.е. $R=1$, можно записать:

Для выходного слоя:

$$\frac{\partial E}{\partial W_{ij}^{N-1}} = -(d_j - y_j) \cdot f_j' \cdot u_j^{N-1} \quad (118)$$

Для последнего скрытого слоя:

$$\frac{\partial E}{\partial W_{ij}^{N-2}} = - \sum_1 [(d_j - y_j) \cdot f_j' \cdot w_{ij}^{N-1}] \cdot f_1' \cdot u_{ij}^{N-2} \quad (119)$$

Если в качестве функции активации нейрона используется сигмоидная функция $f(s) = 1 / (1 + \exp(-s))$, то получаем, что $f_j' = f_j(1 - f_j)$ и выражения принимают вид

Для выходного слоя:

$$\delta_j^{N-1} = (d_j - y_j) \cdot y_j \cdot (1 - y_j); \quad \frac{\partial E}{\partial w_{ij}^{N-1}} = \delta_j^{N-1} \cdot u_{ij}^{N-1} \quad (120)$$

Для последнего скрытого слоя:

$$\delta_j^{N-2} = \sum_e [\delta_e^{N-1} w_{je}^{N-1}] \cdot u_j^{N-1} \cdot (1 - u_j^{N-1}); \quad \frac{\partial E}{\partial w_{ij}^{N-2}} = \delta_j^{N-2} \cdot u_{ij}^{N-2} \quad (121)$$

Для первого скрытого слоя:

$$\delta_j^1 = \sum_e [\delta_e^2 w_{je}^2] \cdot u_j^2 \cdot (1 - u_j^2); \frac{\partial E}{\partial w_{ij}^1} = \delta_j^1 \cdot u_{ij}^1 \quad (122)$$

Таким образом, приращение силы синаптической связи Δw_{ij}^1 должно быть пропорционально произведению сигнала ошибки 1-го слоя δ_j^1 и выходного сигнала 1-о слоя u_{ij}^1 . Вычисляя δ_j^1 и Δw_{ij}^1 слой за слоем по направлению ко входу сети, можно скорректировать весовые коэффициенты НС.

Вместе с тем, несмотря на кажущуюся простоту реализации алгоритма ВР, его применение встречается с рядом «подводных камней».

1. При малых значениях скорости обучения процесс обучения обычно очень медленно сходится, что особенно критично при управлении инерционными объектами с изменяющимися во времени параметрами. Чрезмерное увеличение скорости обучения может привести к ухудшению сходимости а в некоторых случаях и к неустойчивости системы.

2. Как и любой градиентный метод оптимизации, ВР может встречаться с такими серьёзными затруднениями, как наличие локальных минимумов;

3. Скорость сходимости существенно зависит от выбора начальных условий (при правильно подобранном коэффициенте обучения и малых начальных значений весовых коэффициентов не имеет существенности).

Выход из данной ситуации - в использовании более совершенных алгоритмов оптимизации, обеспечивающих повышение качество процесса обучения. В последнее время одним из таких алгоритмов стал генетический алгоритм, примеры применения которого для адаптации регуляторов показаны в [71]. Совокупность генетического алгоритма и алгоритма ВР сейчас называется гибридным алгоритмом обучения, в котором алгоритм ВР выступает в качестве ускорителя работы ГА, становится одним из самых перспективных алгоритмов оптимизации при построении мехатронных систем.

Ниже будет произведён выбор структуры управления и показаны результаты, полученные от использования РНС для реализации двухуровневого многомодульного нейрорууправления с внешним уровнем с эталонной моделью. Рассматривается система прямого регулирования натяжения реверсивной моталки стана холодной прокатки 2000.

Структура на рисунке 71 известна как схема «инверсного» обучения или «инверсного адаптивного управления без введения жёсткой обратной связи». Нейросеть, обученная на достижение нулевой ошибки $e_y(t)$ ведёт себя как инверсная модель объекта управления. А такое базовое соединение сети с динамическим объектам именуется в литературе обобщённым настраиваемым объектом (ОНО). Уравнение обобщённого настраиваемого объекта объединяет уравнение собственно объекта управления и уравнение нейросети. Алгоритм обучения использует метод ВР, в вычислительной схеме которого применяется градиент скорости изменения функционала качества обучения. Алгоритм обеспечивает работу нейросети в режиме реального времени и может быть использован при разработке нейросетевых адаптивных систем управления. Пример применения вышеописанного подхода дан в [72].

4.3 Использование нейросетевых технологий применительно к рассматриваемой мехатронной системе

4.3.1 Применение элементов управления с эталонной моделью и многомодульного подхода к созданию многомодульной системы нейроуправления с внешним регулятором, обучающимся по эталонному процессу в реальном времени

Интеллектуализация мехатронных и робототехнических систем подразумевает построение технических систем, способных выполнять функции, которые, если бы их выполнял человек, считались бы интеллектуальными, т.е. требовали бы от человека его естественного интеллекта. Для таких объектов и систем характерны следующие признаки [1,2]:

- сложность формального описания объекта и задач управления с учетом погрешностей необходимых вычислений и измерений;
- нечеткость целей функционирования и задач управления;
- нестационарность параметров объекта и условий функционирования;
- невозпроизводимость поведения объектов и систем при повторных испытаниях;
- наличие случайных воздействий внешней среды;
- искажение поступающей входной информации в каналах дистанционной передачи данных.

Поэтому интеллектуализация сложных (мехатронных) систем осуществляется путем использования широкого класса физических эффектов для разработки встроенных сенсорных, измерительно-информационных систем и приводов различной физической природы, а также создания интеллектуального человеко-машинного интерфейса.

Однако основным направлением интеллектуализации является создание интеллектуальных систем управления, априорно способных функционировать в условиях неполноты и нечёткости исходной информации, неопределенности внешних возмущений и среды функционирования за счет работы со специальными знаниями в той или иной предметной области.

Интеллектуальные системы управления мехатронными системами базируются на двух основных идеях: управление на основе анализа внешних ситуаций (ситуационное управление) и использование современных информационных технологий обработки знаний.

Таким образом, практическая реализация концепции ситуационного управления на основе современных интеллектуальных технологий предполагает наличие развернутой базы знаний о принципах построения и целях функционирования системы, специфике использования различных алгоритмов, особенностях исполнительных механизмов и управляемого объекта. В этом случае классификационный анализ имеющихся знаний с учетом текущих показаний измерительно-информационных средств должен обеспечивать параметрическую и структурную

настройку управляющих алгоритмов, модификацию программы достижения целей управления или их коррекцию.

Суть метода ситуационного управления состоит в том, что каждому классу ситуаций, возникновение которых считается допустимым в процессе функционирования системы, ставится в соответствие некоторое решение по управлению (управляющее воздействие, программно-алгоритмическая управляющая процедура и т. д.). Тогда сложившаяся ситуация, определяемая текущим состоянием как самого объекта, так и его внешней среды и идентифицируемая с помощью измерительно-информационных средств, может быть отнесена к некоторому классу, для которого требуется управление уже считается известным.

Важно отметить, что главная архитектурная особенность, которая отличает интеллектуальную систему управления от построенной по «традиционной» схеме, связана с подключением механизмов хранения и обработки знаний для реализации способностей по выполнению требуемых функций в неполнозаданных (или неопределенных) условиях при случайном характере внешних возмущений. К возмущениям подобного рода могут относиться непредусмотренное изменение целей, эксплуатационных характеристик системы и объекта управления, параметров внешней среды и т. д. Кроме того, состав системы при необходимости дополняется средствами самообучения, обеспечивающими обобщение накапливаемого опыта, и на этой основе – пополнение знаний.

В общем случае объект управления может иметь достаточно сложную конструкцию, включающую в свой состав ряд функционально-подчиненных подсистем. Иерархия их подчинения обуславливает декомпозицию исходных целей и задач управления на рекурсивную последовательность вложенных составляющих. В конечном итоге такое разделение предполагает многоуровневую организацию системы управления, обладающей развитыми интеллектуальными возможностями по анализу и распознаванию обстановки, формированию стратегии целесообразного поведения, планированию последовательности действий, а также синтезу исполнительных законов, удовлетворяющих заданным показателям качества. Структура интеллектуальной системы управления сложным динамическим объектом должна соответствовать иерархическому принципу построения и включать стратегический, тактический и исполнительный (приводной) уровни, а также комплекс необходимых измерительно-информационных средств (рис. 4.39).

Корректность замыкания отдельных контуров иерархии управления определяется тем составом функциональных элементов, которые обеспечивают требуемую адекватность информационной поддержки в процессе сбора и обобщения сенсорных данных о текущем состоянии и воздействиях внешнего мира. Таким образом, организация каждого уровня интеллектуального управления предполагает использование уникальной совокупности собственных моделей представления знаний, информационной поддержки, описания контролируемого объекта и т.д.

Следует подчеркнуть, что принцип иерархического построения систем управления сложными динамическими объектами сам по себе далеко не оригинален. Так, например, в целом ряде монографий, опубликованных на рубеже конца

70-х начала 80-х гг., подобная идея неоднократно обсуждалась применительно к проблемам управления многофункциональными роботами вообще и обладающими «элементами искусственного интеллекта» в частности. В последнем случае интеллектуальные функции, которые ограничивались задачами «восприятия, распознавания и моделирования обстановки» с последующим «принятием решения на выполнение той или иной операции», концентрировались исключительно на «высшем» уровне иерархии, венчающем исполнительную, тактическую и стратегическую ступени управления.

В качестве примера источников, где данный подход рассматривался на практике, можно рассмотреть [73], где электромехатронная система разделяется на два вида - электрическая часть и механическая.

Обобщая данный подход на систему НПЧ-СД, можно выделить две подсистемы - управление током двигателя, а к механике - управления угловой скоростью вращения вала двигателя и механическими напряжениями в полосе (натяжением). Учитывая опыт эксплуатации и структуру существующей системы, можно придать внешнему регулятору свойства регулирования скорости и свойства регулирования натяжения в зависимости от требований и режима работы.

В этом случае система управления работает в двух режимах: в режиме АРН внешний регулятор управляет натяжением, а объектом управления для него является «вал барабана-радиус-линейная скорость-механические напряжения в полосе (натяжение)»; в режиме АРС внешний регулятор управляет скоростью вращения вала барабана моталки, регулируя, таким образом, натяжение косвенным способом (при необходимости), либо осуществляя управление скоростью вращения в аварийных режимах (форсированный останов при обрыве полосы).

Таким образом, используя многомодульный нейросетевой подход, можно представить двухуровневую систему - внешний регулятор механики и внутренний электрических параметров.

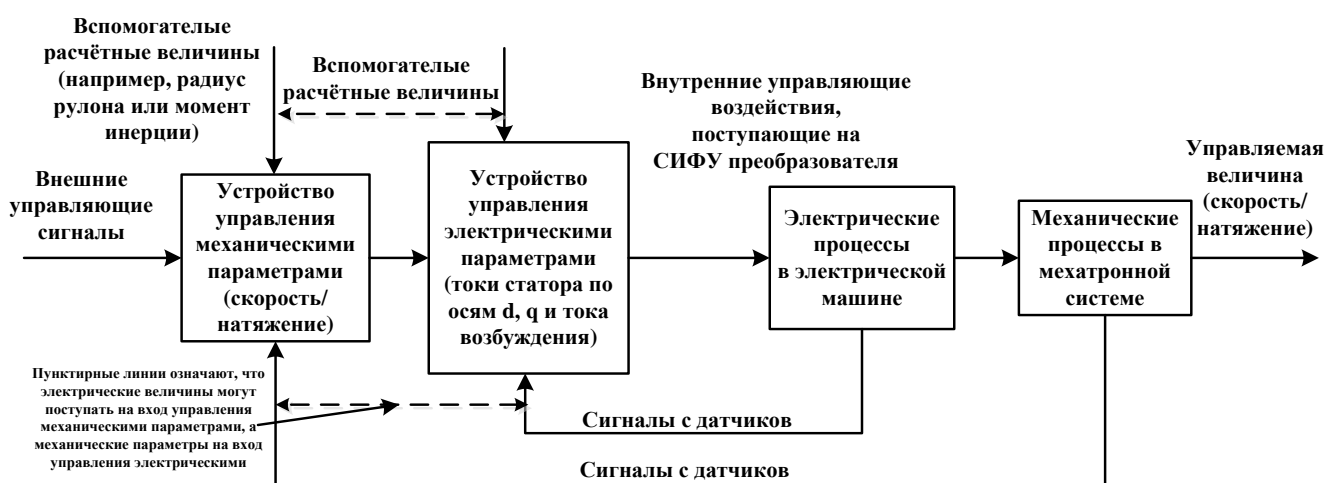


Рисунок 72 - Структурная декомпозиция на модули в электромехатронных системах

раметров нейросетевого регулятора в замкнутой системе управления динамическим объектом остаётся во многом открытой, решение многих вопросов не найдено, а создание и параметрирование подобных элементов базируется на большом количестве экспериментов с архитектурой и топологией НС. В нейрорулении это крупная научная проблема, осложнённая наличием большого количества эмпирических методик, эффективность которых не всегда подтверждается. Метод проб и ошибок при параметрировании нейрорегуляторов является их недостатком.

Если ещё раз рассмотреть структуру нейронной сети на рисунке 70 и оценить преобразование сигнала через нейросетевую структуру, то можно легко заметить, что это большое количество однообразных алгебраических операций, таких как вычисление значения функции активации, умножение сигнала на весовой коэффициент, сумма взвешенных входных для нейрона сигналов и т.д. Реализовать всё вполне возможно, но крайне неудобно. Поэтому, в целях повышения эффективности исследований необходимо применить аппарат матричных вычислений. Чтобы понять его применимость, необходимо выделить структурную единицу регулятора, а именно слой с входящими в него компонентами.

В каждом случае нейронная модель - сеть с произвольным количеством слоёв, с прямой передачей сигнала, имеющая линии задержек для формирования вектора входных сигналов с соответствие с принципом реализации рекуррентных нейросетевых регуляторов. Функция активации в каждом слое может быть произвольной.

Для достижения необходимой точности моделирования необходимо варьировать параметры сети до достижения наилучшего результата. Вообще говоря, структуру подобных нейросетевых регуляторов можно разделить на слои с соответствующими входными сигналами, весовыми коэффициентами, функциями активации. Причём выходы функций активации одного слоя являются входами для следующего слоя, как структурной единицы регулятора. Графически это можно отобразить в следующем виде.

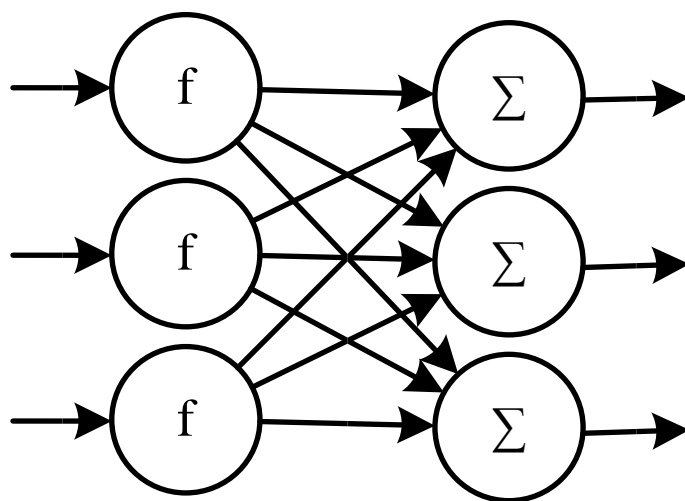


Рисунок 74 - Структурная единица многослойного рекуррентного нейросетевого регулятора

дают разной размерностью. Для осуществления произведения матриц необходимо преобразовать матрицу весовых коэффициентов в матрицу размерностью $N \cdot U$. Для этого в Simulink существует команда Reshape:

$$\begin{aligned} & \text{Reshape}(W, N, U) = \\ = & \text{Reshape} \left(\begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \\ \vdots \\ W_{U \cdot N} \end{bmatrix}, N, U \right) \Rightarrow W = \begin{bmatrix} W_1 & \cdots & W_U \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ W_N & \cdots & W_U \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (125)$$

Теперь, произведение матрицы входов U на матрицу весовых коэффициентов позволит получить непосредственные значения на выходах сумматоров:

$$Y = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_u \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} W_1 & \cdots & W_U \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ W_N & \cdots & W_U \end{bmatrix} \quad (126)$$

Для всех промежуточных слоёв вычисление выходных сигналов также осуществляется по формулам (123)-(126).

Немного отличается расчёт выхода внешнего слоя нейронной сети. В этом слое нет необходимости перестраивать матрицу весовых коэффициентов, т.к. размерность матрицы весовых коэффициентов в однолинейной нейронной сети совпадает с размерностью вектор столбца входов. Для расчёта выхода достаточно осуществить операцию скалярного произведения:

$$Y = u(k) = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_u \end{bmatrix} \cdot [W_1 \quad W_2 \quad \cdots \quad W_{U \cdot N}] \quad (127)$$

Выражение (127) представляет собой управляющий сигнал нейросетевого регулятора.

Алгоритм обратного распространения ошибки также формируется для каждого слоя в отдельности.

Для внешнего (входного) слоя, поскольку матрица весовых коэффициентов представляет собой вектор, необходимо осуществить операцию конкатенации вектора входных сигналов:

$$U_{\text{con}} = \left(\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_u \end{bmatrix}, U \right) \quad (128)$$

Поправки весовых коэффициентов для входного слоя нейронов будут рассчитаны в соответствие с зависимостью:

4.4 Исследование усовершенствованной системы регулирования натяжения

4.4.1 Моделирование базовых технологических режимов (поддержание натяжения в функции рулона на постоянном уровне)

При проектировании систем управления с использованием нейронных контроллеров выделяется два этапа:

-идентификации динамического процесса (в нашем случае была осуществлена посредством разработки модели процесса). Данный этап был проделан в главе II;

-синтез и реализация закона управления (использование идентифицированных процессов для создания новой системы).

Анализ разработанной САРН с НС производится с помощью математического моделирования. Проанализируем с помощью математического моделирования работу САРН с нейронными сетями и сравним с работой системы обычной САРН. Вначале рассмотрим влияние коэффициента скорости обучения на адаптацию к заданному закону изменения натяжения. Причиной, по которой исследование принято начать с рассмотрения данного вопроса, является то, что скорость обучения повлияет на качественный запуск моталки. В качестве тестовых вариантов скорости примем значения $\eta=10/1000$; $100/1000$; $1000/1000$ и скорость обучения η , изменяемая в процессе работы по закону:

$$K \cdot dY, \quad (131)$$

где K - масштабирующий коэффициент, определяющий масштаб характеристики изменения скорости обучения;

dY - скорость обучения, зависящая от переменного параметра мехатронной системы.

Изменение параметров механической системы (радиуса рулона, момента инерции) приводит к изменению динамических свойств системы. Если $\eta=\text{const}$, то НС может достаточно успешно адаптироваться к изменяющимся условиям и формировать сигнал для следования по целевой траектории. В тех случаях, когда диаметр рулона или момент инерции станет слишком большим, скорости адаптации уже не будет хватать для управления при наличии массивного объекта, в результате чего эффективность обучения упадёт. Поэтому скорость обучения (адаптации) необходимо изменять таким образом, чтобы соблюдалась корреляция «величина параметров рулона - скорость обучения». Данный подход определит характер и форму изменения скорости. С учётом того, что точный расчёт скорости обучения в сущности невозможен, введён масштабирующий коэффициент K , определяющий во-первых, первоначальную скорость адаптации, а во-вторых, скорость реакции нейронной сети на изменение параметров при форме принятой корреляции.

На рисунке 79 показаны расчётные кривые переходных процессов натяжения.

не является предельным для выбранного алгоритма обучения. При необходимости данный коэффициент можно увеличивать.

Расчётные кривые подтверждают тот факт, что снижение коэффициента скорости снижает качество адаптации, а увеличение коэффициента скорости повышает. Однако чрезмерно завышать коэффициент так же не стоит, поскольку это может привести к неустойчивости системы. Правильно подобранная скорость обучения позволит сети быстро обучаться и адаптироваться к условиям, обеспечит устойчивость и качественный запуск. Тем не менее, самый качественный механизм адаптации обеспечивает адаптирующаяся к изменению параметров скорость обучения нейронной сети внешнего регулятора, определяемая по формуле 131. Этот подход мы будем применять и далее.

Теперь, рассмотрим основные технологические режимы разработанной системы для проверки работоспособности и вывода практических рекомендаций при создании и наладке подобных систем, определения достоинств и недостатков разработанной системы:

1. Адаптация к закону изменения натяжения, задаваемого постоянным на интервале изменения радиуса рулона. Фактически, это повторное исследование самого тяжёлого режима работы моталки и САРН, рассмотренного в главе II;

2. Адаптация к различным сложным с точки зрения управления законам изменения натяжения, представленным на рисунках и задаваемых аналитическими зависимостями. Адаптация к произвольному закону в рамках изменения радиальных усилий в рулоне, не выходящих за обозначенные пределы, будет использоваться по аналогичному принципу;

3. Компенсация эксцентриситета рулона;

4. Режим управления скоростью вала барабана моталки при обрыве прокатываемой полосы в режиме АРН;

5. Рассмотрение регулирования натяжения при различных профилях проката для анализа зависимости максимальной динамической ошибки натяжения от геометрии профиля.

Рассмотрим первый технологический режим. В качестве топологии и архитектуры нейросетевых регуляторов была принята следующая форма:

1. Внешний регулятор скорости/натяжения:

а) Состав входного вектора: отклонение измеренного натяжения от заданного, задержанное на число тактов равное 4 отклонение, задержанное на число тактов равное 4 измеренное значение натяжения, задержанное на такт значение ошибки. В данной конфигурации сеть получает информацию об измеренной величине, об отклонении от заданного уровня, об ошибке и динамику данных величин на несколько шагов в прошлом.

б) Число слоёв - 3;

в) Число нейронов в первом (входном) слое - 10 по числу данных во входном векторе, во втором слое - 8, в выходном слое 1 (рассматривается одномерная нейронная сеть).

д) Функция активации первого слоя - гиперболический тангенс, второго слоя - гиперболический тангенс, выходного слоя - линейная функция;

В результате, эквивалентное «время запуска» по расчётным кривым для САРН с НС для пуска и торможения гарантируется в соответствии с эталонной моделью и составляет ≈ 1 сек, но для существующей САРН это время составляет ≈ 2 сек. Другими словами, в существующей САРН обеспечивается вполне приемлемое, но недостаточно точное следование за эталонной траекторией, особенно в переходных режимах. Стоит отметить, что на некоторых участках ошибка между эталонным сигналом и измеренным становится ниже именно в существующей системе. Это проявление недостатка градиентных алгоритмов обучения нейронных сетей - локальные минимумы.

При этом, система САРН с НС не так восприимчива к падению натяжения в переходных режимах. Попробуем объяснить причину данного эффекта. Если обратить внимание на математическую модель, как на отражение реальных процессов, происходящих в системе, то можно увидеть, что момент связан с натяжением не напрямую. Реакция натяжения на момент в сущности происходит по цепочке «электромагнитный момент-окружная скорость вала барабана моталки-радиус рулона-линейная скорость намотки-натяжение». А с учётом того, что в модели прокатываемой полосы на вход поступает динамическая разность скоростей моталки клетки, можно сделать вывод о том, что падение натяжения в классической системе в переходном процессе обусловлено несовершенством генерации необходимой для создания данного натяжения разницы скоростей в переходном режиме. При сохранении положительной разницы скоростей в переходном режиме при разгоне неспособность поддерживать разницу, близкую к той, которая создала бы необходимое натяжение, ну или, по крайней мере, близкое к нему, приводит к тому, что натяжение падает. И если в остальных случаях отклонение в принципе укладывается в допустимый диапазон точности $\pm 5-15\%$, то при пуске клетки на максимальную скорость прокатки происходит значительное падение натяжения (порядка 40%). Отсюда следует, что для поддержания натяжения на заданном уровне в переходных процессах необходимо генерировать соответствующую тахограмму линейной (окружной) скорости, а значит, формировать динамический момент. В принципе, это не противоречит существующим методам. Просто рассмотрен более глубокий подход с учётом имеющейся математической модели.

Таким образом, в существующей системе это обусловлено влиянием динамических моментов и несовершенством генерации тахограммы линейной скорости для соблюдения заданного закона натяжения, что приводит в итоге к различной динамике роста натяжения.

Обращая внимание на работу САРН с НС, можно выявить способность нейросетевых регуляторов к быстрой адаптации и демонстрацию качественной выработки сигнала задания, формирующее в итоге такую скорость, которая необходима для наиболее точного поддержания скорости и, как следствие, достаточно невосприимчивую к этому диаграмму натяжения.

Считая оба данных закона работающими исключительно в динамических режимах, рассмотрим расчётные кривые отклонения натяжения от эталонного сигнала для существующей САРН и для САРН с НС, показанные на рисунке 94 и 95.

Второй закон изменения натяжения является с точки зрения управления более сложным, чем первый. Это создаёт определённые динамические трудности, как для моталки, так и для клетки. Особенно сильно это выражается в САРН с НС. Если в существующей системе наблюдается примерно одинаковый уровень колебательности момента на всём диапазоне изменения натяжения, при этом переходные процессы характеризуются повышенной колебательностью и перерегулированием (это отмечено на графиках), то несмотря на снижение перерегулирования в системе с НС, наблюдается возникновение повышенного уровня колебательности момента примерно в самом конце цикла смотки и самом начале цикла размотки. В общем случае, это обусловлено теми же самыми причинами. Во-первых, это достаточно высокий уровень натяжения, за которым в условиях повышенного момента инерции рулона (конец цикла смотки и начало цикла размотки) двигаться в системе САРН с НС значительно труднее. По всей видимости, скорость обучения на данном конкретном отрезке необходимо снизить. В этом случае сеть, попав в локальный минимум при максимальном радиусе рулона и высоком уровне натяжения, стремится оттуда выбраться, что при работе градиентного алгоритма без модификаций осуществить невозможно. Одновременно с этим сеть, гарантируя определённую численно минимальную ошибку, стремится поддержать заданный уровень натяжения в переходных режимах. При этом, значительно повышается колебательность момента. Несмотря на это, просадка натяжения практически не наблюдается. Для снижения колебательности момента и повышения точности необходимо варьировать скорость обучения, а саму сеть оптимизировать глобально, т.е. применять методы глобальной оптимизации. Адаптация к произвольному закону в рамках изменения радиальных усилий в рулоне, не выходящих за обозначенные пределы, мало чем отличается от предыдущего пункта. Единственной оговоркой здесь выступит то, что прогнозируемые радиальные напряжения в рулоне не должны выходить за пределы выделенного диапазона.

4.4.3 Компенсация эксцентриситета моталки

При намотке металлических полос появляется ряд проблем: благодаря креплению полосы в зажимном шлице барабана возникает некруглость (эксцентриситет) на моталке, которая ведет при намотке и размотке полосы к очень большим изменениям в диаметре и этим вызывает колебания натяжения (колебания моталки) и отклонения по толщине. На рисунке 100 показан эксцентриситет.

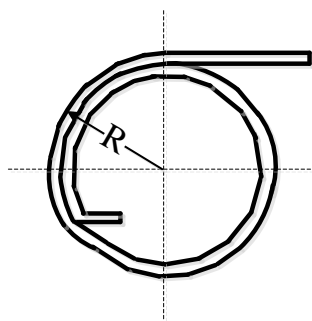


Рисунок 100 - Основная причина возникновения эксцентриситета рулона

внешнего воздействия оказывает скорость обучения внешнего нейросетевого регулятора.

В общем случае наблюдается значительное снижение колебательности, однако в данном случае система сталкивается с некоторыми трудностями. Во-первых, наличие дискретного характера изменения диаметра вносит дополнительную нелинейность, что усложняет управление. Во-вторых, сильное внешнее возмущение, напрямую влияющее на гибкую механическую систему под названием «полоса» затрудняет поиск локального минимума в области определения функции нейронной сети. Тем не менее, со временем сеть всё-таки адаптируется к этому и в повторном цикле смотки это уже проявляется мало. Но сеть не устранила колебания. Фактически, она их просто подавила. Данный факт создаёт предпосылки того, что при воздействии значительно более крупных амплитуд эксцентриситета собственные возможности сети уже будут недостаточно и будет необходима разработка системы компенсации эксцентриситета.

4.4.4 Регулирование скорости вращения барабана моталки при обрыве прокатываемой полосы

В том случае, если натяжение при намотке превысит граничные растягивающие усилия, превышающие предел прочности прокатываемой полосы, произойдёт её обрыв. В случае обрыва для предотвращения дальнейшей размотки рулона и порчи полосы необходимо остановить прокатку, то есть организовать экстренное торможение.

В классических системах при обрыве теряется сигнал с датчика натяжения, в результате чего разница между заданным и измеряемым уровнем натяжения увеличивается. Поскольку рассогласование сохраняется постоянно, привод будет увеличивать скорость вращения вала барабана моталки с целью восстановить заданный уровень натяжения.

Поскольку в данном случае это технически невозможно, предусмотрена функция насыщения регуляторов. При значительной разнице регулятор скорости входит в насыщение и больше из него не выходит при сохранении разницы сигнала, превышающего допустимый уровень.

Моделирование обрыва прокатываемой полосы производилось в [50]. В этом случае система защиты реализована по способу моментального отключения электроприводов клеток от питающей сети при обрыве прокатываемой полосы. Там же указано, что резкая остановка приводит к весьма значительным скачкам и колебательности координат электромеханической системы (ЭМС). Это может негативно влиять на работу реального технологического оборудования, следовательно, в аварийных ситуациях необходимо производить плавную остановку ЭМС (рис. 4). Однако тогда имеет место задача быстрого с ограниченными механическими колебаниями торможения.

В существующей системе предусмотрена система регулирования скорости барабана моталки, осуществляющая аварийный (форсированный) останов в случае обрыва полосы.

В усовершенствованной системе в качестве управляющего регулятора используется внешний регулятор, который в случае аварии переключается на регулирование скорости и производит форсированный останов при обрыве полосы.

В случае обрыва САРН преобразуется в САРС барабана моталки путём переключения сигнала с датчика натяжения на датчик скорости, а сигнала эталонной траектории натяжения на сигнал эталонной траектории скорости для останова. Очевидно, что торможение необходимо производить с текущей скорости вращения, на которой произошёл обрыв, до нулевой.

Предугадать, на какой скорости произойдёт обрыв, крайне затруднительно, поэтому использовать отдельный канал регулирования скорости для останова нецелесообразно. Вместо этого необходимо отслеживать и запоминать текущую скорость барабана моталки. В момент обрыва происходит переключение обратной связи с датчика натяжения на датчик скорости, а сигнал задания с натяжения переключается на скорость. С этого момента нейросетевой контроллер, отслеживающий уровень натяжения, начинает отслеживать траекторию скорости.

Траектория торможения формируется достаточно просто. Сигнал с датчика скорости подаётся на динамическое звено, реализующее форму траектории торможения.

В качестве такого звена принимается апериодическое звено. Поскольку имеется возможность, задавая постоянную времени, помимо форсирования процесса реализовывать его плавность. Нейросетевой регулятор в режиме регулирования скорости должен будет лишь качественно следовать по этой траектории с момента обрыва до момента останова.

На рисунке показан сигнал с датчика натяжения (обратная связь по натяжению). В момент времени $t=50$ сек происходит обрыв полосы, в результате чего сигнал с датчика натяжения становится равным нулю.

В этом случае, когда ошибка между эталоном и измеренным уровнем натяжения не уменьшается, а контроль над регулируемым параметром теряется (натяжение не находит отклика на управляющие сигналы регулятора), начинается перманентный рост весовых коэффициентов.

При этом, если при наличии неумещающей ошибки линейный ПИ-регулятор при наличии ограничения на его входе, входит в область насыщения, внешняя нейронная сеть при постоянном росте весовых коэффициентов вводит нейроны скрытого слоя с гиперболической функцией активации в насыщение, а на выходной слой с линейной функцией активации генерирует постоянно нарастающий сигнал.

Для НР применение внешнего ограничения также допустимо, но данное решение не помогает от насыщения внутренних нейронов.

В этой ситуации сеть находится в состоянии «паралича», что приводит к постоянному изменению скорости вращения вала барабана моталки.

Поскольку обрыв полосы является аварийным режимом, необходимо принять меры по форсированному останову с целью сохранения формы рулона.

Для этого внешнему регулятору даётся под контроль второй технологический параметр – скорость вращения вала двигателя.

Таблица 5 - Динамическое отклонение натяжения в зависимости от профиля наматываемой полосы в существующей системе

В режиме создания натяжения при остановленной клет:						
dT, кН		b, м				
		1	1,1625	1,325	1,4875	1,65
h, м	0,0003	10,00018	9,662485	9,099516	8,31244806	7,300008
	0,001475	7,025182	7,099789	6,180736	6,02472184	4,812458
	0,00265	5	4,67501	4,299456	3,87503708	3,399907
	0,003825	3,925178	4,187362	3,455678	3,78728831	3,062354
	0,005	3,8	3,687496	3,649991	3,68748439	3,7998
В режиме торможения с полным рулоном:						
dT, кН		b, м				
		1	1,1625	1,325	1,4875	1,65
h, м	0,0003	20,00037	22,49991	24,00027	24,49972	23,99969
	0,001475	18,0004	19,1002	19,78781	20,17499	19,74966
	0,00265	15,9998	16,26228	16,40036	16,41224	16,29964
	0,003825	14,00047	14,12504	13,8379	14,1499	13,64962
	0,005	12	12,1	12,10001	12,00001	11,7996
В режиме разгона с полным рулоном в начале цикла размотки:						
dT, кН		b, м				
		1	1,1625	1,325	1,4875	1,65
h, м	0,0003	16,00034	16,93715	17,50023	17,68706	17,4996
	0,001475	13,28786	13,65034	13,16272	13,95743	13,62465
	0,00265	11,0006	10,35939	10,1002	10,22448	10,7297
	0,003825	9,137885	9,150195	8,31269	9,12742	8,814749
	0,005	7,7	7,752489	7,799977	7,842464	7,8798
В режиме торможения с пустым барабаном в конце цикла размотки:						
dT, кН		b, м				
		1	1,1625	1,325	1,4875	1,65
h, м	0,0003	10,9997	9,61312	8,399989	7,363158	6,500018
	0,001475	6,824708	6,624886	5,237472	5,152515	4,195059
	0,00265	3,9999	3,498633	3,099955	2,803595	2,610099
	0,003825	2,524719	2,849959	1,98744	2,302552	1,745138
	0,005	2,4	2,124991	1,89998	1,724967	1,600175

Из таблицы видно, что существующая система характеризуется достаточно высоким уровнем динамических ошибок, локализованным в области максимальной по толщине и ширине наматываемой полосы. Рассмотрим таблицу 6.

Таблица 6 - Динамическое отклонение натяжения в зависимости от профиля наматываемой полосы в САРН с НС

В режиме создания натяжения при остановленной клетке:						
dT, кН		b, м				
		1	1,1625	1,325	1,4875	1,65
h, м	0,0003	0,400034	0,262387	0,200043	0,21235814	0,300046
	0,001475	0,286283	0,292528	0,14129	0,32629234	0,318795
	0,00265	0,265	0,265622	0,305037	0,38311089	0,500044
	0,003825	0,336279	0,59251	0,691281	0,86378123	0,843792
	0,005	0,5	0,993752	1,300005	1,41875652	1,35004
В режиме торможения с полным рулоном:						
dT, кН		b, м				
		1	1,1625	1,325	1,4875	1,65
h, м	0,0003	0,999974	0,524652	0,300012	0,324551	0,600001
	0,001475	0,767477	0,723724	0,416261	0,801253	0,999997
	0,00265	0,7899	0,712383	0,805009	1,067343	1,499991
	0,003825	1,067477	1,398725	1,466257	1,876242	2,099984
	0,005	1,6	2,049996	2,399992	2,649987	2,799975
В режиме разгона с полным рулоном в начале цикла размотки:						
dT, кН		b, м				
		1	1,1625	1,325	1,4875	1,65
h, м	0,0003	0,800014	0,546125	0,450015	0,511067	0,729967
	0,001475	0,725018	0,715011	0,526265	0,722491	0,673718
	0,00265	0,8	0,795001	0,810013	0,845004	0,899969
	0,003825	1,025023	1,2525	1,301262	1,477486	1,408722
	0,005	1,4	1,749994	1,999987	2,149979	2,199975
В режиме торможения с пустым барабаном в конце цикла размотки:						
dT, кН		b, м				
		1	1,1625	1,325	1,4875	1,65
h, м	0,0003	0,899952	0,594883	0,459989	0,494843	0,700045
	0,001475	0,844952	0,734959	0,647492	0,715018	0,795045
	0,00265	0,8099	0,764878	0,769994	0,824825	0,930044
	0,003825	0,794952	0,799976	0,827497	0,960022	1,105042
	0,005	0,8	0,750004	0,820009	1,010014	1,32004

Из таблицы 6 видно, что уровень динамических ошибок достаточно низкий, при этом распределение достаточно неравномерное.

Максимальная ошибка не превышает 16%, наблюдается при останове и запуске с полным рулоном.

В САРН с НС ситуация немного иная. Во-первых, график поверхности весьма неравномерен, и сказать, что максимальные динамические ошибки локализованы в области минимальных профилей нельзя. Генерация весовых коэффициентов в заданном диапазоне вызывает неравномерную генерацию области определения функций, в которой случайным образом располагаются области минимумов. Градиентный алгоритм перемещается в область локального минимума, который может располагаться как области максимальных, так и минимальных профилей. Этим и обусловлена неравномерность. В общем случае, уровень динамических ошибок натяжений в САРН с НС гораздо ниже.

4.5 Возможности программной и аппаратной реализации используемых алгоритмов

В настоящее время существует большое количество возможностей реализации НС, как в виде программ, так и в виде специализированных аппаратных модулей и их компонентов. Различают три основных направления в области реализации нейронных сетей:

- программное - все компоненты НК реализуются программно на универсальных ЭВМ
- аппаратно-программное - часть компонентов НК реализуется аппаратно (в виде так называемой платы расширения), а остальные программно
- аппаратное - все компоненты НК выполнены на аппаратном уровне, кроме специальных программ настройки весов синаптических связей;

Программные системы, реализующие первое направление, получили название нейропакетов [72].

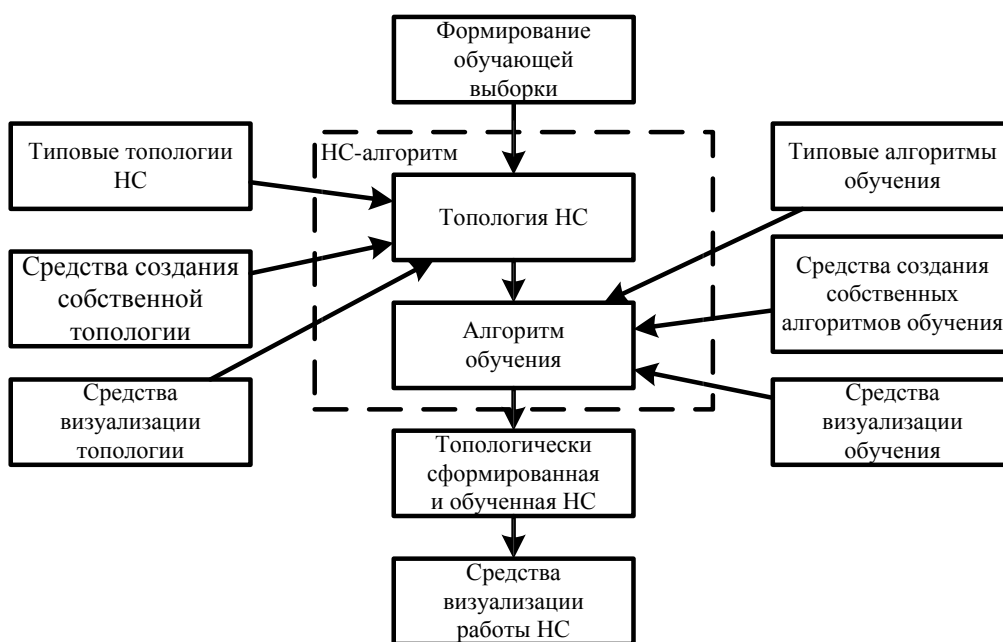


Рисунок 109 - Обобщённая структурная схема нейропакета

Рассмотрим программную реализацию. В случае использования предварительно обучаемой НС сперва потребовалось бы формирование обучающей выборки. Поскольку в нашем случае используется обучение в реальном времени, то первоначальным этапом реализации станет, что вполне естественно, разработка архитектуры и топологии нейронной сети, применяемой для управления. В случае использования рекуррентных нейронных сетей, как и любых других сетей на базе многослойных персептронов, математическое описание преобразования проходящих через нейронную сеть сигналов представляет собой большое количество однообразных алгебраических операций (см. пункт про фундаментальную модель). Наиболее удобным вариантом была бы матричная реализация, подобно разработанной математической модели, т.к. это облегчило бы разработчику задачу и избавило бы от выполнения множества однообразных рутинных операций.

В том случае, если нет подходящих для этого средств, можно применять различные структурно-ориентированные программные языки. В качестве таких языков может выступать собственный язык программирования MATLAB и его интеграция с программными продуктами от Siemens, Pascal (в качестве учебных примеров) и собственные возможности технологических контроллеров Siemens (язык SCL). Причём для большей эффективности лучше разрабатывать и тестировать сеть в MATLAB, уточнение производить при интеграции с Siemens, а реализацию производить на языке SCL. Вообще говоря, может применяться любой Паскале-подобный язык или любой другой язык с возможностью визуализации результатов расчёта. В процессе работы автором был написан код программы на языке MATLAB, реализующий трёхслойный однонаправленный персептрон с тремя входными нейронами, десятью нейронами в скрытом слое и одним выходным нейроном с гиперболическими функциями активации. На данный код было получено свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

Принимая во внимание тот факт, что существующая система управления реализована с помощью технологических контроллеров T400 и Symadin D, а разработанные усовершенствования не требуют никакой замены оборудования, кроме программной реализации, то вполне целесообразно рассмотреть именно SCL. Структурированный язык управления SCL (Structured Control Language) является языком программирования высокого уровня для TIA Portal.

Язык базируется на стандарте DIN EN 61131-3 (часть "Structured Text" ["Структурированные тексты"]). Язык SCL оптимизирован для программирования программируемых контроллеров (PLC). SCL содержит все элементы языка Паскаль (Pascal) наряду с типичными для PLC элементами, такими, например, как "вход" ("input") и "выход" ("output"). SCL особенно подходит для программирования сложных алгоритмов или для задач, относящихся к области управления данными. Язык SCL поддерживает характерную для TIA Portal блочную структуру, а также позволяет создавать TIA-программы, включающие в себя фрагменты на базовых языках программирования STL, LAD и FBD.

Наиболее перспективными в плане практической реализации нейросетевых САУ динамическими объектами являются указанные выше второе и особенно третье направление, ориентированные всё же на аппаратную реализацию части

или всех компонентов НК. В качестве элементной базы используются ПЛИС или СБИС-нейрочипы. ПЛИС представляют собой массив конфигурируемых логических блоков (КЛБ) с полностью конфигурируемыми высокоскоростными межсоединениями. Ввиду матричной структуры ПЛИС, состоящей из большого числа КЛБ, как элементарных ячеек, можно построить иерархические блоки более высокого уровня организации, например, сумматоры, состоящие из КЛБ. На основе сумматоров затем формируются множители, из множителей - отдельные нейроны, а из нейронов строятся фрагменты нейронной сети. Резкое увеличение мощности ПЛИС позволяет использовать их не только для реализации сравнительно простых контроллеров, но и для создания устройств обработки сложных последовательностей сигналов и интеллектуальных регуляторов. Применение ПЛИС позволяет быстро и недорого аппаратно реализовать нейросетевой алгоритм решения конкретной задачи, а в случае успеха быстро перейти к выпуску нейрочипов на основе базовых матричных кристаллов (БМК) [72].

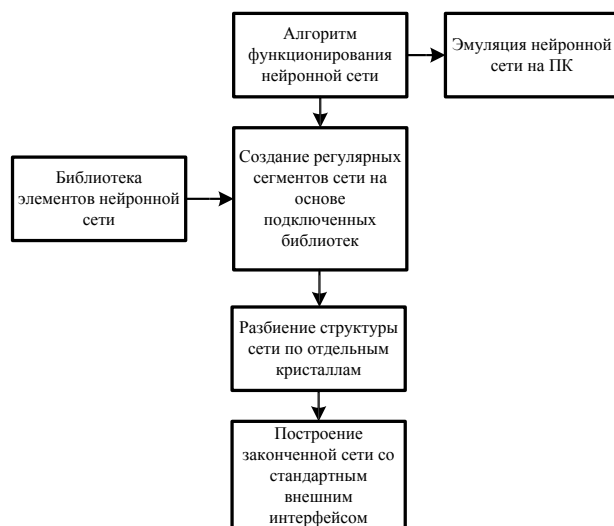


Рисунок 110 - Этапы создания НК на ПЛИС

Другое перспективное направления создания НК - применение цифровых сигнальных процессоров (ЦСП). Важными преимуществами ЦСП по сравнению с универсальными микропроцессорами является их высокая производительность, возможность выполнять практически все необходимые матричные операции на аппаратном уровне, большая адекватность их архитектуры для реализации нейронов.

ЦСП можно назвать вычислительную систему, выполняющая алгоритмы, представленные в нейросетевом логическом базисе. Основные преимущества нейрокомпьютеров заключаются в следующем [72]:

- за счет высокопараллельности алгоритмов обеспечивается высокое быстродействие;
- устойчивость к разрушениям и помехам;
- устойчивость может обеспечивать и при использовании неустойчивых элементов с различными параметрами.
- каждый компонент имеет чёткий набор функций;

– возможность взаимозамены любого компонента без изменения других компонентов.

Для обеспечения требуемого качества и времени обработки сигналов, при реализации НС должна быть достигнута быстрая обработка нейронных связей.

Вместе с тем, следует подчеркнуть, что существенной чертой названных ЦСП, ограничивающих область применения, является их дороговизна и малая известность среди широкого круга разработчиков. Ключевую роль в развитии и внедрении нейросетевых технологий играют нейропроцессоры (нейрочипы). Под нейрочипом принято понимать специализированный процессор, выполненный в виде сверхбольшой интегральной схемы (СБИС), оптимизированной для массового выполнения нейронных операций: скалярного умножения и нелинейного преобразования.

В связи со спецификой применения нейропроцессоров, возникает сложность в нахождении их на рынке. Одним из примеров такого нейрокомпьютера, использующегося для промышленных целей, является нейропроцессор Synapse3 (Siemens, Германия), процессор NeuroMatrix. Нейропроцессор Synapse3 компании Siemens.

Одна карта Synapse 3 производит порядка 2,4 млрд операций/сек. Наиважнейший компонент нейросигнальный процессор MA16, состоящий из 610 тыс. транзисторов и выполняет до 400 млн. операций умножения и сложения в секунду. По своей архитектуре Synapse 3 обеспечивает работу с использованием всех типов нейронных сетей. Нейрочип MA16 компании Siemens программируемый каскадируемый процессор для векторных и матричных операций. Выполняет следующие операции:

- матричное умножение;
- матричное сложение/вычитание;
- нормировка результата;
- вычисление векторной нормы;
- вычисление векторного расстояния.

Нейрочип содержит четыре идентичных процессорных элемента, работающих параллельно. Входные данные имеют точность 16 бит, тактовая частота 50МГц.

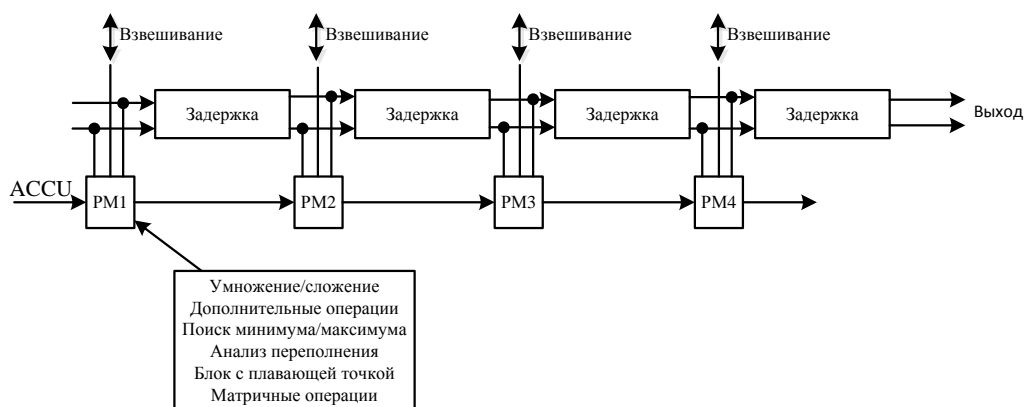


Рисунок 111 - Функциональная схема нейрочипа MA16

Следует заметить, что несмотря на столь впечатляющие возможности, нейровычислители пока не получили должного распространения вследствие высокой цены и из-за специфики освоения. Если говорить о дальнейшем развитии мехатроники как науки, мехатронных и робототехнических системах и о главном перспективном направлении интеллектуализации вычислительных систем, придании им свойств человеческого мышления и восприятия, то нейрокомпьютеры - практически единственный путь развития вычислительной техники в этом направлении.

Выводы по главе IV

1. Показана необходимость создания закона управления натяжением в цикле смотки и размотки для формирования радиальных напряжений в рулоне;
2. Рассмотрены средства интеллектуализации и управления мехатронными комплексами с помощью нейросетевых технологий;
3. Рассмотрен вопрос выбор архитектуры и топологии нейронной сети, а также структура управления динамическим объектом;
4. Показано, что этап предварительного обучения на основе сбора большого количества обучающих выборок можно избежать, применив методы обучения нейронной сети в реальном времени;
5. Была построена многомодульная система нейросетевого управления с элементами управления с эталонной моделью и основанная на применении рекуррентных нейросетевых регуляторов;
6. С целью удобства моделирования, а также рассмотрения процесса преобразования сигнала при прохождении его через нейронную сеть была создана матричная модель рекуррентного нейросетевого регулятора с послойной реализацией;
7. В процессе рассмотрения базовых технологических режимов было выявлено, что усовершенствованная система в принципе позволяет получить тот же самый результат в системе прямого регулирования натяжения с некоторыми качественными улучшениями, а именно снижение колебательности натяжения и момента на вале двигателя моталки;
8. В процессе рассмотрения вопроса адаптации к двум сложным законам показан приемлемый вариант в существующей системе и значительно более качественный в предлагаемой;
9. В процессе рассмотрения влияние эксцентриситета рулона при намотке была показана высокая восприимчивость системы без дополнительных компенсационных каналов. САРН с НС способна подавлять возмущения без дополнительных каналов управления;
10. Показано значительное снижение уровня динамических ошибок в системе САРН с НС по сравнению с существующей системой;
11. Рассмотрены вопросы программной и аппаратной реализации предложенных алгоритмов на стане ХП 2000 ОАО «ММК».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках магистерской работы получены следующие результаты:

1. В результате проведённого литературного обзора, технологических инструкций и технической документации рассмотрена структурная схема и принцип работы системы регулирования натяжения реверсивной моталки стана холодной прокатки 2000 ОАО «ММК». Большинство современных САРН построены по прямому принципу, поэтому в этой магистерской работе уделено внимание по усовершенствованию САРН этого типа.

2. Наличие электропривода, сложной измерительной аппаратуры, датчиков, силовой преобразовательной техники и относительно сложной системы управления, предназначенной для управления двигателем с целью поддержания натяжения на заданном уровне при изменении радиуса рулона позволяет рассматривать реверсивную моталку с точки зрения мехатронного комплекса второго уровня.

3. С целью исследования существующей и предлагаемой систем автоматического регулирования натяжения была разработана комплексная математическая модель участка «клеть-полоса-моталка», содержащая: синхронные двигатели клетки и моталки, их непосредственные преобразователи частоты, САРН и САРС моталки и клетки соответственно, тиристорные возбудители, механизм моталки и очаг деформации металла в клетки. Показана адекватность разработанной модели реальному объекту.

4. С помощью разработанной модели были исследованы основные динамические режимы реверсивной моталки. Моделирование самого тяжёлого режима, а именно намотки и размотки полосы максимальной толщины и ширины на максимальной скорости прокатки, позволяет сделать вывод о том, что существующая система вполне работоспособна, однако её эксплуатация осложнена наличием переключения структуры и большого количества вспомогательных компенсационных блоков.

5. Было выявлено, что соотношение темпов разгона моталки и клетки, а также значений и динамики скоростей клетки и моталки является основным фактором, определяющим величину бросков натяжения и момента в динамических процессах. При различных вариантах адаптации происходит отклонение настроек переходных процессов и статических режимов от оптимальных, в результате чего в динамике происходят броски и просадки натяжения, а в статике высокое отклонение натяжения от заданного уровня при набросе нагрузки.

6. Существующая система управления на основе линейных регуляторов, в принципе, является простой и работоспособной системой. В процессе смотки и размотки дефекты возникают на достаточно небольших участках рулона. Наибольшее проявление имеет дефект «птичка» при неснятии рулона с барабана. Для формирования качественного закона требуется возможность формирования закона натяжения в функции радиуса рулона с целью управления радиальными напряжениями.

7. Полученные результаты исследования, их анализ и анализ технологического процесса в целом позволяет уточнить старые и сформировать некоторые

новые требования к намоточно-размоточным агрегатам с позиции мехатронного комплекса, а именно:

- качественная адаптация при изменении параметров рулона наматываемого материала;
- простота и применение методов управления, позволяющих отказаться предварительной точной математической идентификации объекта управления;
- невосприимчивость к различным возмущениям без введения дополнительных компенсационных и управляющих каналов, либо сведение их к минимуму (придание системе робастно-инвариантных свойств);
- возможность задания закона натяжения и высокоточное следование задаваемой траектории.

8. С помощью метода структурно-функциональной декомпозиции электромеханическая система реверсивной моталки, с точки зрения управления, была разделена на управление механическими, т.е. внешними параметрами (скорость вращения/натяжение) и электрическими параметрами (формирование токов синхронного электродвигателя). На основе принципа многомодульного нейроуправления было принято решение о внедрении обособленного регулятора для управления локальной областью функций (по аналогии с системой подчинённого регулирования, где каждым отдельным параметром управляет отдельный регулятор). С учётом того, что требуется формирование закона натяжения, обучение внешнего регулятора скорости/натяжения будет осуществляться в соответствии с принципом обучения с «учителем», т.е. по эталонной модели.

9. На основе этого, предложена структурная схема двухуровневого нейроуправления натяжением с элементами многомодульного подхода и управления с эталонной моделью, не противоречащая и легко встраиваемая в принцип векторного управления. Этим обеспечивается преемственность между системой подчинённого регулирования и новыми подходами.

10. В рамках усовершенствованной системы были исследованы различные режимы регулирования натяжения: базовый режим постоянства уровня натяжения, задание двух сложных законов регулирования натяжения, компенсация эксцентриситета, сравнение уровня динамических ошибок в существующей системе и в предлагаемой системе.

11. Принятая базовая топология и архитектура нейронной сети показала снижение уровня колебательности и момента на вале двигателя моталки. Однако подтвердился недостаток выбранного градиентного алгоритма обратного распространения ошибки для обучения нейронных сетей - локальные минимумы, выражающийся в том, что в процессе обучения сеть перемещается в области определения функции в минимум (точку минимума), наблюдающийся в некоторой ограниченной окрестности вокруг себя на области значений функции. В результате между эталонным уровнем натяжения и измеренным постоянно существует небольшая разница, не превышающая 2%. Данный недостаток отсутствует в классической системе, т.к. ПИ-регулятор натяжения обладает интегральными свойствами, т.е. обеспечивает астатизм по возмущающему воздействию. Для того, чтобы устранить данный недостаток, во входной вектор данных был добавлен интеграл

от рассогласования между истинным и эталонным значением, а также повышено число нейронов в скрытом слое внешнего регулятора. Данный подход показал свою эффективность, т.к. ошибка натяжения теперь не превышает 0,2%.

12. В данной конфигурации было исследовано задание двух сложных законов изменения натяжения. Данный опыт показал, что предлагаемая система с очень высокой точностью следует по заданной траектории (диапазон ошибок составляет $dT=0,14-2,8$ кН. В существующей системе обеспечивается приемлемый уровень качества, с более высоким уровнем ошибок в диапазоне $dT\approx 1,6-24$ кН.

13. Сравнение уровня динамических ошибок в существующей системе и в САРН с НС позволил сделать вывод о том, что минимальный уровень ошибок в существующей системе локализован в области максимального уровня ширины и толщины, поскольку локализацию в этой области обуславливает настройка ПИ-регулятора натяжения. Поверхность ошибок в САРН с НС достаточно неоднородна, что обусловлено генерацией весовых коэффициентов и формированием области определения функции нейронной сети. Общий уровень ошибок в САРН с НС гораздо ниже (см. пункт 12).

14. Показано, что сеть способна определять «тенденцию» повторяющихся во времени сигналов, в результате чего влияние эксцентриситета было сведено к минимуму без каких либо дополнительных компенсационных каналов.

15. Исследования показали, что эффективность нейрорегулирования может быть повышена за счет более удачного выбора топологии сети, функции активации и алгоритма обучения ИНС.

16. Для устранения недостатков градиентных алгоритмов обучения необходимо применение методов глобальной оптимизации (например, генетических алгоритмов).

17. Показано, что существует программная и аппаратная реализация нейронных сетей. Возможность реализации программно возможна на языке SCL контроллеров от Siemens. Аппаратная реализация возможна с применением различных ЦСП и особенно нейрочипов. В качестве компромиссного варианта предлагается реализовывать НС программно, на языке программирования SCL.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Хайманн, Б. Мехатроника: Компоненты, методы, примеры / Б. Хайманн В. Герт, К. Попп, О. Репецкий. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2010. - 602 с.
2. Готлиб, Б.М. Введение в специальность «Мехатроника и робототехника»: курс лекций / Б.М. Готлиб, А.А. Вакалюк. – Екатеринбург: УрГУПС, 2012. – 134 [2] с.
3. Афанасьев, В.Д. Автоматизированный электропривод в прокатном производстве: учеб. пособие для вузов по спец. - Автоматизация металлург. производства и обраб. металлов давлением / В.Д. Афанасьев. - М.: Металлургия, 1977. - 280 с.
4. Бычков, В.П. Электропривод и автоматизация металлургического производства: учеб. пособие для вузов. Изд. 2-е, перераб. и доп. / В.П. Бычков. - М., «Высш. Школа», 1977. – 391 с.
5. Белов, М.П. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов: учебник для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности "Электропривод и автоматика промышленных установок и технологических комплексов" направления подготовки дипломированных специалистов "Электротехника, электромеханика и электротехнологии" / М. П. Белов, В. А. Новиков, Л. Н. Рассудов. - 3-е изд., испр. - Москва: Академия, 2007. - 574, [1] с.: ил.
6. Филатов, А.С. Электропривод и автоматизация реверсивных станов холодной прокатки / А.С. Филатов. - М.: Металлургия, 1973. - 376 с.
7. Целиков, А.И. Машины и агрегаты металлургических заводов. В 3-х томах. Т.3. Машины и агрегаты для производства и отделки проката. Учебник для вузов / А.И. Целиков, П.И. Полухин, В.М. Гребеник и др. 2-е изд. перераб. и доп. - М.: Металлургия, 1988. - 680 с.
8. Радионов, А.А. Автоматизированный электропривод намоточно-размоточных устройств агрегатов прокатного производства / А.А. Радионов, А.С. Карандаев. - Магнитогорск: МГТУ, 1999, 131 с.
9. Шохин В.В., Сарваров А.С. Автоматизированный электропривод механизмов металлургического производства: учебное пособие / В.В. Шохин, А.С. Сарваров; ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Носова». - Электрон, 2013, 187 с.
10. Гаврилюк, К.Я. Структуры систем прямого регулирования натяжения намоточно-размоточных механизмов / К. Я. Гаврилюк, Н.А. Черногуб, Н.М. Баран, Л.Г. Лимонов // Вестник Нац. техн. ун-та "ХПИ" : сб. науч. тр. Темат. вып. : Проблемы автоматизированного электропривода. - Харьков : НТУ "ХПИ". - 2013. - № 36 (1009). - С. 282-283.
11. Edwin, K. Drive Solutions: Mechatronics for Production and Logistics. - Berlin / K. Edwin. - 2008. p. 546
12. Синицкий, О.В., Элементы современных технологических систем для обеспечения геометрии и формы листового проката / О.В. Синицкий, П.П. Полецков // Калибровочное бюро № 6. - 2015

13. Диденко, Е.Е. Повышение эффективности регулирования натяжения полосы электроприводным комплексом чистой группы стана горячей прокатки.: дис....канд. техн. наук / Е.Е. Диденко. - Липецк. 2016 г. - 185 с.
14. Мещеряков, В.Н. Применение современных тиристорных преобразователей для модернизации электропривода намоточных механизмов в прокатных производствах / В.Н. Мещеряков, С.В. Усов // Электротехнические комплексы и системы управления. - 2009. - №4. - с. 26-30.
15. Бодров, Е.Э. Модернизация электропривода намоточного механизма с применением тиристорного преобразователя / Е.Э. Бодров, А.Р. Мубарашкин, Д.А. Ахметдинов, В.С. Моисеев, И.Б. Прохоров // Энергетические и электротехнические системы. - 2015. - с. 314-320
16. Браун, А.Е. Модернизация АСУ ТП реверсивного стана 1200 ПТС / А.Е. Браун, С.М. Вахрушев // Автоматизация в промышленности. - 2009. - №8.
17. Гасияров, В.Р. Мехатронный технологический комплекс толстолистого стана 5000 горячей прокатки / В.Р. Гасияров, А.А. Радионов // Электротехнические системы и комплексы. - № 21. - 2013.
18. Fang He. Fuzzy Control with Adjustable Factors in Tension Control System / He Fang, Han Jia, Wang Qiang // Advanced Materials Research. - Vol. 902. - 2014. - pp 201-206.
19. Yan Jie. Research on Tension Control System of Filament Winding Machine / Jie Yan, Qiu-ju Zhu // Advanced Materials Research. - Vols 383-390. – 2012. - pp 7631-7636.
20. Jian Li. Research on Unwinding Tension System Control Based on Inverse System Theory / Li Jian, Mei Xuesong, Liu Shanhui // Applied Mechanics and Materials. - Vols 44-47. – 2011. - pp 2822-2826.
21. Y.H. Du. Speed Control System Design of Winding Mechanism For Composite Films / Y.H. Du. // Key Engineering Materials. - Vols. 426-427. – 2010. - pp 417-421.
22. Gassmann V. H_∞ unwinding web tension control of a strip processing plant using a pendulum dancer / Gassmann V., Knittel D., Pagilla P.R., Bueno M. // American Control Conference Hyatt Regency Riverfront, St. Louis, MO, USA June 10-12, 2009.
23. Youzhao Wang, Jing Huang ,Hanwei Chen. Research on Tension Control Model for Traction and Take-up System of Loom / Wang Youzhao, Huang Jing , Chen Hanwei //Advanced Materials Research. - Vol. 627. – 2013. - pp 444-448.
24. Z. Li. Tension Control System Design Of A Filament Winding Structure Based On Fuzzy Neural Network/ Z. Li 5 //Engineering Review, Vol. 35, Issue 1, 9-17, 2015
25. Труды первого конгресса прокатчиков. М.:Черметинформация, 1996. - 240 с.
26. Чертов, А.Д. Применение систем искусственного интеллекта в металлургической промышленности (обзор) / А.Д.Чертов // Металлург - 2003.-№7.- с.32-37.

27. Вейнгер, А. М. Регулируемый синхронный электропривод / Вейнгер А.М. - М: Энергоатомиздат, 1985. - 224
28. Слежановский, О.В. Системы подчинённого регулирования электроприводов переменного тока с вентильными преобразователями/ О.В. Слежановский, Л.Х. Дацковский, И.С.Кузнецов и др. - М:Энергоатомиздат, 1983. - 256 с., ил.
29. Маклаков, А.С. Математическое моделирование синхронного электропривода реверсивной прокатной клетки / А.С. Маклаков, Е.А. Маклакова, В.Р. Гасияров // Труды Международной шестнадцатой научно-технической конференции "Электроприводы переменного тока", [г. Екатеринбург], 05-09 октября 2015 г. — Екатеринбург: [УрФУ], 2015. — С. 131-136.
30. Johansson, E. Detailed Description of Synchronous Machine Models Used in Simpow /E. Johansson //. - Master Thesis. – Västerås. - 2002.
31. Kaukonen, J. Salient Pole Synchronous Machine Modelling In An Industrial Direct Torque Controlled Drive Application // . - Master Thesis. – Monistamo. - 1999
32. Мигунов, Д.В. Разработка и исследование систем регулирования синхронного электропривода черновых клетей станов горячей прокатки.:дис....канд. техн. наук / Д.В. Мигунов. – Липецк. – 2012 г. – 179 с.
33. Меркурьев, Г.В. Устойчивость энергосистем / Г.В. Меркурьев, Ю.М. Шаргин. В 2-х т. - СПб.: НОУ "Центр подготовки кадров энергетики". - 2008. - Т. 2. - 376 с.
34. Зубко, Е. С. Анализ и синтез электроприводов намоточно-размоточных устройств / Е. С. Зубко, О. И. Толочко // Автоматизация технологических объектов и процессов. Труды молодых учёных: сб. наук. пр. XIII науч.-техн. конф. аспирантов и студентов в г. Донецке. – вып. 14-17. - Донецк, 2013 г. – 441 с.
35. ЧАО «Тяжпромавтоматика». Труды сотрудников отдела ОП-5 по результатам разработок автоматизированных электроприводов и систем управления. 8 издание. 2001-2013гг
36. Грудев, А.П. Теория прокатки / А.П. Грудев. - М: Интерметинжиниринг, 2001. - 280 с.
37. Мокрый, Г.В. Моделирование динамики листопрокатного стана и оптимизация управления процессом прокатки /Г.В. Мокрый, О.О. Борисов // Научные труды ДонНТУ. Серия: Вычислительная техника и автоматизация Вып. 74. - 2006. - С. 14-18.
38. Назарова, Е. С. Применение структурного моделирования при разработке комплекса взаимосвязанных моделей электромеханических систем станов холодной прокатки / Е.С. Назарова // Научный выпуск ДМА. – вып. 1. - 2012. - С. 100-106.
39. Синявский, А.А. Совместная математическая модель взаимосвязанных электроприводов клетей непрерывного четырёхклетьевого прокатного стана и моталки /А.А. Синявский // Вестник КДПУ имени Михаила Остроградского. – вып. 4. - Часть 2. – 2008 г. С. 83-87.
40. Васильев, Я.Д. Инженерные модели и алгоритмы расчёта параметров холодной прокатки / Я.Д. Васильев. - М.: Metallurgia, 1995.-368 с.

41. Усов, С.В. Математическое моделирование процесса намотки тонкой стальной полосы в рулон / С.В. Усов, В.Н. Мещеряков // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. - № 10-2. - 2014. - с. 157-162.
42. Dudgeon, G. Six-Pulse Cycloconverter / Graham Dudgeon, Igor Braverman. <https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/examples/six-pulse-cycloconverter.html>
43. Терёхин, В.Б. Моделирование систем электропривода в Simulink (Matlab 7.0.1): учебное пособие / В.Б. Терёхин // Национальный исследовательский Томский политехнический университет. – Томск: Изд_во Томского политехнического университета. - 2010. – 292 с.
44. Радионов, А. А. Математическое моделирование взаимосвязанных электромеханических систем непрерывной подгруппы клетей прокатного стана. Часть 1. Разработка математической модели / А.А. Радионов, А.С. Карандаев, А.С. Евдокимов, И.Ю. Андрияшин, А.Н. Гостев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». - 2015. - Т. 15. - с. 59-73
45. Радионов, А. А. Математическое моделирование взаимосвязанных электромеханических систем непрерывной подгруппы клетей прокатного стана. Часть 2. Исследование динамических нагрузок в универсальных клетях / А.А. Радионов, А.С. Карандаев, А.С. Евдокимов, И.Ю. Андрияшин, А.Н. Гостев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». - 2015. - Т. 15. - № 2. - с. 67-76.
46. Храмшин, В.Р. Математическое моделирование взаимосвязанных электромеханических систем непрерывной подгруппы клетей прокатного стана. Часть 3. Исследование способа согласования линейных скоростей вертикальных и горизонтальных валков / В.Р. Храмшин, А.А. Радионов, А.С. Карандаев, С.А. Евдокимов, А.Г. Шубин, Б.М. Логинов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». - 2016. Т. 16. - № 1. - с. 47-57
47. Храмшин, В.Р. Математическая модель взаимосвязанных электротехнических систем непрерывной группы широкополосного стана / В.Р. Храмшин, И.Ю. Андрияшин, А.Н. Гостев // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. - 2013. - №1. - С. 12-21
48. Мещеряков, В.Н. Математическая модель взаимосвязанных электромеханических систем клетей непрерывного стана холодной прокатки / В.Н. Мещеряков, В.М. Толчеев // Электротехнические системы и комплексы. - 2016. - №1(30). - с. 14-18.
49. Назарова, Е.С. Имитационная модель механического движения металла для реверсивного одноклетьевого стана холодной прокатки / Е.С. Назарова, А.В. Пирожок, Ю.А. Супрун // Электротехника и электроэнергетика. - 2007. - №1. - С. 8-14.
50. Пирожок, А. В. Исследование и моделирование электромеханических систем / А.В. Пирожок, Е.С. Назарова // Вестник Нац. техн. ун-та "ХПИ" : сб. науч. тр. Темат. вып.: Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика. - Харьков: НТУ "ХПИ". - 2010. - № 28. - с. 174-175.
51. Башарин, А.В. Управление электроприводами: учебное пособие [для студ. высш. учебн. завед] / А.В. Башарин, Новиков В.А., Соколовский Г.Г.-Л.: Энергоиздат. - 1982 -392с.

52. Zhijun Liu. Dynamic analysis of center-driven web winder controls. Industry Applications Conference, 1999. Thirty-Fourth IAS Annual Meeting / Liu Zhijun // Conference Record of the 1999 IEEE. – 1999. - p. 1389-1397.

53. Norbert A. Ebler. Tension Control: Dancer Rolls or Load Cells / Norbert A. // IEEE Transactions on industry applications. - Vol. 29. - No. 4, JULY/AUGUST. - 1993. P. 727-739.

54. Еременко, Ю.И. Об интеллектуальной адаптации параметров ПИД-регулятора для снижения энергопотребления управляемого процесса / Ю.И. Еременко, Д.А. Полещенко, А.И. Глущенко, Д.Ю. Ярмуратий // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Экономика. Информатика. – 2013 г. – Вып. 28. - № 22. – с. 210-217.

55. Сабанин В.Р., Смирнов Н.И., А.И. Репин. Автоматические системы регулирования на основе нейросетевых технологий. МЭИ.

56. Сигеру Омату, Рубия Юсоф, Мазуки Халид. Нейроуправление и его приложения. Кн.2. Пер. с англ. Батина Н.В. Под ред. Галушкина А.И. и В.А. Птичкина. - М. ИПРЖР – 2000. - 272 с. ил.

57. Хайкин, С. Нейронные сети: полный курс. 2-е издание.: Пер. с англ.- М.:Издательский дом «Вильямс». - 2006.-1104 с.:ил.-Парал.тит.англ.

58. Филимонова, Е.М. Разработка методов расчёта и оптимизации систем энергосберегающего управления электромеханическими системами технологического оборудования. автореф. дис. канд. техн. наук. – Москва. - 2014. - 16. с.

59. Елисеев, В.Л. Разработка и исследование нейросетевых алгоритмов управления стационарными и нестационарными объектами. автореф. дис. канд. техн. наук. - Москва, 2012. - 20. с.

60. Буянкин, В.М. Нейроуправление электродвигателями и электроприводами. Переход от классических регуляторов к нейрорегуляторам. – Москва. - 2015. - 156. с.

61. Феоктистов, Н. А. Системотехника и мехатроника технологических машин и оборудования / В. В. Сторожев, Н. А. Феоктистов; под ред. д.т.н., профессора Феоктистова Н. А. — М.: Издательско-торговая корпорация «Дашков и К°». - 2015. — 412 с.

62. Пупков, К.А. Интеллектуальные системы / К.А. Пупков, В.Г. Коньков. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2003. - 348с.

63. Трофимов, В.Б. Интеллектуальные автоматизированные системы / В.Б. Трофимов, С.М. Кулаков. - М.: Инфра-Инженерия. - 2016. - 232 с.: ил.

64. Терехов, В.А. Динамические алгоритмы обучения многослойных нейронных сетей в системах управления / В.А. Терехов // Изв.РАН. Серия Теория и системы управления. - 1996. - №3. - с.70-79

65. Лохин, В.М. Комплексное применение технологий экспертных систем и нейросетевых структур / В.М. Лохин, И.М. Макаров, А.В. Арбузов // Интеллектуальные системы автоматического управления: Сб. науч. Тр. - М.:ФИЗМАТЛИТ. - 2001. - с.179 -198.

66. Чернодуб, А.Н. Обзор Методов Нейроуправления / А.Н.Чернодуб, Д.А. Дзюба // Проблемы программирования. - 2011, No 2. - с. 79-94.

67. Hunt, K.J. Neural Networks for control systems: A survey / K.J. Hunt, D. Sbarbaro, R. Zbikowski, P.J. Gawthrop // Automatica. 1992. – Vol 28. - №6. - p.1083-1112.
68. Терехов, В.А. Нейросетевые системы управления: Учеб. Пособие для вузов / В.А. Терехов, Д.В. Ефимов, И.Ю. Тюкин. - М.: Высш. Шк. 2002. - 183 с. ил.
69. Терехов, В. А. Синтез адаптивных нейросетевых регуляторов нелинейных динамических объектов / В.А. Терехов, И.Ю. Тюкин // В сб. “Стохастическая оптимизация в информатике”, под ред. О. Н. Граничина. Изд-во С.-Петербур. ун-та. 2005. с. 222-256.
70. Wander G. da Silva. Application of Genetic Algorithms to the Online Tuning of Electric Drive Speed Controllers / Wander G. da Silva, Paul P. Acarnley, and John W. Finch // IEEE Transactions of industrial electronics. - VOL. 47. - NO. 1, FEBRUARY. - 2000.
71. Васильев В.И., Ильясов Б.Г. Интеллектуальные системы управления. Теория и практика: учебное пособие / В.И. Васильев, Б.Г. Ильясов. - М.: Радиотехника, 2009. - 392 с., ил.
72. Xingang, Fu. A Novel Neural Network Vector Control Technique for Induction Motor Drive / Fu Xingang // IEEE Transactions on Energy Conversion. – Volume 30. – Issue 4. - Dec. 2015. - p. 1428 – 1437.
73. Yann LeCun, Yoshua Bengio, Geoffrey Hinton. Deep learning / Y. LeCun, Y. Bengio, G. Hinton // Nature 521. - 2015. - p. 436–444.
74. Борисов А.А. Моделирование эксцентриситета валков прокатной клетки и оценка способов его уменьшения САУ / А.А. Борисов // Научные труды ДОН-НТУ. Выпуск 20 (182). с.6-11.