

Карагандинский технический университет

УДК 62-83

На правах рукописи

**КУНТУШ ЕЛЕНА ВИКТОРОВНА**

**Синтез электропривода горизонтального петлевого устройства  
листопрокатного стана с учетом механических свойств стальной полосы**

6D071800 – Электроэнергетика

Диссертация на соискание степени  
доктора философии (PhD)

Научный консультант  
доктор технических наук,  
профессор  
И.В. Брейдо

Зарубежный научный консультант  
доктор технических наук, профессор  
А.М. Зюзев  
(Екатеринбург)

Республика Казахстан  
Караганда, 2021

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ</b> .....	4
<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	7
<b>1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ</b> .....	12
1.1 Описание объекта исследования.....	12
1.1.1 Цех горячего цинкования и алюмоцинкования.....	12
1.1.2 Петлевое устройство.....	14
1.2 Анализ основных технических решений.....	17
1.2.1 Анализ петлевых устройств.....	17
1.2.1.1 Петлевые ямы.....	17
1.2.1.2 Вертикальные петлевые устройства.....	18
1.2.1.3 Горизонтальные петлевые тележки.....	19
1.2.1.4 Кольцевые и спиральные накопители.....	20
1.3 Анализ способов демпфирования упругих колебаний.....	21
1.4 Анализ существующих систем электроприводов холодной прокатки металлургического производства.....	27
1.5 Задачи исследований.....	38
1.6 Выводы по первому разделу.....	39
<b>2 ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ НА АГРЕГАТЕ НЕПРЕРЫВНОГО ГОРЯЧЕГО АЛЮМОЦИНКОВАНИЯ</b> .....	40
2.1 Экспериментальное исследование электропривода горизонтального петлевого устройства.....	40
2.2 Выводы по второму разделу.....	44
<b>3 РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ И ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ПЕТЛЕВОГО УСТРОЙСТВА</b> .....	45
3.1 Разработка математических моделей электромеханической системы горизонтального петлевого устройства.....	45
3.1.1 Математическая модель электропривода постоянного тока горизонтального петлевого устройства.....	45
3.1.2 Описание механических свойств полосы.....	47
3.1.3 Математическая модель механической системы горизонтального накопителя полосы.....	51
3.2 Разработка имитационной модели электромеханической системы горизонтального петлевого устройства.....	61
3.2.1 Методы и средства разработки имитационных моделей.....	61
3.2.2 Имитационная модель системы автоматического регулирования скорости двигателя.....	66
3.2.3 Имитационные модели механической системы горизонтального накопителя полосы.....	68
3.2 Выводы по третьему разделу.....	76

<b>4 СИНТЕЗ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ПЕТЛЕВОГО УСТРОЙСТВА С УЧЕТОМ СВОЙСТВ СТАЛЬНОЙ ПОЛОСЫ.....</b>	<b>78</b>
4.1 Разработка методов управления электроприводом горизонтального петлевого устройства с целью снижения упругих колебаний в электромеханической системе.....	78
4.2 Имитационные эксперименты на модели электропривода горизонтального петлевого устройства с учетом переменной длины стальной полосы.....	87
4.3 Выводы по четвертому разделу.....	94
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....</b>	<b>97</b>
<b>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....</b>	<b>98</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ А – Акт внедрения диссертационной работы в учебный процесс.....</b>	<b>107</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Б – Авторское свидетельство.....</b>	<b>108</b>

## ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

АНГА	– Агрегат непрерывного горячего алюмоцинкования
АСУ ТП	– Автоматизированные системы управления технологическим процессом
ТАУ	– Теория автоматического управления
РС	– Регулятор скорости
РТ	– Регулятор тока
СПА	– Силовой полупроводниковый агрегат
САР	– Система автоматического регулирования
$\gamma$	– Коэффициент инерции
A	– Амплитуда колебаний, м
$f_0$	– Коэффициент затухания
$\beta$	– Коэффициент затухания
$w_0$	– Собственная частота колебаний системы, Гц
w	– Циклическая частота вынуждающей силы, Гц
$F_0$	– Амплитуда силы, Н
m	– Масса, кг
r	– Коэффициент сопротивления среды
$U_3$	– Напряжение задания, В
$U_{PC}$	– Напряжение регулятора скорости, В
$U_{РТ}$	– Напряжение регулятора тока, В
$U_y$	– Управляющее воздействие на входе СПА, В
$e_n$	– ЭДС силового преобразовательного агрегата, В
$i_y$	– Ток якоря двигателя, А
M	– Электромагнитный момент двигателя, Н·м
$M_c$	– Момент статического сопротивления механизма, Н·м
w	– Угловая скорость вращения двигателя, рад/с
$T_\mu$	– Малая постоянная времени преобразователя, с
$k_n$	– Коэффициент усиления СПА в якорной цепи
$T_y$	– Электромагнитная постоянная времени цепи якоря, с
$R_y$	– Активное сопротивление якорной цепи двигателя, Ом
k	– Конструктивная постоянная двигателя
$\Phi$	– Магнитный поток двигателя, Вб
$T_m$	– Инерционная постоянная времени двигателя, с
$W_{РТ}$	– Передаточная функция регулятора тока якоря
$W_{PC}$	– Передаточная функция регулятора скорости
f	– Провисание в середине пролета, м
q	– Интенсивность нагрузки, Н/см
l	– Длина пролета, м
H	– Натяжение, Н
g	– Ускорение свободного падения, м/с <sup>2</sup>
$\rho$	– Плотность полосы, г/см <sup>3</sup>
B	– Ширина полосы, м

$h$	– Толщина полосы, мм
$\sigma_B$	– Предел прочности, кг/мм <sup>2</sup>
$c$	– Жесткость деталей, Н·м/рад
$J_p$	– Полярный момент инерции сечения, см <sup>4</sup>
$G$	– Модуль упругости второго рода, кг/см <sup>2</sup>
$E$	– Модуль Юнга или упругости второго рода, кг/см <sup>2</sup>
$\mu$	– Коэффициент Пуассона или коэффициент поперечной деформации
$M_n, M_{п},$ $M_{дв}$	– Моменты двигателей натяжного ролика, перегибного ролика и тележки петлевого устройства, Н·м
$J_n, J_{p1}, J_{p2},$ $J_{цр}, J_{п}, J_{дв}$	– Моменты инерции натяжного ролика, ролика №1, ролика №2, центрирующего ролика, перегибного ролика, тележки петлевого устройства, кг·м <sup>2</sup>
$c_1, c_2, c_4,$ $c_5$	– Жесткости упругих связей полосы между массами на соответствующих участках, Н·м/рад
$c_3$	– Жесткость упругой связи каната между барабаном тележки и тележкой петлевого устройства, Н·м/рад
$\varphi_n, \varphi_{p1},$ $\varphi_{p2}, \varphi_{цр},$ $\varphi_{п}, \varphi_{дв}$	– Вращательные перемещения натяжного ролика, ролика №1, ролика №2, центрирующего ролика, перегибного ролика, тележки петлевого устройства, м
$\varphi_1, \varphi_2$	– Зазоры, м
$w_n, w_{p1},$ $w_{p2}, w_{цр},$ $w_{п}, w_{дв}$	– Скорости вращения натяжного ролика, ролика №1, ролика №2, центрирующего ролика, перегибного ролика, тележки петлевого устройства, рад/с
$M_{12}, M_{23},$ $M_{34}, M_{45},$ $M_{56}, M_{67}$	– Моменты упругих сил, Н·м
$b_{12}, b_{23},$ $b_{24}, b_{45}$	– Коэффициенты демпфирования
$R_{рол}$	– Радиус роликов, м
$V$	– объем полосы, см <sup>3</sup>
$b$	– Коэффициент внутреннего вязкого трения, $\frac{Н \cdot м \cdot с}{рад}$
$\lambda$	– Логарифмический декремент затухания
$e$	– Податливость, $\frac{рад}{Н \cdot м}$
$\bar{\varepsilon}$	– Средняя ошибка аппроксимации, %
$y_i$	– Значение параметра по отклику модели
$y_x$	– Номинальное значение параметра
$n$	– Количество измерений
$s$	– Площадь поперечного сечения, м <sup>2</sup>
$T_n$	– Постоянная времени интегрирования, с
$k_{ос}$	– Коэффициент обратной связи по скорости, В/рад/с
$k_{от}$	– Коэффициент обратной связи по току, В/А
$\beta_\epsilon$	– Модуль жесткости статической механической характеристики в разомкнутой системе

$T_{\text{офт}}$	– Постоянная времени фильтра в цепи обратной связи по току, с
$T_{\text{офс}}$	– Постоянная времени фильтра в цепи обратной связи по скорости, с
$M_{\text{дин}}$	– Динамический момент, Н·м
$J_{\Sigma}$	– Суммарный момент инерции электропривода, кг·м <sup>2</sup>
$a_{\mu c}$	– Коэффициент настройки
$c$	– Коэффициент ЭДС и электромагнитного момента двигателя при номинальном потоке возбуждения
$T_{\mu c}$	– Суммарная малая постоянная времени, с
$p$	– Оператор Лапласа
$J_0$	– Удельный момент инерции, $\frac{\text{кг}\cdot\text{м}^2}{\text{м}}$
$a$	– Передаточная функция регулятора скорости
$b$	– Коэффициент зависимости момента инерции от длины
$k_{\text{осп}}$	– Коэффициент обратной связи по производной скорости
$k_{\text{вз}}$	– Коэффициент взаимосвязи между $k_{\text{осп}}$ и длиной полосы $l$
$v$	– Скорость продольной упругой волны, м/с

## ВВЕДЕНИЕ

### **Актуальность работы.**

Горно-металлургическая отрасль представляет собой стратегическую отрасль экономики страны, роль которой состоит в обеспечении сырьем производства высокотехнологичной и наукоемкой конечной продукции (машиностроения, стройиндустрии, авиационной, космической и оборонной промышленности). Горно-металлургическая отрасль – наиболее динамично развивающийся сектор промышленности страны, важнейшая составляющая экономики Казахстана [1, 2].

На долю металлургической промышленности приходится свыше 35% всего объема обрабатывающей промышленности [1].

Опыт комплексной автоматизации предприятий черной и цветной металлургии убедительно доказывает, что эффективное развитие металлургического комплекса, а также значительное повышение конкурентоспособности и качества металлопродукции на мировом рынке требуют глубокого совершенствования автоматизированных и автоматических систем получения и дальнейшей обработки информации о ходе технологических процессов. А современные тенденции развития промышленной автоматизации в металлургии характеризуются широким применением информационных технологий [3].

В настоящее время в металлургическом производстве широко применяются непрерывные прокатные станы. На них прокатывают основное количество листовой продукции, так как непрерывные листовые станы являются наиболее производительными. Наиболее ярко проявляются достоинства непрерывных станов холодной прокатки при прокатке больших партий полос одного размера [4].

Упругие деформации звеньев механических конструкций и передач являются одним из факторов, препятствующих повышению эффективности управления электромеханическими объектами и подлежащих подавлению средствами управления. Многостепенные упругие электромеханические объекты характеризуются тем, что упругие колебания возбуждаются в них при любой попытке реализовать предельное быстродействие, что приводит к снижению качественных показателей объектов, их повышенному износу, поломкам и авариям, тормозит рост их производительности [5].

Проблемы построения и оптимизации взаимосвязанных электроприводов технологических линий привлекают к себе широкое внимание специалистов. Указанные вопросы решались многими учеными. В трудах Г.М. Иванова, В.Д. Барышникова, Ю.А. Борцова, Н.Н. Дружинина, А.В. Башарина, В.И. Ключева, Л.Н. Рассудова, В.Н. Мядзеля, Л.Г. Лимонова, И.В. Брейдо, Г.А. Сивяковой, О.А. Ющенко и других разработаны вопросы теории взаимосвязанных электромеханических систем с упругими связями, определены основные пути их анализа и синтеза [2, с. 124; 6].

В то же время не разработаны адекватные математические модели взаимосвязанных через обрабатываемый металл с изменяющейся упругостью многодвигательных электроприводов подобных агрегатов, в существующих многомассовых моделях не учитывается изменение масс элементов, при построении систем автоматического управления такими приводами не предполагается возможность изменения настройки параметров системы регулирования при изменении свойств полосы. Не установлены также взаимосвязи между технологическими параметрами обработки полосы, ее свойствами и параметрами системы автоматического регулирования электропривода [2, с. 124; 6, с. 10].

Петлевые накопители горизонтального типа являются устройствами, состоящими из поступательно (тележки) и вращательно (барабаны, лебедки) движущихся масс, механическая связь между которыми осуществляется гибкими элементами (полосой, канатами). Динамика такой системы неблагоприятна и проявляется при постоянно повторяющихся режимах подачи и извлечения полосы. Рывки натяжения в параллельных ветвях полосы проявляются особенно в двигательном режиме при наборе полосы в петлевое устройство, а также в режиме задания пониженного натяжения в процессе сварки полосы в головной части агрегата, и являются одними из основных причин ее значительных вертикальных колебаний. Колебания стальной полосы в накопителе вызывают раскачивание печи термохимической обработки, расположенной над накопителем, охладителя и сказываются неблагоприятно на работе всего агрегата в целом. Неблагоприятная динамика полосы отрицательно сказывается на механической прочности элементов агрегата. Значительные колебания могут стать причиной обрыва нагретой полосы в печи термохимической обработки. Опасность обрыва полосы и связанного с ним длительного простоя сдерживают рост величины ускорения полосы и, в конечном счете, рост пропускной способности петлевого устройства, особенно для толстых полос.

Решить существующую проблему можно с помощью адаптивного подхода к совершенствованию автоматизированного электропривода, в связи, с чем тема диссертационной работы актуальна и обоснована.

**Целью данной работы является:** повышение производительности листопркатного стана за счет уменьшения динамических нагрузок и колебательности полосы металла в горизонтальном петлевом устройстве с помощью адаптивного электропривода.

**Объектом исследования** в работе является электромеханическая система горизонтального петлевого устройства [7].

**Идея работы** состоит в разработке адаптивной системы управления электроприводом горизонтального петлевого устройства листопркатного стана, обеспечивающей демпфирование механических колебаний в полосе путем повышения чувствительности системы за счет введения обратной связи по производной скорости промежуточного второго ролика и изменения

коэффициента усиления регулятора в функции, изменяющегося в процессе работы накопителя массы полосы металла [8].

**Научная проблема** заключается в необходимости исследования и создания систем управления электроприводами горизонтальных петлевых устройств, учитывающих изменяющуюся массу полосы и ее упругие свойства

#### **Решаемые задачи**

Анализ основных направлений исследований, способов и методов демпфирования упругих колебаний в электромеханических системах.

Экспериментальные исследования колебательных процессов в полосе металла в горизонтальном петлевом устройстве.

Разработка математической и имитационной моделей электромеханической системы горизонтального петлевого устройства.

Разработка адаптивной системы управления электроприводом горизонтального петлевого устройства.

Имитационное моделирование электромеханической системы горизонтального петлевого устройства с адаптивной системой демпфирования колебательных процессов в полосе металла [9].

#### **Научная новизна**

Разработаны математические модели многомассовой электромеханической системы горизонтального петлевого устройства, учитывающие изменение массы, жесткости, длины и провиса полосы в процессе его работы.

Предложена структура системы управления электроприводом горизонтального петлевого устройства, с введением корректирующего устройства и обратной связи по производной скорости второго ролика [8, с. 126].

Предложена структура и осуществлено параметрирование адаптивного регулятора, обеспечивающего автоматическое изменение его коэффициента усиления в процессе работы горизонтального петлевого устройства при изменении длины полосы и массы металла [7, с. 99].

**Практическая значимость** полученных результатов заключается в:

- разработке комплекса технических решений для демпфирования колебаний в стальной полосе;
- разработке структурной схемы регулятора с переменным коэффициентом усиления.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

Математические и имитационные модели электромеханической системы горизонтального петлевого устройства с электроприводом постоянного тока, учитывающие изменяющуюся длину полосы и изменение длины полосы и массы металла в процессе работы горизонтального петлевого устройства.

Структура адаптивной системы регулирования электропривода горизонтального петлевого устройства, содержащей обратную связь по производной скорости промежуточного второго ролика и адаптивный регулятор с изменением его коэффициента усиления в функции длины

заполнения горизонтального петлевого устройства.

**Предполагаемое внедрение.** Рекомендации будут переданы в соответствующие проектные институты металлургической промышленности СНГ. Основные теоретические положения и результаты исследований, изложенные в диссертационной работе, внедрены в учебный процесс в Карагандинском индустриальном университете на кафедре «Энергетика» факультета «Энергетика, транспорт и системы управления» (Приложение А).

**Обоснование и достоверность результатов и выводов.**

Обоснованные и достоверные выводы и результаты диссертации основаны на использовании апробированных методов теории электропривода, механики, имитационного моделирования, применением пакетов прикладных программ Matlab/Simulink. Научные положения, результаты и выводы подтверждены путем сравнения адекватности материалов аналитических исследований и имитационного моделирования с данными промышленных экспериментов.

**Методы исследования.**

Для решения поставленных задач в работе использовались методы теории электропривода, механики, математической физики. Математические модели электромеханической системы горизонтального петлевого устройства созданы на базе теоретических разработок Ключева В.И., Сандлера А.С., Башарина А.В., Чиликина М.Г., Шрейнера Р.Т., Зюзева А.М. Имитационные исследования выполнены в пакете прикладных программ Matlab.

Адекватность полученных результатов подтверждена сравнением результатов экспериментальных исследований и имитационного моделирования процессов в электромеханической системе горизонтального накопителя и их хорошей сходимостью.

**Апробация работы.**

Основные материалы и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на:

- научно-техническом совете КарГТУ;
- научно-техническом совете кафедры АПП КарГТУ;
- международном симпозиуме «Информационные и системные технологии в индустрии, образовании и науке» (Караганда, 2006);
- международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы горно-металлургического комплекса Казахстана (Караганда, 2007);
- международном симпозиуме «Информационно-коммуникационные технологии в индустрии, образовании и науке» (Караганда, 2012);
- международной научно-практической конференции «Наука и образование – ведущие факторы стратегии «Казахстан – 2052» (Сагиновские чтения №5) (Караганда, 2013);
- X международной научно-практической конференции «Научная индустрия европейского континента» (Прага, 2014);
- IX международной научно-практической конференции «Третья модернизация Казахстана – новые концепции и современные решения»,

посвященной 50-летию юбилею выпуска 1967 года – выпуска Первого Президента Республики Казахстан Нурсултана Абишевича Назарбаева (Темиртау, 2017);

– международной научно-практической конференции «Интеграция науки, образования и производства – основа реализации Плана нации» (Сагиновские чтения № 10) (Караганда, 2018);

– X международной научно-практической конференции «Конкурентоспособность нации - основное условие повышения благосостояния народа», посвященной 55-летию юбилею Карагандинского государственного индустриального университета (Темиртау, 2018);

– международной научно-практической конференции «Интеграция науки, образования и производства – основа реализации Плана нации» (Сагиновские чтения №11) (Караганда, 2019);

– XVI международной научно-практической конференции «Научный прогресс на рубеже тысячелетий – 2020» (Прага, 2020).

**Основные научные результаты** докторской диссертации опубликованы в 20 научных трудах, в том числе 2 публикации в изданиях, входящих в информационную базу компании Scopus, 6 публикаций в изданиях, рекомендованных комитетом по контролю в сфере образования и науки Министерства образования и науки Республики Казахстан, 10 публикаций в международных научно-практических конференциях, в том числе 2 зарубежных. Получено 1 свидетельство о внесении сведений в государственный реестр прав на объекты, охраняемые авторским правом №247 от 22.10.2018 г. (Приложение Б).

#### **Объём и структура диссертации**

Диссертационная работа состоит из содержания, обозначений и сокращений, введения, 4 разделов, заключения, списка использованных источников, 2 приложений. Основной текст работы изложен на 108 страницах машинописного текста, содержит 35 рисунков, 7 таблиц, список использованных источников из 138 наименований.

# 1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

## 1.1 Описание объекта исследования

### 1.1.1 Цех горячего цинкования и алюмоцинкования

Акционерное общество «АрселорМиттал Темиртау» является крупнейшим предприятием горно-металлургического сектора Республики Казахстан и представляет собой интегрированный горно-металлургический комплекс с собственным углем, железной рудой и энергетической базой [10].

В состав АО «АрселорМиттал Темиртау» входят [10]:

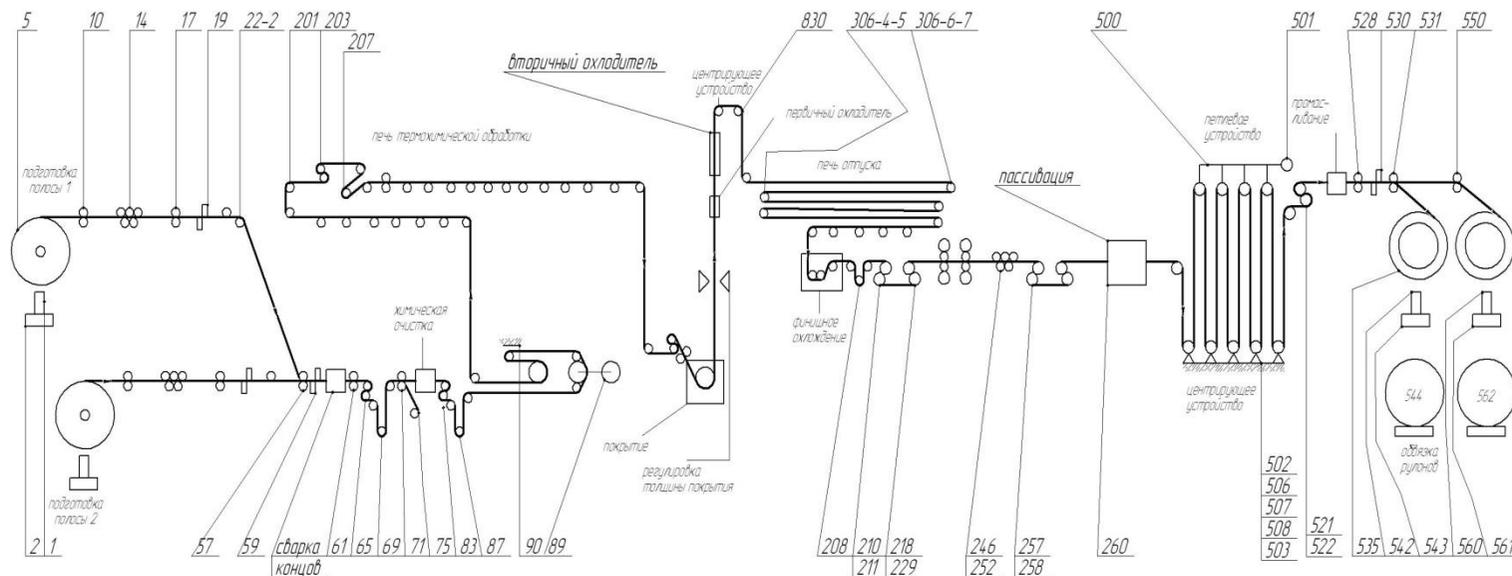
- стальной департамент;
- угольный департамент;
- железорудный департамент.

Предприятие специализируется на производстве плоского и сортового проката, в том числе с полимерным, цинковым и алюмоцинковым покрытием, а также производит агломерат, концентрат, кокс, чугун, сталь, в т.ч. непрерывнолитые слябы, штрипс, лонжеронную полосу, электросварные трубы и сопутствующую продукцию доменного и коксохимического производств [10].

Цех горячего цинкования и алюмоцинкования (листопрокатный цех №4), производит прокат с цинковым и алюмоцинковым покрытием и окрашенный прокат. Исходным материалом для производства профилированного металла являются холоднокатаные стальные полосы.

Агрегат непрерывного горячего алюмоцинкования является непрерывным станом. Он состоит из трех частей: непрерывной средней части и дискретных головной и хвостовой частей. В средней технологической части осуществляется технологический процесс нанесения покрытия. Для связи непрерывной и дискретных частей на агрегате предназначены петлевые устройства.

На рисунке 1.1 приведена технологическая схема агрегата непрерывного горячего алюмоцинкования.



Головная часть агрегата, мех: 1(32) – подъем столов; 2(33) – перемещение тележек; 5(36) – разматыватель; 10(41) – задающее устройство; 14(45) – правильные машины; 17(48) – подающие ролики; 19(50) – летучие ножницы; 22-2(53-2) – подача некондиции; 57 – подающие ролики; 59 – гильотинные ножницы; 61 – подающие ролики; 65 – тянущие ролики; 69 – устройство центрирования химической очисткой; 71 – дисковые ножницы; 75 – кромкоматалка; 93, 94 – тянущие ролики; 97 – устройство центрирования перед петлевым устройством; 99 – петлевое устройство; 90 – устройство центрирования; Средняя часть агрегата, мех: 201 – центрирование перед печью; 203 – тянущие ролики; 207 – механический регулятор натяжения; поз.: 303 – входной роликовый затвор; 110 – центрирующее устройство после печи ТХО; 120 – тянущие s-ролики; 130 – входной роликовый затвор; 550 – воздушные ножи; 840 – первичное охлаждение; 820 – вторичное охлаждение; 830 – центрирующее устройство; мех.: 306 – тянущие ролики печи ОТП; 308 – поддерживающие ролики печи ОТП; 208 – центрирующее устройство; 210, 211 – тянущее устройство 4; 214, 215 – тянущее устройство 5; 218, 229 – дрессировочные клетки 1, 2; 246, 252 – машина правки полосы изгибом с растяжением; 253, 254 – тянущее устройство 6; 257, 258 – тянущее устройство 7; Хвостовая часть агрегата, мех.: 901 – натяжное устройство; 502, 503 – ведущие ролики 3, 7 ПУ2; 506 – устройство центрирования в ПУ2 на ролике 1; 507 – устройство центрирования в ПУ2 на ролике 5; 508 – устройство центрирования в ПУ2 на ролике 9; 521, 522 – тянущие ролики 8; 528 – подающие ролики 5; 530 – летучие ножницы; 531 (550) – протягивающие ролики 1, 2; 535 (550) – моталка 1, 2; 544 (562) – обвязка рулонов 1, 2; 549 – ленточный транспортер; 542 (560) – подъем столов; 543 (561) – перемещение тележек

Рисунок 1.1 – Технологическая схема

### 1.1.2 Петлевое устройство

Петлевое устройство агрегата непрерывного горячего алюмоцинкования (АНГА) предназначено для создания запаса полосы, обеспечивающего непрерывную работу средней технологической части в период сварки концов полос [8, с. 126].

Петлевое устройство включает: петлеобразующую тележку с приводом, центрирующий ролик, поддерживающие поворотные ролики, отклоняющие и перегибные ролики (рисунок 1.2).

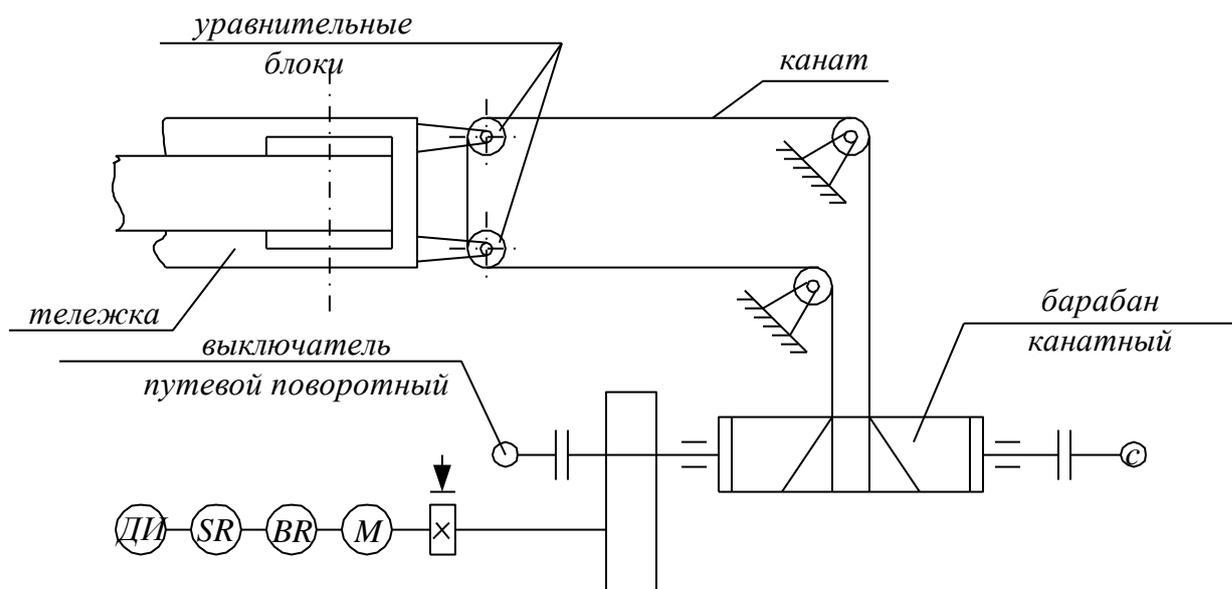


Рисунок 1.2 – Привод петлевого устройства

Петлеобразующая тележка, с установленными на ней двумя холостыми роликами, совместно с центрирующим роликом и перегибными роликами, установленными на входе и выходе полосы из петлевого устройства, предназначены для образования двух петель полосы в петлевом устройстве.

Поддерживающие поворотные ролики и стационарные поддерживающие ролики предназначены для поддержания движущейся полосы при транспортировке ее через петлевое устройство, причем поддерживающие поворотные ролики устанавливаются в рабочее или исходное положение самой петлеобразующей тележкой при перемещении ее около поддерживающих роликов. Последовательная установка роликов в рабочее положение происходит при перемещении тележки в сторону заполнения петлевого устройства, возврат в исходное положение – при перемещении тележки в противоположную сторону.

Центрирующий ролик предназначен для центрирования полосы в петлевом устройстве.

Непрерывная работа агрегата в период сварки полосы в головной части агрегата обеспечивается запасом полосы в петлевом устройстве, поэтому перед сваркой полосы петлевое устройство заполняется полосой.

Заполнение петлевого устройства полосой осуществляется за счет

превышения скорости движения полосы в головной части агрегата над скоростью движения полосы в средней технологической части агрегата.

При заполнении петлевого устройства между парой поддерживающих роликов, поворачивает их в рабочее положение, при этом ролики подводятся под полосу (оси роликов устанавливаются перпендикулярно к оси агрегата). Поворот поддерживающих роликов осуществляется путем воздействия профилированных линеек, закрепленных на раме тележки, на поворотные рычаги поддерживающих роликов (рисунок 1.3).

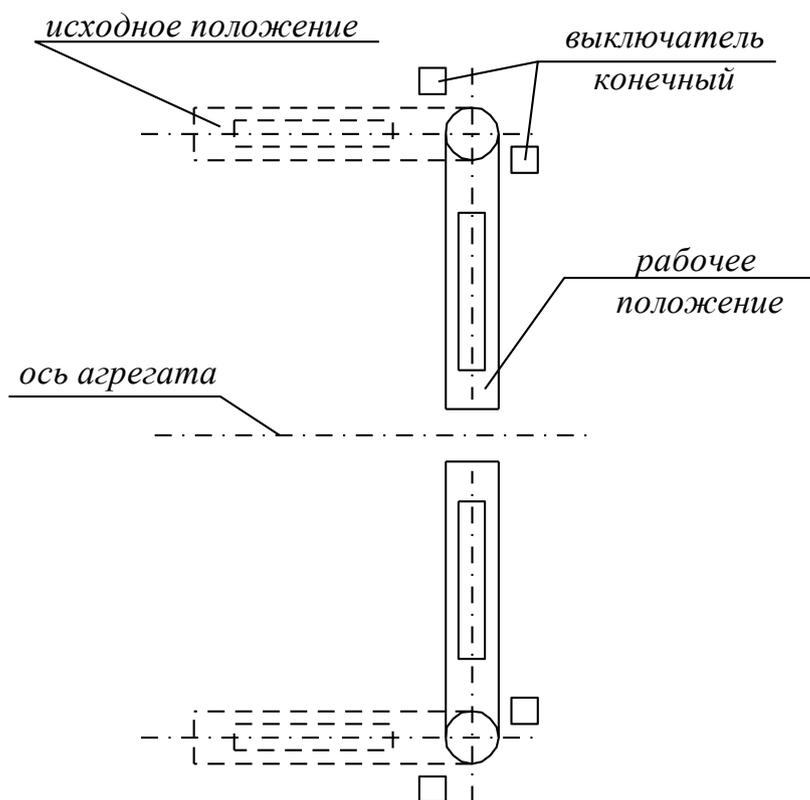


Рисунок 1.3 – Кинематическая схема поддерживающих роликов

В петлевом устройстве предусмотрено 4 зоны синхронизации. Четвертая зона соответствует полностью заполненному петлевому устройству, остальные 3 зоны расположены равномерно вдоль петлевого устройства на расстоянии 24,26 м одна от другой. Ось первой зоны синхронизации расположена на расстоянии 16,8 м от оси центрирующего устройства (рисунок 1.4).

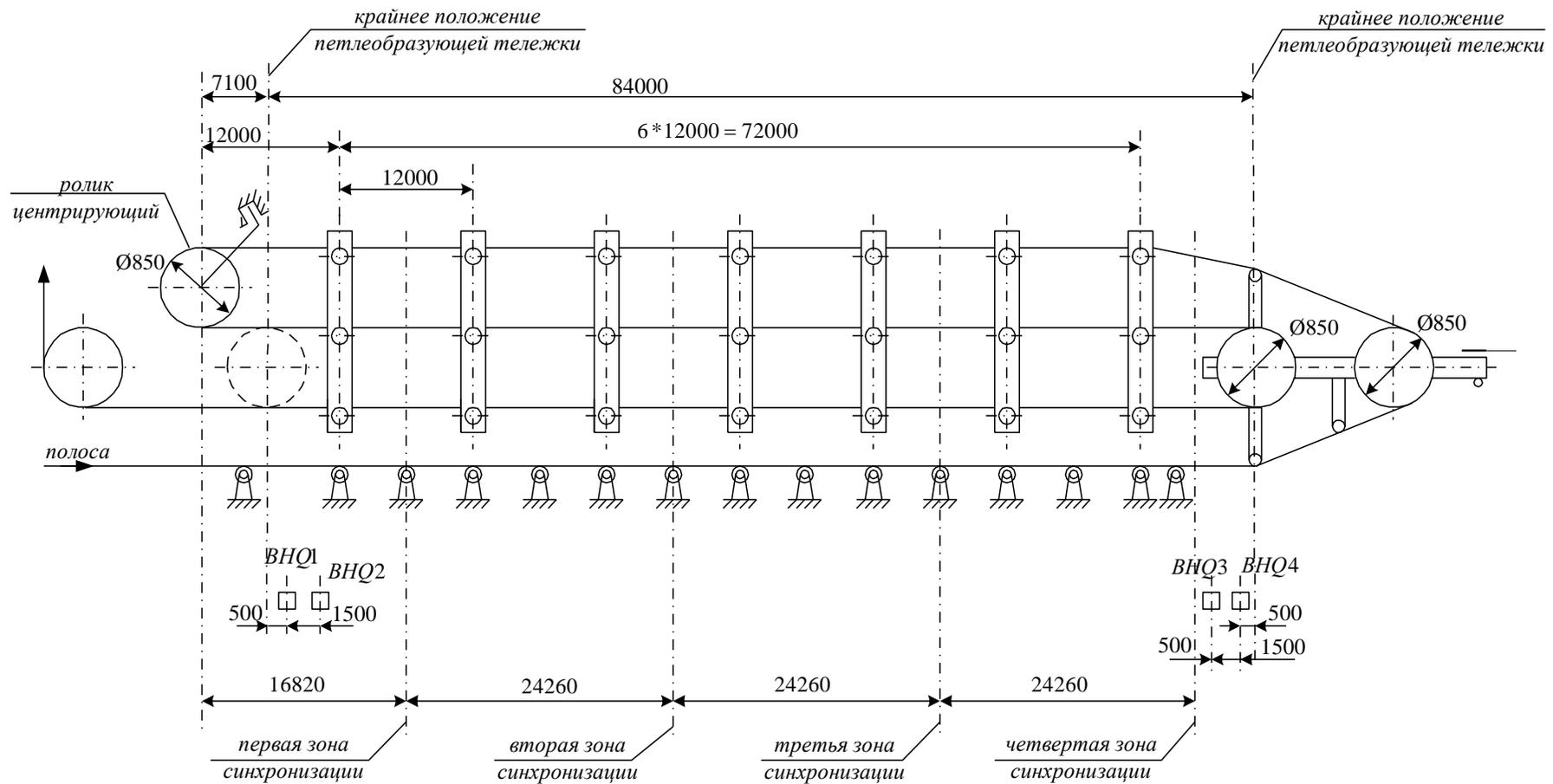


Рисунок 1.4 – Кинематическая схема петлевого устройства

## 1.2 Анализ основных технических решений

### 1.2.1 Анализ петлевых устройств

Современные высокоскоростные линии обработки полосы требуют дополнительных устройств, создающих запас металла для обеспечения непрерывной работы линии. В цехах холодной прокатки полосы содержатся непрерывные линии травления, цинкования, электролитического лужения, отжига и резки [2, с. 124; 11].

При непрерывном движении полосы с постоянной скоростью через технологическую часть линии возникает необходимость остановки головной или хвостовой части агрегата для сварки концов рулонов, вырезки сварного шва, установки рулона на разматыватель и снятия рулона с моталки после обработки на линии [2, с. 124; 11, с. 5].

В настоящее время в головной и хвостовой частях агрегата устанавливаются устройства, обеспечивающие запас полосы на время сварки, а также установку и снятие рулона. Такими устройствами являются петлевые ямы со свободно провисающей петлей, вертикальные петлевые башни, горизонтальные петлевые тележки, кольцевые и спиральные накопители полосы [2, с. 124; 11, с. 5].

#### 1.2.1.1 Петлевые ямы

Для непрерывной работы непрерывно-травильных агрегатов между сварочной машиной и травильными ваннами полоса укладывалась петлями непосредственно на полу цеха. В дальнейшем для этих целей применили специально построенную в полу цеха яму, внутри облицованную деревом для предохранения полосы от повреждений (рисунок 1.5). Петли в яме располагаются горизонтально, и полоса постепенно вытягивается тянущими роликами в травильные ванны [11, с. 5; 12].

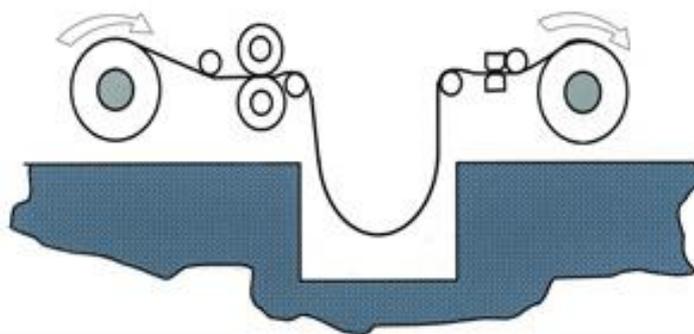


Рисунок 1.5 – Петлевая яма

На полосе могут появиться царапины, складки от давления верхних петель. С увеличением скорости сброса полосы увеличивается длина и площадь ямы [11, с. 5; 12, с. 6].

Петлевая яма имеет ряд преимуществ: полоса может поступать в яму с большой скоростью, создается большой запас полосы, относительно небольшая

стоимость ее сооружения [11, с. 6; 12, с. 6].

При проектировании новых цехов холодной прокатки полосы петлевые ямы и свободно провисающие петли не используются, т.к. накопители этого вида обладают рядом существенных недостатков и не удовлетворяют возросшим скоростям движения полосы в основном технологическом процессе [11, с. 6; 12, с. 6].

### 1.2.1.2 Вертикальные петлевые устройства

С увеличением скорости движения полосы в основном технологическом процессе (в агрегатах отжига, травления, лужения и цинкования) необходимо увеличение запаса полосы на время вынужденных остановок для сварки, смены рулона и т.д. С этой целью в головной и хвостовой частях агрегатов устанавливаются петлевые устройства вертикального типа с неподвижными верхними роликами и движущейся нижней кареткой или с неподвижными нижними роликами и движущейся верхней кареткой (рисунок 1.6) [11, с. 8; 12, с. 7].

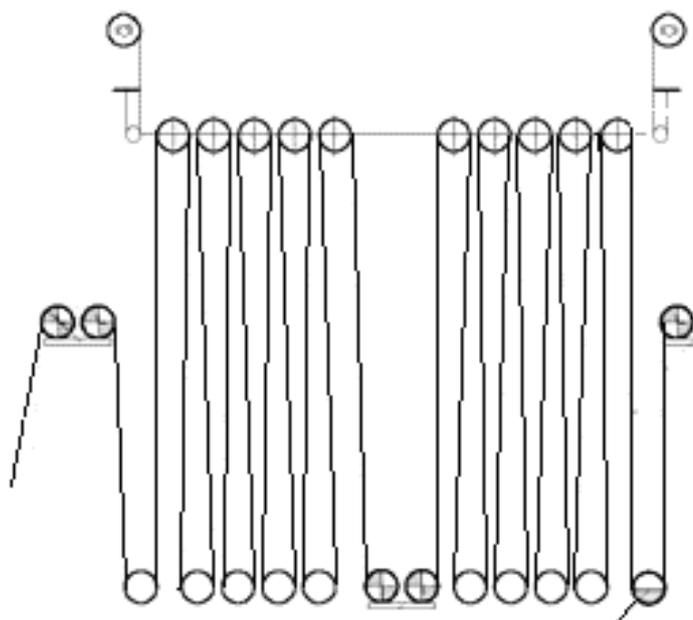


Рисунок 1.6 – Вертикальное петлевое устройство

Вертикальные петлевые устройства характеризуются малой протяженностью оборудования, большой вместимостью полосы (от 2 до 24 петель), постоянным натяжением ветвей, малой опасностью повреждения кромок полосы. В то же время эти устройства имеют ряд недостатков: большая высота оборудования, мешающая работе кранов; значительная стоимость механического оборудования; необходимость дополнительных натяжных устройств; трудность заправки полосы при большом количестве петель; многократность изгибов полосы при прохождении через большое количество направляющих роликов, которые должны иметь разные скорости. Это вызывает необходимость применения сложной регулирующей аппаратуры. Применение

холостых направляющих роликов для поддержания полосы нежелательно, так как при разгоне и торможении происходит проскальзывание полосы, а это приводит к появлению дефектов на ее поверхности [11, с. 8; 12, с. 7; 13-18].

Вертикальные петлевые устройства занимают малую площадь в цехе, обладают большим запасом полосы и устанавливаются с оборудованием, которое имеет значительную высоту.

### 1.2.1.3 Горизонтальные петлевые тележки

Тележки устанавливают при наличии длинной горизонтальной печи для отжига или длинных травильных ванн. Эти установки оправдывают себя, если они связаны с другими устройствами большой протяженности. Горизонтальные петлевые тележки характеризуются относительно малой высотой; требуется мало роликов при ходе тележки на несколько десятков метров; легко обеспечивается постоянство натяжения полосы (рисунок 1.7). Недостатком таких устройств являются большая длина; сложная конструкция поддерживающих роликов, которые необходимо отводить в сторону при прохождении петлевой тележки; более сложное, чем в башенных устройствах, направление полосы [11, с. 12; 12, с. 8].

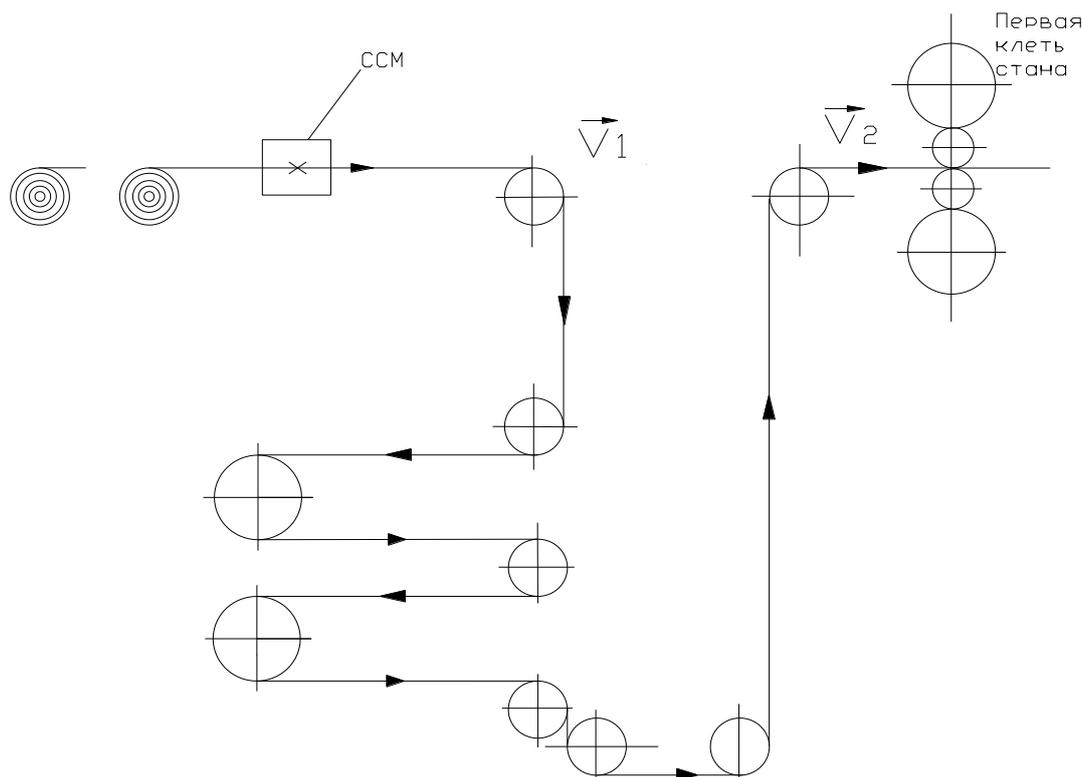


Рисунок 1.7 – Горизонтальное петлевое устройство

Горизонтальные петлевые устройства обладают большим запасом полосы и используются в агрегатах отжига, травления и других, где длина расположения оборудования значительна. Эти устройства могут быть установлены под технологическим оборудованием или над ним [11, с. 12; 12, с. 6; 16, с. 112; 19, 20].

Вместе с тем, в процессе работы накопителя при изменении степени заполнения ее металлом возникают колебания полосы вплоть до ее схлопывания.

#### 1.2.1.4 Кольцевые и спиральные накопители

Дальнейшее развитие петлевых устройств и накопителей полосы было направлено по пути уменьшения их габаритных размеров. Петлевые ямы, вертикальные и горизонтальные петлевые устройства занимают большую площадь в цехе. С целью увеличения емкости накопителя и уменьшения габаритных размеров были созданы кольцевые и спиральные накопители полосы [12, с. 7; 13].

На рисунке 1.8 приведен спиральный накопитель полосы.

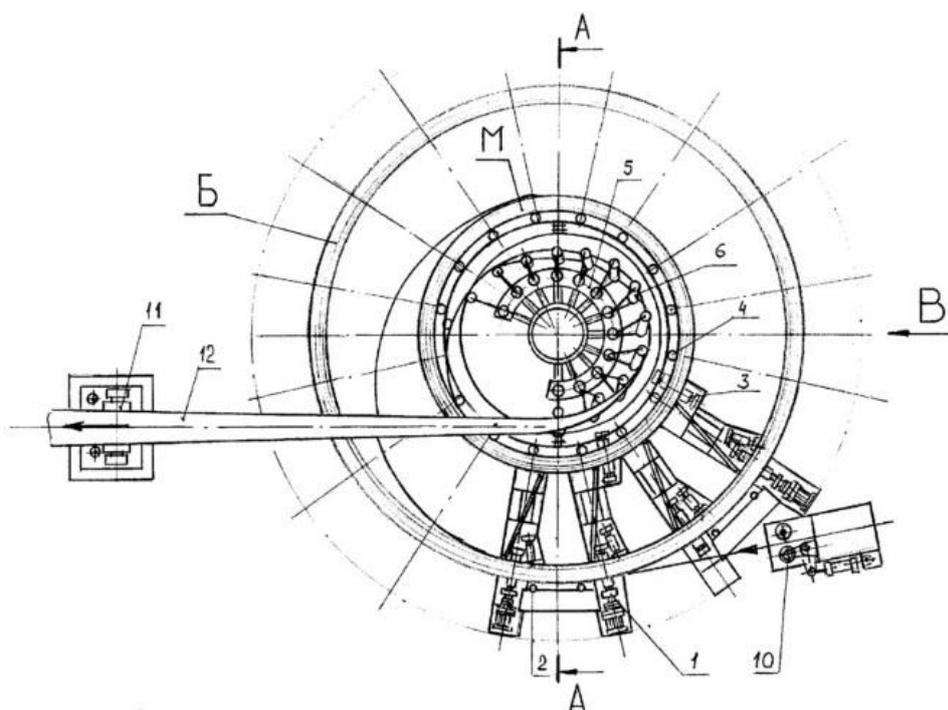


Рисунок 1.8 – Спиральный накопитель полосы

Недостатками этих устройств являются: при использовании полос из сталей с повышенными механическими свойствами диаметр снимающего ролика, установленного на внутренней роликовой проводке, не обеспечивает необходимый радиус изгиба полосы при ее упругопластической деформации вокруг поверхности ролика и поэтому выводимая из накопителя полоса трется своей боковой поверхностью о корпус внутренней роликовой проводки, поэтому требуются дополнительные усилия для извлечения ее из накопителя, что требует установки на тянущих роликах более мощных двигателей, но при этом не исключается возможность повреждения боковой поверхности полосы в виде глубоких царапин или рисок, а это снижает качество выпускаемой продукции. Другим недостатком является интенсивный износ поверхностей бочек несущих роликов, который происходит при извлечении полосы из

накопителя, потому что все витки большого наружного кольца должны вращаться в сторону извлечения, одновременно поднимаясь, перемещаться по наклонной поверхности бочек роликов к центру до неподвижной внутренней роликовой проводки. Интенсивный износ поверхности бочек несущих роликов снижает не только показатель ремонтной пригодности машины, но и портит кромку полосы [14, с. 11; 21, 22].

Эти накопители обладают малыми габаритными размерами и большим запасом полосы [12, с. 7].

В современном металлургическом производстве петлевые ямы уже не применяются, т.к. в них велика вероятность механического повреждения стальной полосы. Для вертикальных петлевых устройств требуются высокие производственные помещения для их установки. Также в вертикальных накопителях сложный процесс заправки полосы в случае ее обрыва. Спиральные накопители обладают высокой стоимостью и конструктивной сложностью. Одним из недостатков горизонтальных накопителей является необходимость применения убираемых опорных роликов, поддерживающих горизонтальные ветви полосы. Горизонтальные петлевые устройства обладают большой протяженностью, но их удобно располагать рядом с оборудованием большой длины. Но в случае с агрегатом непрерывного алюминирования и цинкования петлевое устройство находится под протяженной печью термохимического отжига. Большая длина петлевого устройства является одной из причин сложной динамики электромеханической системы.

Однако, и спиральным и вертикальным накопителям присущи свои недостатки, особенно проявляющиеся для широких и толстых полос – поэтому накопители горизонтального типа способны успешно с ними конкурировать. Накопители горизонтального типа успешно применяются на производствах ближнего и дальнего зарубежья, например: ПАО «Уралмашзавод», ОАО «Выксунский метзавод», ОАО «Новолипецкий металлургический комбинат», ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (Россия), Nippon Kokan, Hitachi Ltd. (Япония), Voestalpine AG (Австрия) и т.д.

### **1.3 Анализ способов демпфирования упругих колебаний**

Задача, которую необходимо решить при модернизации электропривода горизонтального петлевого устройства – это подавление упругих колебаний в электромеханической системе, которые приводят к схлопыванию полосы в устройстве [8, с. 128].

Выявление наиболее рациональных методов достижения минимума колебательности в электромеханических системах с упругими связями дает возможность с минимальными затратами улучшить качество переходных процессов и тем самым продлить срок службы оборудования.

Достаточно много работ в научном сообществе посвящено поиску решения этой проблемы [23-27].

Существуют различные методы демпфирования упругих колебаний в электромеханических системах [28]:

- 1) технологические (за счет управления технологическим процессом);
- 2) конструктивные (основаны на выборе оптимальных конструктивных параметров в процессе проектирования приводов);
- 3) введение в систему дополнительных демпфирующих устройств (гидравлических, пневматических, механических, на основе пар трения);
- 4) электротехнические (электромеханический, электродинамический).

Рассмотрим эти способы:

*1) технологические:*

В настоящее время единственным широко используемым на практике способом борьбы с резонансной вибрацией как на отечественных станах, так и за рубежом, является снижение скорости прокатки, что уменьшает амплитуду колебаний, но снижает при этом среднюю рабочую скорость стана. Хотя известно, что и увеличение скорости прокатки также может устранять фрикционные колебания, но из опасения вызвать обрыв полосы такой метод на прокатных станах в настоящее время не применяют [8, с. 127; 25, с. 232; 28, с. 141].

Применение пониженных уровней натяжения и режима обжатий приводит к ослаблению связей через полосу, посредством которых происходит передача энергии колебаний между клетями. Однако применение этого приема связано с технологическими ограничениями [8, с. 127; 25, с. 232, 28, с. 142; 29].

*2) конструктивные:*

Практически всегда имеется возможность изменять параметры электромеханической системы в процессе проектирования или наладок приводов. Из всех параметров для конструктора интерес представляют те, сочетания которых обеспечат возможный максимум демпфирования упругих колебаний [8, с. 127; 30].

В общем случае целесообразно варьировать ту или иную жесткость элементов механической передачи, устанавливая определенный требуемый диапазон собственных частот двухмассовой электромеханической системы. При варьировании величины жесткости связей упругой механической передачи необходимо принимать во внимание, что это может повлиять на выполнение условий прочности передач и срок их службы [8, с. 127; 30, с. 23].

В нужном направлении возможно изменять и коэффициент распределения инерционных масс  $\gamma$  за счет выбора передаточного числа редуктора и номинальной скорости электродвигателя, а также значений моментов инерции элементов привода. Выбор конструктором величины дискретных масс привода ограничивается определенными (каталожными) значениями моментов инерции роторов двигателей, редукторов, муфт, шкивов и т.д. [8, с. 128; 27, с. 263; 30, с. 23; 31].

При оптимизации электромеханической системы очень часто пределы варьирования дискретных масс ротора двигателя, передаточного механизма и рабочего органа машины значительно меньше, чем в случае изменения жесткости элементов [8, с. 128; 30, с. 23].

Возможности применения конструктивных методов для действующих механизмов и агрегатов весьма ограничены, т.к. не всегда является возможной замена существующего оборудования. При этом необходимо учитывать, что горизонтальное петлевое устройство является не двухмассовой системой, а многомассовой. В процессе работы устройства изменяются практически все его параметры, и выбрать из стандартного ряда необходимые величины не представляется возможным [8, с. 129].

*3) введение в систему дополнительных демпфирующих устройств:*

При наличии упругих связей в кинематике электропривода традиционно применяют механическое демпфирование скорости рабочего органа или идут на заведомое снижение быстродействия контура регулирования скорости электродвигателя в два и более раз по сравнению с системой без упругих связей [8, с. 129; 32].

Активное воздействие на вибрацию периодическим усилием в клети является достаточно перспективным с точки зрения устранения резонансных вибраций за счет противофазных вынужденных колебаний одной из масс на резонансной частоте электромеханической системы. Воздействие прикладывается к любому из колеблющихся элементов [8, с. 129; 25, с. 233; 33].

В различных вариантах конструкторами-механиками в приводах машин и агрегатов применяются механические демпфирующие устройства, которые, как правило, сложны в изготовлении и наладке, требуют очень тщательного ухода при эксплуатации [30, с. 68].

При этом применение демпфирующих устройств ограничено для регулируемых электроприводов в связи с тем, что с изменением скорости изменяются и параметры колебаний, в том числе и частота.

*4) одним из рациональных способов демпфирования упругих колебаний является синтез структуры и выбор параметров системы управления, поскольку он сравнительно просто реализуется, может быть использован для любой электромеханической системы и не требует дополнительных материальных затрат [7, с. 101].*

Для использования при синтезе систем управления рассматриваются следующие основные способы [34-37]:

1. Коррекция коэффициента усиления регулятора скорости в системе подчиненного регулирования.

2. Создание системы подчиненного регулирования с заведением обратной связи по производной от скорости исполнительного органа.

3. Создание системы подчиненного регулирования с заведением обратной связи по второй производной от скорости исполнительного органа.

4. Создание системы подчиненного регулирования с введением дополнительных обратных связей по разности скоростей двигателя и исполнительного органа.

5. Создание системы управления с модальным регулятором.

6. Создание системы управления с использованием полосно-заграждающего фильтра в контуре регулирования скорости.

7. Использование параллельной коррекции с косвенным измерением скорости исполнительного органа и с использованием гибкой обратной связи, заведенной на вход регулятора тока.

8. Создание системы подчиненного регулирования с использованием дополнительных параллельных корректирующих устройств.

Рассмотрим эти способы более детально:

1) способ, основанный на коррекции коэффициента усиления регулятора скорости в двухконтурной системе подчиненного регулирования, не требует дополнительных корректирующих устройств [34, с. 122; 38-40].

Основное преимущество заключается в том, что результат достигается гораздо проще, чем при использовании других способов. Недостатком является возможность применения способа только при большом значении коэффициента соотношения масс. Демпфирующая способность электропривода независимо от значения коэффициента регулятора скорости будет оставаться незначительной при значении коэффициента масс, лежащем в диапазоне от 1,1 до 1,2 [8, с. 129];

2) система регулирования с дополнительной обратной связью по производной скорости исполнительного органа дает результат, подобный увеличению коэффициента соотношения масс. Таким образом, если пренебречь малыми постоянными времени, то в системе, коэффициент соотношения масс которой приблизительно равен единице, можно получить переходные процессы требуемой формы, несмотря на то, что в системе без дополнительной обратной связи движение электропривода имеет явно колебательный характер [34, с. 122; 39, с. 315; 40, с. 124].

Эта система обладает высокой эффективностью в рассматриваемом диапазоне коэффициента инерции [8, с. 129];

3) система регулирования с дополнительной обратной связью по второй производной от скорости исполнительного органа в сравнении с предыдущим вариантом обладает меньшим быстродействием. Также возникает необходимость в уменьшении значения коэффициента регулятора скорости, которое влечет за собой повышение значения статической погрешности. Данный способ применим и при значении коэффициента соотношения масс, близком к единице. Основным преимуществом является возможность использования способа при гораздо больших значениях малых постоянных времени системы, чем при использовании предыдущего способа. Возможные трудности при осуществлении способа связаны с реализацией двойного дифференцирования значения сигнала скорости [34, с. 122; 37, с. 36];

4) построение системы автоматического управления с обратной связью по разности скоростей аналогично использованию обратной связи по второй производной. Однако данный способ дает худший результат в отличие от предыдущего. Использование способа может являться полезным в том случае, когда невозможно осуществление обратной связи по скорости исполнительного органа [34, с. 123; 41];

5) ряд современных регулируемых электроприводов представляют собой объекты управления, которым трудно придать устойчивость и требуемые высокие динамические показатели движения рабочего органа даже с использованием простых методов управления в виде одной обратной связи и регулятора из-за большого числа переменных, определяющих динамическое состояние электропривода. Например, это касается многодвигательных электроприводов некоторых типов манипуляторов, роботов, поворотных антенных установок, у которых подвижная часть является многомассовой, имеются несколько входов и выходов. Для таких электроприводов используется способ управления из ТАУ, называемый модальным управлением. Его суть заключается в замыкании отрицательными обратными связями по всем координатам привода и подборе коэффициентов этих обратных связей с целью получения желаемых характеристик объекта управления относительно выходных координат. Подбираемые координаты обратной связи составляют модальный регулятор [25, с. 240; 35, р. 345; 42, 43].

Этот метод применяется в тех случаях, когда все составляющие вектора состояния объекта доступны непосредственному измерению [8, с. 128].

К недостаткам модального управления относится потребность в дополнительных датчиках (по количеству переменных состояния). Датчики, особенно электромеханические – дорогостоящие устройства. Кроме того, не все переменные (например, момент или усилие, передаваемые через механическую передачу, скорость рабочего органа, магнитный поток двигателя) могут быть доступны непосредственному измерению [8, с. 128].

В случае с горизонтальным петлевым устройством необходимо вводить обратные связи по упругому моменту и скорости второй массы, которые не поддаются измерению [8, с. 128].

Поэтому для практической реализации модального регулятора труднодоступные измерению переменные состояния выделяются косвенным образом с помощью наблюдающего устройства или наблюдателя. Наблюдающее устройство выполняет функцию идентификации всего объекта или его части, и представляет собой математическую модель. Но в отличие от расчетной модели наблюдатель: 1) работает в реальном времени; 2) имеет общие с объектом наблюдения физические входные переменные; 3) дополняется обратными связями по разности между доступными измерениями выходными переменными объекта управления и их математическими оценками наблюдения [25, с. 241; 44, 45].

Системы управления электроприводами с использованием наблюдающих устройств применимы в тех случаях, когда требуемые для осуществления необходимых обратных связей координаты вектора состояния электромеханической системы не поддаются прямому измерению. Чаще всего целесообразным является восстановление только части не поддающихся измерению координат системы [34, с. 124].

При использовании данного способа может быть сложным измерение или моделирование возмущения, действующего на систему. Если значение момента

статической нагрузки изменяется в процессе работы установки, то возможны ошибки при восстановлении значений координат с помощью наблюдающих устройств [34, с. 124]. В случае с переменной массой, как в горизонтальном петлевом устройстве, реализация этого метода проблематична;

б) существует способ коррекции в системах с большим коэффициентом соотношения масс, связанный с введением настроенного на частоту резонанса системы полосно-заграждающего фильтра на выходе регулятора скорости. Недостатком данного способа является высокая чувствительность системы к изменению параметров. Также на сегодняшний день весьма затруднительно экспериментальное определение собственных резонансных частот объектов управления. В связи с этим необходимо использовать самонастраивающиеся фильтры. Желаемый результат в данном случае достигается путем исключения из управляющего воздействия гармоник, близких к резонансной частоте объекта управления [28, с. 144; 46].

Практически все современные контроллеры дополняются различными типами фильтров: фильтрами нижних частот 1- или 2-го порядка и/или режекторными фильтрами. В общем случае фильтр может представлять универсальную структуру 2-го порядка [42, с. 147].

Так, для контура скорости при широкой полосе пропускания (не менее 1-2 кГц) современных усилителей тока введение фильтра с собственной частотой, выше полосы пропускания по скорости, может повысить колебательность контура или даже привести к его неустойчивости [42, с. 147].

В данном случае частота колебаний системы с изменением длины полосы изменяется существенно, поэтому применение фильтра мало эффективно [8, с. 128];

7) также известен способ параллельной коррекции в системах управления электроприводами, основанный на использовании дифференцирующих отрицательных обратных связей по скорости двигателя. Однако использование этого способа является целесообразным только в тех случаях, когда амплитуда упругих колебаний якоря двигателя превосходит амплитуду колебаний исполнительного органа. Система управления в данном случае представляет собой двухконтурную систему с заведенной на вход регулятора тока гибкой обратной связью по скорости вала двигателя [14, с. 20; 34, с. 125; 47];

8) существует вариант двухконтурной системы регулирования скорости с одним корректирующим устройством, включенным от выхода датчика тока до входа регулятора скорости. [34, с. 125; 48].

При настройке параметры корректирующего устройства подбираются таким образом, чтобы ослабить влияние упругих колебаний на работу системы, практически не меняя характера переходных процессов по задающему воздействию в системе. Однако следует отметить, что недостатками систем с последовательно-параллельной коррекцией является сложность расчета параметров корректирующих звеньев и трудности при настройке [8, с. 128; 34, с. 125; 49-51].

Исходя из описания рассмотренных способов управления электроприводами с упругими связями и переменными параметрами, можно сделать вывод о том, что необходимо выбирать наиболее целесообразное решение при разработке системы управления электроприводом горизонтального петлевого устройства, учитывающее его характерные особенности [8, с. 128; 34, с. 125].

При работе горизонтального петлевого устройства изменяется масса полосы и соответственно приведенный коэффициент инерции, частота свободных колебаний электромеханической системы, значительно изменяется масса полосы [8, с. 128; 34, с. 125].

В связи с этим возникает необходимость в применении способов управления электроприводом с использованием дополнительных обратных связей и корректирующих устройств [34, с. 125].

В настоящее время наиболее перспективным для применения с целью синтеза систем управления электроприводами с упругими связями считается метод последовательно-параллельной коррекции [42, р. 148]. Такой выбор объясняется относительной простотой реализации, возможностью формировать необходимый вид переходных процессов в электроприводе практически без увеличения времени протекания переходных процессов [34, с. 125].

#### **1.4 Анализ существующих систем электроприводов холодной прокатки металлургического производства**

Электроприводы с двигателями постоянного тока до 1980-х годов были практически единственными регулируемыми электроприводами и использовались в агрегатах, в которых регулирование скорости было необходимо: прокатные станы, экскаваторы, металлорежущие станки, бумагоделательные машины и др. Основное достоинство этих электроприводов – отличная управляемость, главные недостатки – высокая стоимость машины, необходимость ее обслуживания [52, 53].

К 2000 г. в связи с развитием частотно-регулируемого асинхронного электропривода доля электропривода постоянного тока в семействе регулируемых электроприводов снизилась до 15 % и остается примерно на этом уровне. В мощных агрегатах, когда необходимо обеспечить благоприятное взаимодействие с сетью, используется система генератор-двигатель (Г-Д), при меньших мощностях применяются различные схемы тиристорных преобразователей [52, 53].

Во множестве случаев, когда требуется регулировать скорость, на смену электроприводам постоянного тока приходят асинхронные электроприводы с преобразователями частоты, бесконтактные двигатели с постоянными магнитами и разные другие типы привода [53].

Иногда это диктуется действительными преимуществами новых технических решений, иногда – это дань моде, но процесс сокращения традиционных электроприводов постоянного тока идет, и процесс этот, конечно, необратим [53].

Однако есть обширная область технологий, где электроприводам постоянного тока, правда специальным, нет и, возможно, в обозримом будущем не будет конкурентов. Это – транспортировка (перематка или намотка) длинномерных гибких изделий (нитей, лент, полос и т.д.) с заданной или произвольно изменяющейся скоростью и требуемым натяжением [53].

Электропривод переменного тока с асинхронными электродвигателями становится все популярнее с каждым годом. На стороне асинхронных двигателей и простота конструкции, и, соответственно, надежность и долговечность, и высокие энергетические показатели. К тому же, электроэнергию переменного тока, необходимую для этих двигателей, очень просто производить, преобразовывать и передавать на самые большие расстояния без особых потерь [54].

Тем не менее, электропривод постоянного тока нескоро сдаст свои позиции. Дело в том, что несмотря ни на что, электропривод постоянного тока имеет два неоспоримых преимущества перед электроприводом тока переменного. Одно из этих преимуществ заключается в возможности формирования самых различных электромеханических характеристик постоянного двигателя [54].

Например, можно получить жесткую характеристику зависимости частоты вращения двигателя от тока якорной цепи при параллельном или независимом включении обмотки возбуждения [54].

Нельзя не упомянуть еще одно преимущество привода постоянного тока: широкий диапазон регулирования и относительную простоту его осуществления. Так, практически при любой нагрузке, вполне возможно обеспечить необходимую скорость вращения вала двигателя. А способов это сделать вполне достаточно [54].

Можно регулировать скорость введением дополнительных сопротивлений в обмотку возбуждения, можно добавить сопротивления в якорную цепь, а можно комбинировать эти способы. Но наиболее эффективного управления приводом постоянного тока удастся достичь при внедрении системы тиристорно-импульсного регулирования. Эта система позволяет сполна оценить достоинства таких приводов и эксплуатировать их с максимально эффективными энергетическими показателями [54].

Силовые статические преобразователи на базе микропроцессоров, применяемые как в приводах переменного, так и постоянного тока, в настоящее время достигли очень высокого технического уровня, который (в допустимых технологических пределах) в большинстве приложений позволяет использовать электропривод переменного тока, там где раньше применялся привод постоянного тока. Однако, традиционный привод постоянного тока (1-но и 4-х квадрантный) продолжает играть важную роль, особенно в тех приложениях, где нужно обеспечить высокودинамичные режимы с постоянным моментом вращения, жесткими требованиями по перегрузочной способности в широком диапазоне скоростей и рекуперацию энергии обратно в сеть [55].

Главные критерии выбора:

1) совокупная стоимость закупки регулируемого привода и требуемого дополнительного оборудования;

2) текущие эксплуатационные расходы: обслуживание; производственные издержки, КПД, и т.д.; требуемая площадь размещения;

3) технологические и инновационные аспекты: динамический отклик, время разгона; 4-х квадрантные операции; аварийный стоп, и т.д. массо-габаритные характеристики;

4) эксплуатационная надежность, пригодность приводов: соответствие международным требованиям и стандартам IEC, ГОСТ Р, EN, CE-EMC; CSA, UL, и т.д.; условия окружающей среды; степень защиты корпуса; ремонт "по месту";

5) воздействие на внешнюю среду: искажение сетевого напряжения [3].

Обычно используемая независимая вентиляция (примерно в 85% регулируемых приводов до 250 кВт) гарантирует хороший отвод тепла от ротора двигателя постоянного тока во всем диапазоне скоростей [55].

Обычно используемая самовентиляция (примерно в 90 % регулируемых приводов до 250 кВт) в стандартных асинхронных двигателях не является эффективной во всем диапазоне скоростей. На низких скоростях отвод тепла фактически не возможен [54].

1. В отличие от стандартного асинхронного двигателя с фиксированной базовой (номинальной) частотой вращения (синхронные скорости 3000/1500/1000/... об/мин на 50 Гц), двигатель постоянного тока может быть спроектирован с базовой частота вращения в диапазоне примерно от 300 до 4000 об/мин для каждой рабочей точки.

2. В зависимости от типоразмера двигателя постоянного тока (как скомпенсированные, так и не скомпенсированные) могут иметь область работы с ослаблением поля 1:3 или 1:5.

3. Ограничение мощности связано с максимальным моментом асинхронного двигателя, уменьшающимся обратно квадрату скорости ( $1/n^2$ ).

4. Ограничение мощности связано с уменьшением коммутационной способности коллекторного двигателя постоянного тока [55].

Скорость двигателя постоянного тока пропорциональна величине напряжения прикладываемого к якорной обмотке, и в диапазоне от нуля до номинальной скорости приводом может развиваться полный крутящий момент. Такая жесткая механическая характеристика позволяет использовать их в электроприводах ленточных конвейеров, кранов, лифтов, экструдеров, смесителей, а также других механизмов, где требуется обеспечить высокий момент на низких скоростях двигателя вплоть до остановки при полной нагрузке с последующим стартом [55].

Двигатели постоянного тока могут работать в двух режимах [55]:

1) режим работы с постоянным моментом, где скорость пропорциональна напряжению якоря, в диапазоне от нулевой до базовой (номинальной) скорости;

2) режим работы с постоянной мощностью, или как его еще называют, в

области ослабления поля, где скорость обратно-пропорциональна напряжению возбуждения.

Первый режим применим для приложений, в которых требуется работать на различных скоростях при полной нагрузке [55].

Второй режим необходим там, где нужны скорости выше номинальной, и при этом допустимо снижение крутящего момента. Типичное применение – намоточные устройства. Например, в бумагоделательной машине привод намоточного вала, работая в режиме ослабления поля, по мере увеличения диаметра рулона, будет автоматически снижать скорость намотки, так как нагрузка на двигатель будет увеличиваться. Тем самым, предотвращается обрыв и обеспечивается плотность намотки [55].

Сравнение рабочих характеристик двигателей показывает, что двигатель постоянного тока выгоднее асинхронного при продолжительной работе на низких скоростях и для широкого диапазона скоростей при постоянной мощности. Перегрузочная способность в кратковременном режиме зависит не только от параметров двигателя, но в большой степени от характеристик преобразователя частоты/тиристорного преобразователя. Чем шире диапазон скоростей, в котором двигатель может выдать максимальную мощность, тем он лучше может быть адаптирован к процессам, требующим обеспечения постоянного момента во всем диапазоне скоростей [55].

Основные технические различия двигателей постоянного и переменного тока, методы формирования магнитного потока и рассеивание потерь мощности также обуславливают различные размеры (высоту оси вращения вала  $H$ ) и момент инерции ротора ( $J_{\text{ротор}}$ ), при одном и том же номинальном моменте вращения двигателя. Двигатели постоянного тока имеют значительно меньшую высоту оси вращения  $H$  и массу ротора, чем асинхронные двигатели, и, следовательно, обладают более низким моментом инерции ротора  $J_{\text{ротор}}$ , что является существенным преимуществом в высокодинамичных применениях, таких как испытательные стенды, летучие ножницы, и реверсивные приводы, так как это влияет на время разгона и динамический отклик двигателя в четырех квадрантных приложениях (в двигательных и тормозных режимах) [55].

Для специализированных приводных приложений, как привод намотчика и размотчика, испытательный стенд, лебедка и т.д., требуется очень широкий диапазон скоростей при постоянной мощности. В этом случае, традиционный режим работы с ослаблением поля двигателя постоянного тока с независимым возбуждением является особенно экономически эффективным. Это означает: широкий диапазон скоростей, при котором двигатель может выдавать максимальную мощность, требуется меньший запас по мощности двигателя  $P_{\text{max}}(\text{двиг})/P_{\text{max}}(\text{нагр})$  [55].

В настоящее время, в зависимости от сложности приложения, ресурс щеток двигателя постоянного тока составляет, примерно, 7000÷12000 часов, благодаря современному коллекторному узлу, углеродистым щеткам и оптимизированному полю возбуждения. В зависимости от механических

условий эксплуатации, интервал замены смазки в двигателях постоянного/переменного тока может быть соизмерим, а зачастую и меньше, чем ресурс щеток коллекторного двигателя [55].

Исторически сложилось так, что начиная с 20-х годов, двигатели постоянного тока разрабатывались в основном для регулируемых приводов, что обусловило применение в них внутренней форсированной независимой вентиляции (примерно в 85% двигателей до 250 кВт). Стандартные асинхронные двигатели активно начали применяться в 70-х/80-х годах и в большинстве своем (примерно 90% до 250 кВт) производились с поверхностной самовентиляцией, так как частотно-регулируемые приводы тогда не были широко распространены. Фактически все асинхронные двигатели мощностью, примерно до 1400 кВт имеют степень защиты IP 54, как стандарт, благодаря их простой и прочной конструкции. Для эксплуатации в зонах с повышенной опасностью, практически исключительно используются взрывозащищенные асинхронные двигатели. Асинхронный двигатель отыграл для себя ведущую позицию и доказал свою эффективность в тех секторах промышленности, которые характеризуются агрессивными условиями окружающей среды, высокой степенью загрязненности и запыленности [55].

Более низкие масса и габариты двигателей постоянного тока (стандартная степень защиты IP 23) по сравнению с асинхронными двигателями (стандартная степень защиты IP 54) особенно важны для приложений, где двигатель должен перемещаться вместе с грузом (например, для крупных подъемных, мостовых кранов), или в системах, где важно компактное размещение (буровые установки, подъемники для горнолыжных трасс, морские применения, печатные машины, и т.д.) [55].

Когда возникает вопрос о том, стоит ли модернизировать существующий привод постоянного тока или дешевле его полностью заменить на электропривод переменного тока, надо подойти к этому вопросу взвешенно и рассмотреть все аргументы и «за» и «против» [55].

Проекты модернизации действующего оборудования в части автоматизированных электроприводов выполняются в следующих основных четырех вариантах [56]:

1. Замена аналоговых и релейно-контактных систем управления на цифровые с использованием промышленных компьютеров, технологических контроллеров, логических контроллеров, интеллектуальных модулей периферии и других устройств, соответствующих нижнему и среднему уровню автоматизации.

2. По пункту 1 с заменой аналоговых блоков управления комплектных электроприводов постоянного тока на цифровые с использованием контроллеров привода.

3. По пункту 2 с заменой силовых блоков комплектных электроприводов. Электродвигатели и сети электропитания остаются неизменными.

4. Полная модернизация автоматизированных электроприводов. Замена

электроприводов постоянного тока на электроприводы переменного тока с частотными преобразователями.

Основным недостатком аналогового привода постоянного тока является низкая помехоустойчивость, сложность в настройке и нестабильность параметров. В качестве датчика обратной связи по скорости применяется тахогенератор, имеющий те же недостатки, что и коллекторный двигатель. Для реверсивных приводов после тахогенератора приходится устанавливать диодный мост, что ограничивает диапазон регулирования на малых скоростях из-за пропадания обратной связи. В случае синхронизации механизмов с различными приводами в режиме «ведущий – ведомый» частотный преобразователь намного предпочтительней, т.к. в качестве датчика скорости применяются цифровые датчики типа энкодера, резольвера или sin/cos преобразователи, что позволяет строить системы с электрическими валами. Наличие дополнительных устройств (опций) частотных преобразователей позволяют наращивать функции последних: увеличивать число входов выходов, использовать современные шины и протоколы обмена, применять привод в устройствах позиционирования, следить за температурным режимом двигателя и привода, использовать привод в режиме виртуального кулачка (переменная скорость вращения за один оборот вала) и многое другое [55].

Применение двигателей постоянного тока позволяет снизить время цикла производственной линии, увеличив, тем самым, её производительность [55].

Долгое время регулировкой скорости вала двигателя осуществлялась только приводами постоянного тока. Это значит, что приводы постоянного тока получили широкое распространение и были установлены на большом количестве различных механизмов, машинах и оборудовании. По ним накоплена обширная база знаний, и они хорошо известны инженерам и техникам во всем мире. Тиристорные регуляторы менее сложны, чем преобразователи частоты, и более ремонтпригодны. При модернизации систем управления, зачастую, более экономически выгодно заменить устаревшие приводы постоянного тока на новые современные приводы постоянного же тока [55].

Двигатели постоянного тока по-прежнему остаются предпочтительными в ряде отраслей [55].

Там, где это возможно двигатели постоянного тока заменяются приводами на основе асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором. Основные недостатки двигателя постоянного тока (невысокая надежность, сложность обслуживания и эксплуатации) обусловлены наличием коллекторного узла. Кроме того, для питания двигателя необходим источник постоянного тока или тиристорный преобразователь переменного напряжения в постоянное. При всех своих недостатках двигатели постоянного тока обладают высоким пусковым моментом и большой перегрузочной способностью. Что определило их использование в металлургической промышленности, станкостроении и на электротранспорте [57, 58].

Защитное покрытие «алюмоцинк» представляет собой псевдосплав,

состоящий из трёх основных элементов в следующих весовых соотношениях: 55% алюминий, 43,4% цинк, 1,6% кремний – такая пропорция между элементами обеспечивает баланс между коррозионностойким качеством алюминия и защитным гальваническим свойством цинка. Такой тип покрытия дает гладкую серебристую поверхность металла, кроме того, не требует постоянного ремонта и специального обслуживания [59].

Полосовой прокат с алюмоцинковым покрытием производится на стане холодной прокатки.

Непрерывные станы холодной прокатки являются высокопроизводительными агрегатами. Производительность АНГА составляет 320 тыс. т в год. Производительность профилегибочного агрегата составляет 120 тыс. т в год. Это достигается применением высоких скоростей прокатки.

На всех станах холодной прокатки прокатка ведется с натяжением, т.е. полоса между клетями находится в упруго-напряженном состоянии. Натяжение полосы между клетями является функцией скоростей валков и обеспечивается двигателем следующей клетки. При потере натяжения полоса, как правило, теряет устойчивость, что приводит к аварии при высоких скоростях прокатки [60].

Металлургические машины работают в тяжелых динамических режимах, и поэтому к их конструкциям предъявляют высокие требования прочности и надежности. Машину необходимо рассматривать такой, какая она является в действительности, т.е. с учетом свойств материала (упругости), реального характера нагружения внешними силами, принимая во внимание и характеристику двигателя, с учетом зазоров в приводных линиях и диссипативных свойств системы. Наиболее жесткие динамические режимы присущи прокатным машинам, характер нагружения которых часто приближается к ударному. Поэтому пренебрежение динамическими воздействиями может повлечь за собой большие ошибки в расчетах металлургических машин [16, с. 48].

Независимо от назначения и конструктивных особенностей все машины обладают общими свойствами – упругостью звеньев и способностью при определенных условиях к возбуждению в них колебательных процессов. Под действием внешних нагрузок (моментов или сил двигателя, тормозов, технологических сопротивлений рабочей машины и др.) упругие элементы привода деформируются, а массы машин совершают, кроме основного вращения, малые крутильные или продольные колебания. В результате этого линия приводов нагружается дополнительными моментами, или силами упругости, изменяющимися во времени с частотой собственных колебаний системы [16, с. 48].

Электромеханические системы, включающие электропривод, податливые механические звенья и рабочий орган, характеризуются колебательностью, повышенными динамическими нагрузками в механической части. Для многих механизмов важное практическое значение имеет исследование динамики их электромеханических систем; при этом желательно добиться ограничения

динамических нагрузок в механической части и демпфирования колебаний, от которых во многом зависит долговечность отдельных звеньев механизма и производительность машины [23, с. 29].

На всех станах повышение вибрации до опасного уровня ограничивает производительность, снижает качество готовых полос по продольной разнотолщинности и периодическим дефектам поверхности типа «ребристость», «поперечные теневые полосы», а также повышает расход валков [25, с. 237].

Наличие механических связей, обусловленных упругостью ленты, является фактором, способствующим возникновению колебаний, которые при неблагоприятных условиях существенно увеличивают динамические нагрузки рабочего оборудования, что в свою очередь приводит к повреждению механизма и несущего материал элемента. Наличие упругих механических связей является фактором, способствующим возникновению упругих колебаний, которые могут носить затухающий или незатухающий характер [61].

В приводах металлургических машин, как правило, имеются большие зазоры в соединениях (в зубчатых муфтах и передачах, универсальных шпинделях и др.). В период неустановившегося движения машины в момент упругого замыкания зазоров в приводных линиях возникают большие динамические нагрузки [16, с. 53].

Параметрические колебания возникают в машинах при периодическом изменении их параметров – жесткостей и масс. В практике переменной величиной чаще всего является жесткость, а в кривошипных механизмах переменными являются моменты инерции масс [2, с. 125; 16, с. 53].

Переменная жесткость имеет место в системах с валами неодинаковой жесткости в различных направлениях (некруглыми валами, валами с вырезами, карданными передачами, спарниками и т.д.) [16, с. 53].

Автоколебательные или самовозбуждающиеся процессы очень широко распространены в природе и технике и являются весьма устойчивыми: звук скрипки, трамваев на повороте, тормозов, «галомирование» линий электропередач, автоколебания в металлорежущих станках и в других машинах, в том числе и металлургических [16, с. 53].

Динамические нагрузки от автоколебаний в металлургических машинах могут достигать больших значений, и их следует учитывать при расчете деталей приводов. Нагрузки от автоколебаний опасны не только (и не столько) большими амплитудами, но и тем, что они проходят через нулевые значения и влекут за собой разрыв кинематических цепей в зазорах (зубчатых передачах, муфтах, универсальных шарнирах и т.д.) с последующим их замыканиями с упругими ударами и резким повышением общей напряженности приводных линий [2, с. 125; 16, с. 53].

В практике чаще всего наблюдаются случаи разрушения валов, передач, шпинделей и других деталей привода именно в период нарушения устойчивого процесса и возникновения буксования валков прокатных станков, ходовых колес

кранов и других рабочих органов машин. Довольно интенсивные автоколебания возбуждаются в механизмах передвижения кранов, тележек, грузочных машин, в прокатных станах и др. Автоколебания бывают гармонические или разрывные с периодом, большим собственных колебаний [16, с. 53].

Чаще всего в исследованиях электромеханические системы изучаемых объектов стараются свести к двухмассовым системам [23, с. 30; 24, с. 135; 31, с. 557; 62, 63].

Агрегаты и комплексы, предназначенные для обработки и перемещения ленточных материалов имеют взаимосвязанные многомассовые механические подсистемы, управление которыми осуществляется многодвигательными приводами [64-67].

Если исходить из предположения, что взаимосвязь механической и электромагнитной подсистем слаба, то механическая подсистема может рассматриваться независимо от электромагнитной подсистемы [68].

Если в многомассовой упругой механической подсистеме, управление которой осуществляется многодвигательными электроприводами, в явном виде отсутствуют звенья с распределенными параметрами, то механическая подсистема может быть представлена в виде многих элементов с сосредоточенными массами, соединенными между собой безмассовыми упругими связями. Под действием нескольких входных переменных взаимосвязанные механические подсистемы совершают основное движение и колебательные движения относительно основного. Колебания взаимосвязанных механических подсистем всегда являются затухающими из-за влияния восстанавливающих сил системы, поэтому математическое описание взаимосвязанных механических подсистем следует выполнять с учетом этих сил [24, с.136; 31, р. 557; 34, с. 122; 68, с. 15].

Обычно при расчете систем управления электроприводами предполагалось, что кинематическая связь между двигателем и исполнительным органом не подвержена упругим деформациям и не содержит зазора. При таком допущении скорость двигателя и приведенная к двигателю скорость исполнительного органа равны между собой не только в установившемся режиме, но и в переходных процессах. Влияние механизма на работу электропривода проявляются лишь в том, что механизм определяет характер момента нагрузки на двигателе, а момент инерции привода является суммой моментов инерции двигателя, редуктора и приведенного к валу двигателя момента инерции исполнительного органа. Изменение момента нагрузки на механизме в этом случае эквивалентно изменению момента нагрузки на двигателе. В большинстве случаев идеализация, основанная на представлении о жесткой связи двигателя и исполнительного органа, оказывается допустимой. Это связано с тем, что частота собственных упругих колебаний механизма оказывается значительно выше частоты, определяющей быстродействие автоматической системы управления электропривода. Если это условие не выполняется, пренебрежение упругостью при анализе и синтезе

системы может привести к ошибочным результатам. Чем выше быстродействие системы управления, тем больше вероятность того, что влияние упругости на работу автоматической системы управления электроприводом будет заметным [24, с. 138; 32, р. 605; 39, с. 25].

От показателей качества динамики электроприводов во многом зависит производительность машин и качество выпускаемой продукции. Существенными факторами, определяющими динамические свойства электроприводов являются нестационарность (нестабильность) их параметров и внешних воздействий, наличие нелинейностей и упругих звеньев. К этим факторам можно отнести и трудности получения начальной информации о значениях параметров, а так же возможные их изменения в процессе модернизации и ремонта [69].

Динамические нагрузки, возникающие в приводах прокатных станов, крайне отрицательно влияют на процесс прокатки. Основной причиной динамических перегрузок являются интенсивные повторно-кратковременные режимы работы в сложных условиях окружающей среды металлургического производства, наличие упругих механических связей системы, зазоров и несовершенства системы электропривода. Это приводит к отклонению параметров прокатки от заданных технологическим процессом и нарушению формирования требуемых физико-механических свойств прокатываемого металла, уменьшению точности работы механизма, появлению вибраций и опасных резонансных явлений [28, с. 141].

Рассмотрению вопросов динамики автоматической системы управления электроприводом реального механизма должно предшествовать создание модели механизма. Эта модель, с одной стороны, должна быть достаточно подробной, для того чтобы составленное на ее основе математическое описание давало достоверную картину динамических процессов. С другой стороны, она должна быть достаточно простой, что бы изучение этих процессов на ее основе было реально осуществимым. Критерием допустимости принятого упрощения должно быть удовлетворительное совпадение теоретических результатов с результатами эксперимента [7, с. 100; 70, 71].

В реальных системах электропривода представление о жесткой связи вала двигателя с механизмом является допущением, которое в ряде случаев оказывается недопустимым. Практически любая связь двигателя с исполнительным органом не является абсолютно жесткой, и возможность пренебрежения явлением упругости часто связано с тем, что собственная частота упругих колебаний системы двигатель – исполнительный механизм оказывается значительно большей частот, существенных для автоматической системы управления электроприводом. Поэтому повышенной быстродействием автоматической системы, обусловленное применением тиристорных преобразователей и высококачественных элементов системы регулирования, часто не удается реализовать из-за влияния упругости [24, с. 134; 28, с. 140; 40, с. 65; 69, с. 18].

Обычно при рассмотрении систем, в которых сосредоточенные

вращающиеся массы ротора двигателя и механизма связаны между собой через редуктор и длинный вал, принимают следующие основные допущения [40, с. 18; 72, 73]:

- 1) силы и моменты, действующие в системе, приложены к сосредоточенным массам, которые не подвергаются деформации;
- 2) упругие звенья невесомы и характеризуются постоянной жесткостью связи, т.е. коэффициентом пропорциональности между моментом (силой) и деформацией;
- 3) деформация упругих звеньев линейна и подчиняется закону Гука;
- 4) волновым движением деформации можно пренебречь.

В других случаях принимается, что материал обладает постоянной массой, но может менять свою жесткость в связи с изменением температуры [74, 75]. Также при расчете таких систем может быть допущение, что материал обладает постоянной массой и жесткостью [37, с. 36; 76-79]. Но в данном случае данное утверждение не подходит, т.к. особенностью электромеханической системы горизонтального петлевого накопителя являются изменение длины полосы, находящейся в петлевом накопителе, а, следовательно, ее массы и жесткости. Эти особенности отличают анализируемую систему от известных систем с упругими связями промышленных механизмов [2, с. 128].

Обычно наличие упругости приводит к необходимости снижать быстродействие системы [2, с. 124, 32, р. 605].

Кроме того, обычно принимается, что параметры электромеханических систем не изменяются. Или считается, что диапазон изменения параметров объекта в системах промышленных электроприводов не очень широк, и обычно наблюдается лишь 1,5-2-кратное их изменение [80].

Но при этом в металлургическом производстве как ни в каком другом нашли самое широкое применение механизмы с переменными моментами инерции. В настоящее время уделяется много внимания вопросам учета вариаций приведенных масс электромеханических систем и их влияния на динамику электроприводов [33, с. 73; 80, р. 517; 81-85].

Петлевой накопитель полосы, входящий в состав основных механизмов агрегатов непрерывной обработки полосы и станов «бесконечной» холодной прокатки хотя и не участвует в процессе технологической обработки полосы, тем не менее представляет собой весьма ответственный механизм в составе агрегатов, от надежной работы которого зависит надежность работы и производительность указанных агрегатов. Применяемые петлевые накопители горизонтального и вертикального типов обеспечивают сохранение в натянутом состоянии необходимого запаса полосы между частями агрегатов. Этот запас используется для обеспечения непрерывности ведения технологического процесса в средней части агрегата обработки полосы при технологических остановках головной или хвостовой частей, или для обеспечения непрерывной прокатки при технологической остановке головной части [2, с. 128; 14, с. 20; 74, с. 172; 86].

Практика эксплуатации и анализ показали, что электропривод тележки петлевого накопителя имеет специфическую особенность, которую следует учитывать при проектировании его системы автоматического управления. Эта особенность связана с наличием канатной связи между приводным барабаном и тележкой. Как известно, для повышения точности поддержания натяжения в переходных режимах изменения линейной скорости тележки (разгон – торможение головной части или стана) необходимо производить компенсацию динамического момента электропривода тележки, который определяется величиной ускорения электропривода и его суммарного приведенного момента инерции. Наличие связи через канат существенно влияет на характер протекания переходных процессов в электроприводе тележки. Так, при разгоне тележки в направлении «от стана» электропривод обеспечивает ускорение всех элементов (электродвигатель, редуктор, канатный барабан, передаточные звенья), а так же ускорение тележки с обводными барабанами и полосы в накопителе, включая ролики поддерживающих полюсу устройств и холостые ролики. При движении тележки «к стану» ускорение ее не может быть обеспечено электроприводом тележки из-за наличия канатной связи. Ускорение указанных элементов накопителя полюсы в этом случае производится электроприводами других механизмов, соседствующих с накопителем полюсы. Соответственно, такое же явление имеет место при замедлении тележки [2, с. 124; 74, с. 220].

Экономический рост современного предприятия металлургической промышленности сопровождается интенсификацией и модернизацией технологических и производственных процессов, которая требует применения надежных средств автоматизации технологических процессов (АСУ ТП) черной металлургии. За последние десятилетия автоматизация промышленных процессов, в том числе автоматизация черной металлургии, стала необходимым и неотделимым элементом новой техники. Разработка и внедрение автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП) черной металлургии приводит к повышению результатов труда и экономии энергоносителей. Основными задачами, которые решает автоматизация металлургических предприятий, является настройка и поддержание рациональных режимов ведения технологического процесса отдельного металлургического производства, минимизация потерь металла, сокращение внеплановых простоев [87].

Агрегаты непрерывного горячего алюмоцинкования (АНГА) являются сложными технологическими агрегатами, особенности статических и динамических режимов работы которых определяются многодвигательным взаимосвязанным через упругую распределенную полюсу электроприводом [88].

### **1.5 Задачи исследований**

Целью данной работы является повышение производительности листопркатного стана за счет уменьшения динамических нагрузок и

колебательности полосы металла в горизонтальном петлевом устройстве с помощью адаптивного электропривода [9, с. 121].

На основе проведенного анализа исследований в области управления электроприводами непрерывно-поточных агрегатов обработки металлической полосы сформулированы задачи диссертационной работы:

1. Анализ основных направлений исследований, способов и методов демпфирования упругих колебаний в электромеханических системах.

2. Экспериментальные исследования колебательных процессов в полосе металла в горизонтальном петлевом устройстве.

3. Разработка математической и имитационной моделей электромеханической системы горизонтального петлевого устройства.

4. Разработка адаптивной системы управления электроприводом горизонтального петлевого устройства.

5. Имитационное моделирование электромеханической системы горизонтального петлевого устройства с адаптивной системой демпфирования колебательных процессов в полосе металла.

### **1.6 Выводы по первому разделу**

В первом разделе проведен обзор литературных источников, посвященных электроприводам металлургического производства. Приведены различные типы устройств накопителей полосы. Рассмотрены способы демпфирования колебаний.

Проведенный анализ показал, что электромеханическая система горизонтального петлевого устройства является многомассовой системой, которая не может быть сведена к двухмассовой системе. При исследовании системы электропривода горизонтального петлевого устройства необходимо учитывать изменение упругости полосы как распределенной механической системы при уменьшении или увеличении ее длины в накопителе. Так же следует учесть изменение массы стальной полосы, и, соответственно ее механические свойства и изменения приведенного момента инерции полосы [7, с. 103].

По итогам исследования был сделан вывод, что существующая конструкция петлевого устройства удовлетворяет условиям совместимости с действующим технологическим оборудованием и условиям технологического процесса. При проведении анализа был сделан вывод, что электропривод постоянного тока, применяемый в горизонтальном петлевом устройстве, подходит для цели дальнейшей модернизации.

При рассмотрении способов демпфирования упругих колебаний был сделан вывод, что наиболее целесообразным решением будет введение нескольких корректирующих устройств.

## **2 ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ НА АГРЕГАТЕ НЕПРЕРЫВНОГО ГОРЯЧЕГО АЛЮМОЦИНКОВАНИЯ**

### **2.1 Экспериментальное исследование электропривода горизонтального петлевого устройства**

Агрегат непрерывного горячего алюмоцинкования относится к непрерывным агрегатам. Проводить эксперименты на нем в процессе работы не представляется возможным. Поэтому эксперименты производились косвенные. Сложность проведения экспериментов и ограниченные возможности физического моделирования предопределили проведение дальнейших исследований методами математического моделирования [89].

Для разработки математической модели такого сложного агрегата необходимо обладать информацией о механических параметрах полосы, включая упругие моменты и частоты колебаний полосы.

Существующая средства контроля на АНГА дают возможность записывать параметры электромеханической системы горизонтального накопителя: ток двигателя, линейная скорость и запас петли в устройстве. Измерение упругих моментов в ветвях полосы, расстояния между ветвями и других параметров не представляются возможным в связи с отсутствием необходимых датчиков [90].

Измерения и запись доступных параметров в действующей системе визуализации и диагностики агрегата алюмоцинкования «Софа». Информация собирается напрямую с контроллеров и датчиков. Технологические графики строятся в режиме реального времени. Информация хранится в локальной базе данных.

Осциллограммы доступных показателей производились в динамике: в процессе набора полосы в накопитель и в процессе выбора полосы. Положение тележки петлевого устройства при этом варьировалось от первой до четвертой зоны синхронизации. Из имевшихся в наличии осциллограмм была проведена выборка 10 технологических графиков, имеющих наиболее различные показатели: процент запаса полосы в накопителе, время работы накопителя, зона синхронизации.

На рисунках 2.1 и 2.2 представлены осциллограммы тока, скорости и запаса полосы. Как видно из графиков, запас петли в накопителе во время работы может изменяться от 25÷60% до 80÷90%, а иногда и 100% [91].

Длина петлевого устройства составляет 89600 мм, при этом длина стальной полосы в петлевом устройстве может изменяться от 24580 мм до 329480 мм. И как видно из рисунков 2.1 и 2.2 (графики), изменение длины происходит быстрее при выборе полосы из накопителя (0,5÷1,5 мин), чем при ее наборе (1,5÷4,5 мин). Сечение полосы колеблется от 0,4×700 мм<sup>2</sup> до 2×1500 мм<sup>2</sup>. Масса полосы в накопителе при работе изменяется от 48,683 кг (при пустом устройстве и наименьшем сечении) до 7709,832 кг (при заполненном устройстве и наибольшем сечении) [8, с. 126; 9, с. 120].

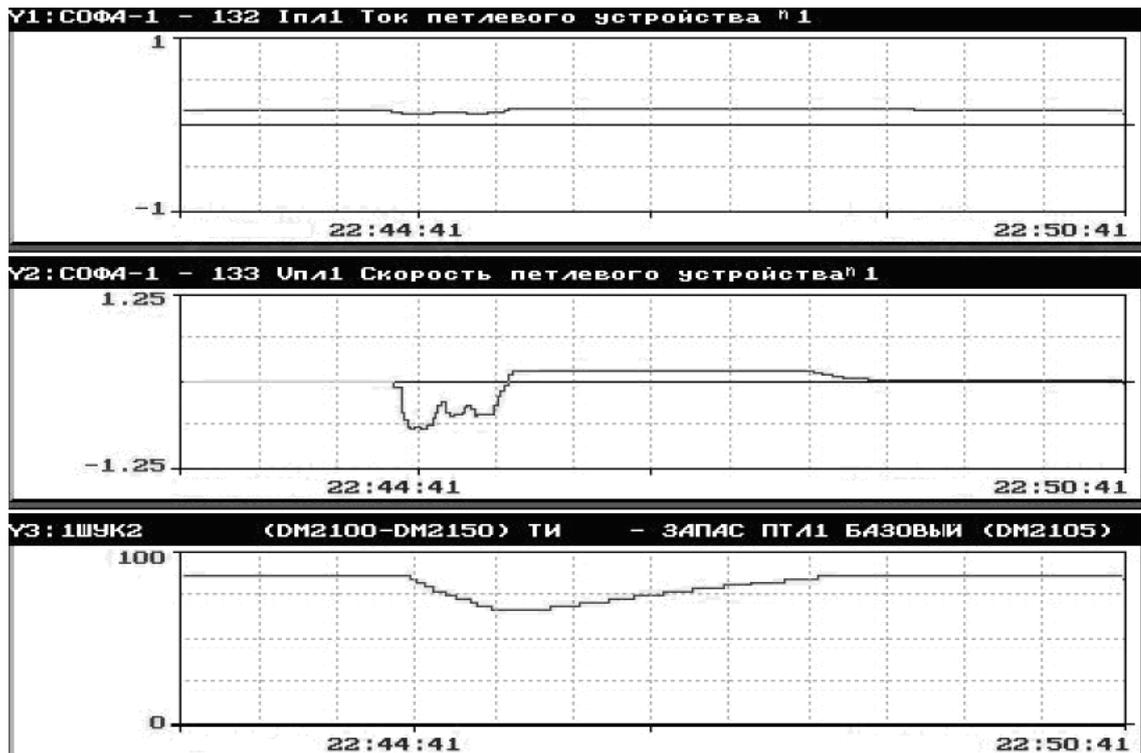


Рисунок 2.1 – Изменение параметров петлевого устройства

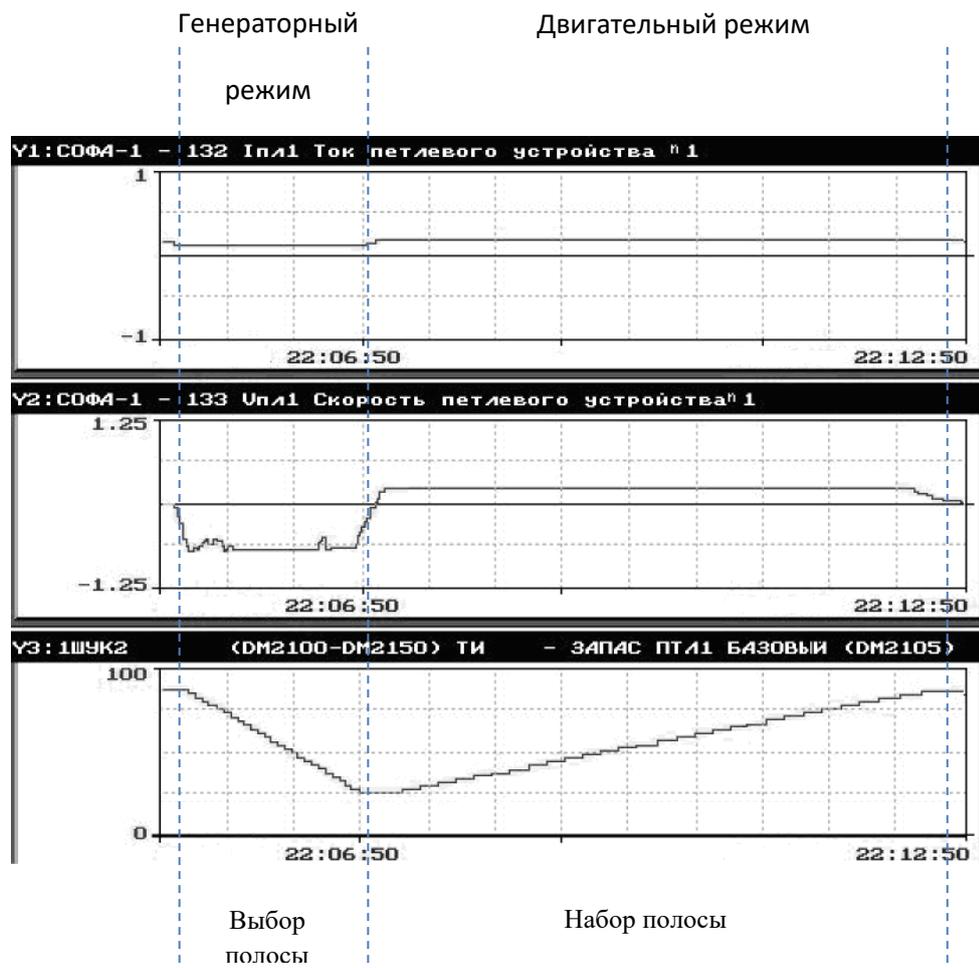


Рисунок 2.2 – Изменение параметров петлевого устройства

В переходных процессах тока и скорости, как следует из графиков, колебаний тока и скорости не выявлено. Но при этом при визуальном наблюдении в полосе происходят значительные механические раскачивания. Т.е. колебания стальной полосы не отражаются в токе и скорости приводного двигателя [2, с. 124].

Это можно объяснить малым влиянием механических колебаний на электрическую часть двигателя, т.к. коэффициент инерции  $\gamma$  изменяется незначительно: от 1,059 до 1,163, передаточное число довольно большое ( $i=33,85$ ) [9, с. 120; 34, с. 119].

При коэффициенте  $\gamma=1\div 1,6$  процессы в механической системе с упругими связями будут значительно колебательными [31, р. 557].

Фиксация колебаний в полосе, измерение упругих моментов в ветвях полосы и расстояния между ветвями не представляются возможным в связи с отсутствием в действующем агрегате необходимых для этого датчиков, а также невозможности вмешательства в непрерывный технологический процесс работы агрегата или его остановки для проведения измерений.

В связи с изложенным, на агрегате был проведен следующий эксперимент.

Было проведено 15 опытов. Измерения проводились во время всего периода работы горизонтального петлевого устройства: как при заполнении, так и при опустошении петлевого устройства.

Во время опустошения петлевого устройства электропривод работает в генераторном режиме. В этот период работы на осциллограммах заметны колебания тока и скорости электропривода. Но именно в этот период отсутствует раскачивание полосы в устройстве.

Во время заполнения петлевого устройства электропривод работает в двигательном режиме. Но на осциллограммах в это время работы электропривода практически не заметны колебания тока и скорости. Но при этом при визуальном наблюдении наблюдались значительные раскачивания полосы. Поэтому в дальнейшем будет рассматриваться двигательный режим электропривода накопителя при наборе полосы.

Визуальный эксперимент проводился для разных сортаментов полосы.

Визуально с помощью видеозаписи и секундомера был определен период колебаний. По секундомеру происходила фиксация достижения максимума по времени (определение частоты). Частота колебаний изменялась в пределах  $0,3\div 0,5$  Гц.

Была зафиксирована амплитуда колебаний, равная расстоянию между параллельными нитками полосы.

Расстояние между параллельными ветвями полос в петлевом накопителе составляет 0,85 м. Визуальные наблюдения показывают, что при большой длине полосы (заполненном петлевом устройстве) имеются вертикальные колебания полосы большой амплитуды вплоть до схлопывания, т.е. максимальное значение амплитуды ограничено расстоянием между параллельными ветвями стальной полосы.

Было проведено 15 опытов. Расхождения между зафиксированными показаниями составили не более 5%.

Визуально при эксперименте было выявлено, что в полосе при заполнении петлевого устройства от 50% и более, возникает автоколебательный процесс. При этом явления, происходящие в полосе, не влияют на процессы в электроприводе.

Для колебаний, вызванных внешней силой, амплитуда определяется [92]:

$$A = \frac{f_0}{\sqrt{(w_0^2 - w^2)^2 + 4\beta^2 w^2}} \quad (2.1)$$

где  $A$  – амплитуда колебаний, м;

$f_0, \beta$  – коэффициенты затухания;

$w_0$  – собственная частота колебаний системы, Гц;

$w$  – циклическая частота вынуждающей силы, Гц.

Коэффициенты затухания:

$$f_0 = \frac{F_0}{m} \quad (2.2)$$

$$\beta = \frac{r}{2m} \quad (2.3)$$

где  $F_0$  – амплитуда силы, Н;

$m$  – масса тела, кг;

$r$  – коэффициент сопротивления среды.

В процессе проведения экспериментов было установлено, что наибольшая амплитуда колебаний наблюдается для полосы с наибольшим сечением  $0,2 \times 1500$  мм<sup>2</sup>. Амплитуда колебаний составляет  $0,8 \div 0,85$  м, частота колебаний  $0,3 \div 0,5$  Гц.

Усилие, прикладываемое к полосе со стороны электропривода, является не гармонической, а постоянной величиной, т.е. циклическая частота вынуждающей силы равна нулю.

Определим усилие из (2.1)÷(2.3):

$$F_0 = Am\sqrt{(w_0^2 - w^2)^2 + 4\beta^2 w^2} \quad (2.4)$$

При условии, что  $w=0$ , получим:

$$F_0 = A \cdot m \cdot w_0^2 \quad (2.5)$$

Для полосы сечением  $0,2 \times 1500$  мм<sup>2</sup>, при амплитуде колебаний  $0,8 \div 0,85$  м и частоте колебаний  $0,3 \div 0,5$  Гц, величина усилия составит  $20,218 \div 59,67$  Н.

В процессе наблюдений было установлено, что наибольшие колебания возникают при коротком канате и длинной полосе, т.е. при заполненном

петлевом устройстве. При этом колебательные процессы наиболее явно заметны для полосы с наибольшим сечением [9, с. 125].

При короткой полосе и длинном канате, т.е. при пустом петлевом устройстве, колебаний практически не было выявлено. Причем это наблюдалось при любом сортаменте полосы.

Следовательно, наибольшее влияние на динамику электромеханической системы петлевого устройства оказывает сама полоса в процессе заполнения устройства.

## **2.2 Выводы по второму разделу**

В результате проведенных экспериментов установлено, что электромеханическая система горизонтального петлевого устройства является:

1) многомассовой системой, которая не может быть сведена к двухмассовой системе;

2) системой, модель которой должна учитывать изменение упругих свойств полосы в процессе работы.

3) Также установлены следующие существенные факторы, влияющие на динамику полосы:

4) возникновение колебаний в полосе во время двигательного режима работы электропривода накопителя;

5) изменение физических свойств полосы (массы, момента инерции) в процессе изменения ее длины;

6) наличие упругих свойств полосы как распределенной механической системы (упругости второго рода).

Таким образом, электропривод горизонтального петлевого устройства можно рассматривать как многомассовую электромеханическую систему с распределенными упругими связями второго рода, параметры которой изменяются в процессе работы

### 3 РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ И ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ПЕТЛЕВОГО УСТРОЙСТВА

#### 3.1 Разработка математических моделей электромеханической системы горизонтального петлевого устройства

##### 3.1.1 Математическая модель электропривода постоянного тока горизонтального петлевого устройства

В электроприводах АНГА применяются двигатели постоянного тока независимого возбуждения с управлением как по цепи якоря, так и по цепи обмотки возбуждения [6, с. 3].

Структурная схема электропривода постоянного тока при принятом допущении об отсутствии влияния внутренней обратной связи по ЭДС двигателя, реакции якоря и влияния вихревых токов приведена на рисунке 3.1. [93].

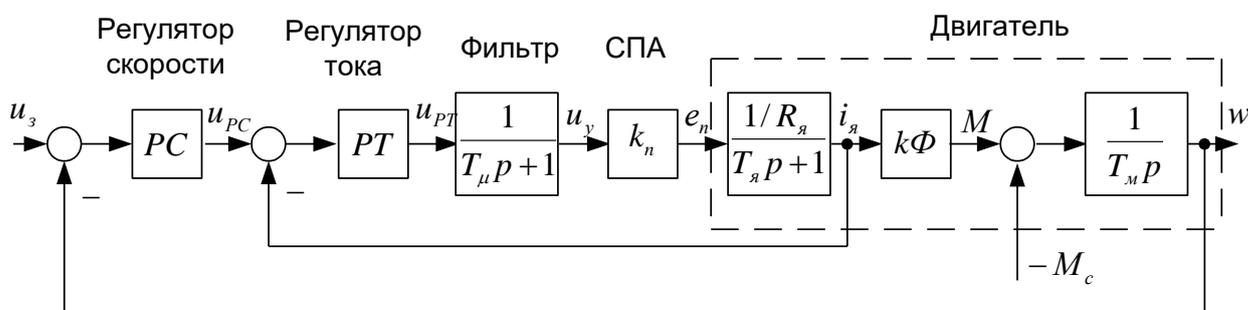


Рисунок 3.1 – Структурная схема электропривода постоянного тока

При построении математической модели силовой части приняты следующие условные обозначения элементов, параметров и сигналов [93, с. 105]:

РС – регулятор скорости.

РТ – регулятор тока.

СПА – силовой полупроводниковый агрегат.

$U_z$  – напряжение задания.

$U_{PC}$  – напряжение регулятора скорости.

$U_{PT}$  – напряжение регулятора тока.

$U_y$  – управляющее воздействие на входе СПА.

$e_n$  – ЭДС силового преобразовательного агрегата.

$i_я$  – ток якоря двигателя.

$M$  – электромагнитный момент двигателя.

$M_c$  – момент статического сопротивления механизма.

$w$  – угловая скорость вращения двигателя.

$T_\mu$  – малая постоянная времени преобразователя.

$k_n$  – коэффициент усиления СПА в якорной цепи.

$T_я$  – электромагнитная постоянная времени цепи якоря.

$R_{я}$  – активное сопротивление якорной цепи двигателя.

$k$  – конструктивная постоянная двигателя.

$\Phi$  – магнитный поток двигателя.

$T_m$  – инерционная постоянная времени двигателя.

Технические данные двигателя горизонтального петлевого устройства приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Данные двигателя 4П-355-25-200-У3

Мощность, кВт	200			
Напряжение, В	440			
Ток, А	515			
Частота вращения, об/мин	500/2000			
Число пар полюсов	2			
Динамический момент инерции якоря, кг·м <sup>2</sup>	14,7			
КПД при номинальной нагрузке (без учета потерь на принудительную вентиляцию), %	87,8			
Возбуждение, В (независимое)	220			
Падение напряжения в якорной цепи, В	39,5			
Номинальные режимы				
параметры (на один якорь)	режимы			
	1	2	3	4
Мощность, кВт	200	200		
Частота вращения, об/мин	500	2000	710	1000
Напряжение, В	440	440	600	600
Ток якоря, А	515	515	510	
Вращающий момент, кг·м <sup>2</sup>	3,82	0,955		
Ток возбуждения, А	25	4,6	23,5	12,2
Напряжение на обмотке возбуждения, В	186	34		
Поток главного полюса, Вб	0,0756	0,0189		
Данные обмоток				
обмотка	число витков на полюс	соединение	сопротивление при 15 град	
Якоря	39,75	А=1	0,0332	
Возбуждения	246	Послед.	4,96	
Добавочных полюсов	27	2 гр. пар.	0,00805	
Компенсационная	20 четв.	2 гр. пар.	0,0133	

Согласно типовой методике передаточная функция регулятора тока якоря [93, с. 105]:

$$W_{PT}(p) = \frac{T_{яp+1}}{2k_{пRя^{-1}}T_{\mu p}} \quad (3.1)$$

Что соответствует условию настройки системы автоматического регулирования на модульный оптимум.

Передаточная функция регулятора скорости также определяется по стандартной методике для единичных обратных связей [93, с. 116]:

$$W_{PC}(p) = \frac{T_M}{4T_{\mu}k\Phi} \quad (3.2)$$

### 3.1.2 Описание механических свойств полосы

В настоящее время недостаточно изучены вопросы динамики работы накопителей, методов улучшения динамических свойств механической части накопителя средствами электропривода. Среди особенностей, присущих электромеханической системе петлевого накопителя следует отметить ее значительную сложность. Она проявляется в многоэлементности и многомассовости структуры системы, наличии нелинейных элементов [7, с. 100; 94].

В процессе работы горизонтального петлевого устройства существенно изменяется длина полосы, находящейся в накопителе: от 50400 мм до 360000 мм. Поэтому для разработки модели электромеханической системы горизонтального петлевого устройства необходимо учитывать механические свойства полосы, зависящие от длины полосы, такие как момент инерции, провис, жесткость и т.д. [7, с. 100; 94, с. 76; 95-97].

Обычно при анализе систем с упругостями принимают, что упругие звенья невесомы и характеризуются постоянной жесткостью связи, т.е. коэффициентом пропорциональности между моментом (силой) и деформацией [39, с. 55; 40, с. 112; 68, с. 513]. В других случаях принимается, что материал обладает постоянной массой, но может менять свою жесткость в связи с изменением температуры [14, с. 17; 74, с. 165]. Также при расчете таких систем может быть допущение, что материал обладает постоянной массой и жесткостью [13; 98]. Но в данном случае данное утверждение не подходит, т.к. особенностью электромеханической системы горизонтального петлевого накопителя являются изменение длины полосы, находящейся в петлевом накопителе, а, следовательно, ее массы и жесткости. Момент инерции стальной полосы изменяется вследствие изменения ее длины (рисунки 2.2, 2.3), а, следовательно, и массы [2, с. 124].

Во время работы петлевого устройства петлеобразующая тележка перемещается в четырех зонах синхронизации (рисунок 1.4) [96, с. 67].

В случае, когда петлевое устройство полностью заполнено представлением о жесткой связи вала двигателя с механизмом не является допустимым. При этом холодная полоса обладает упругими связями и большой массой [2, с. 128; 39, с. 368; 40, с. 77].

В генераторном режиме (рисунок 2.2), когда идет выбор полосы из накопителя, переходные процессы удовлетворяют условиям, предъявляемым к электроприводу. Двигатель создает дополнительное натяжение в устройстве, при этом не происходит проскальзывания полосы и не наблюдаются колебания в системе [2, с. 124].

В двигательном режиме переходной процесс является колебательным с большой амплитудой [2, с. 124].

С точки зрения динамических процессов двигательный режим для петлевого устройства является наиболее опасным режимом, который необходимо исследовать [2, с. 124].

Как видно на рисунках 2.1 и 2.2 (графики), запас петли в накопителе может изменяться от 25÷60% до 80÷90%, а иногда и 100%. Учитывая, что длина петлевого устройства составляет 89600 мм, длина полосы в полностью набранном накопителе – порядка 360000 мм, а сечение полосы колеблется от 0,4×700 мм<sup>2</sup> до 2×1500 мм<sup>2</sup>, можно утверждать, что масса полосы изменяется значительно. И как видно из графиков, изменение происходит быстрее при выборе полосы из накопителя (0,5÷1,5 мин), чем при ее наборе (1,5÷4,5 мин) [96, с. 67].

Согласно принципу Релея [99; 100], для учета кинетической энергии полосы при колебаниях системы достаточно к массе ролика добавить одну треть массы полосы.

При расположении полосы на барабанах и опорных роликах, она провисает под действием сил тяжести. Зависимость между провисанием в середине пролета и натяжением для полосы имеет вид [96, с. 67; 101]:

$$f = \frac{ql^2}{8H}, \quad (3.3)$$

где  $f$  – провисание в середине пролета, м;

$q$  – интенсивность нагрузки, Н/см;

$l$  – длина пролета, м;

$H$  – натяжение, Н.

Интенсивность нагрузки для полосы определяется как [101, с. 465]:

$$q = g\rho Vh, \quad (3.4)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения,  $g=9,8$  м/с<sup>2</sup>;

$\rho$  – плотность полосы,  $\rho=7,8$  г/см<sup>3</sup>;

$V$  – ширина полосы, м;

$h$  – толщина полосы, мм.

Расстояние между параллельными ветвями полос в петлевом накопителе составляет 0,85 м. Исходя из особенностей конструкции накопителя, провис не должен превышать 0,3÷0,5 м. Минимальное натяжение должно составлять 5÷10 кН. Верхний уровень натяжения обусловлен пределом прочности полосы

$\sigma_{в} \leq 60$  кг/мм<sup>2</sup> [102]. Следовательно, максимальное натяжение составляет  $17 \div 30$  кН в зависимости от сечения полосы.

Длина пролета между опорными роликами и петлеобразующей тележкой изменяется во время движения последней при выборе и наборе полосы в накопитель. Расчетные кривые изменения провиса для полосы при натяжении 15 кН приведены на рисунке 3.2.

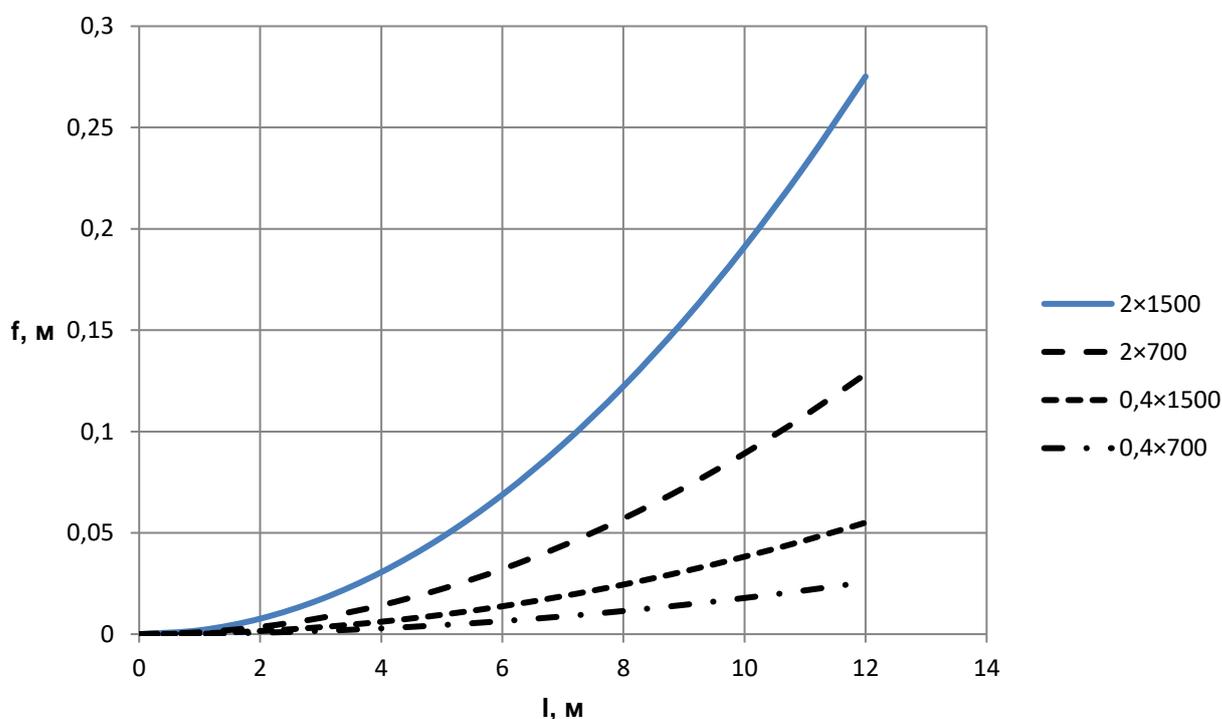


Рисунок 3.2 – Зависимость провиса полосы от длины пролета

Наибольший провис при любых условиях возникает в полосе с наибольшим сечением  $2 \times 1500$  мм<sup>2</sup> [96, с. 68; 97, с. 414].

Расчетные кривые изменения провиса для полосы при различных натяжениях приведены на рисунке 3.3.

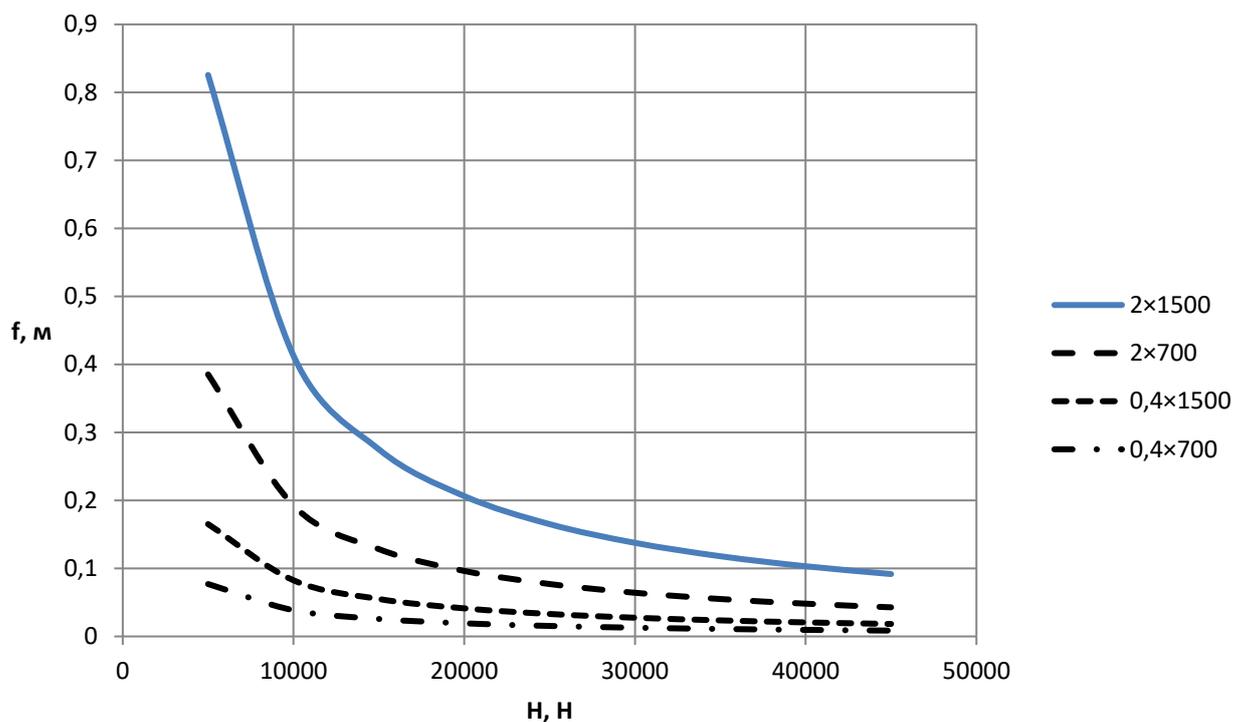


Рисунок 3.3 – Зависимость провиса полосы от натяжения

Жесткость цепи, каната и др. деталей, подвергающихся растяжению или сжатию, определяется [101, с. 465; 102, с. 608; 103]:

$$c = \frac{GJ_p}{l} \quad (3.5)$$

где  $J_p$  – полярный момент инерции сечения,  $\text{см}^4$ ;

$G$  – модуль упругости второго рода,  $\text{кг}/\text{см}^2$ .

Полярный момент инерции сечения определяется для сплошного прямоугольного сечения по формуле [90, р. 5; 97, с. 415; 102, с. 610]:

$$J_p = \frac{h^3 B}{12} \quad (3.6)$$

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)}, \quad (3.7)$$

где  $E$  – модуль Юнга или упругости второго рода, для стали  $E=2 \cdot 10^6 \text{ кг}/\text{см}^2$ ;

$\mu$  – коэффициент Пуассона или коэффициент поперечной деформации, для стали при упругих деформациях  $\mu=0,3$ .

$$G = \frac{2 \cdot 10^6}{2(1 + 0,3)} \approx 8 \cdot 10^5 \text{ кг}/\text{см}^2$$

Жесткость стальной полосы зависит от ее геометрических размеров [104]. Ширина и толщина полосы при проходе одного рулона практически не изменяются, а длина полосы колеблется значительно при передвижении петлеобразующей тележки в пределах накопителя, но при этом изменяется практически линейно. График зависимости жесткости от длины полосы для различных сечений приведен на рисунке 3.4.

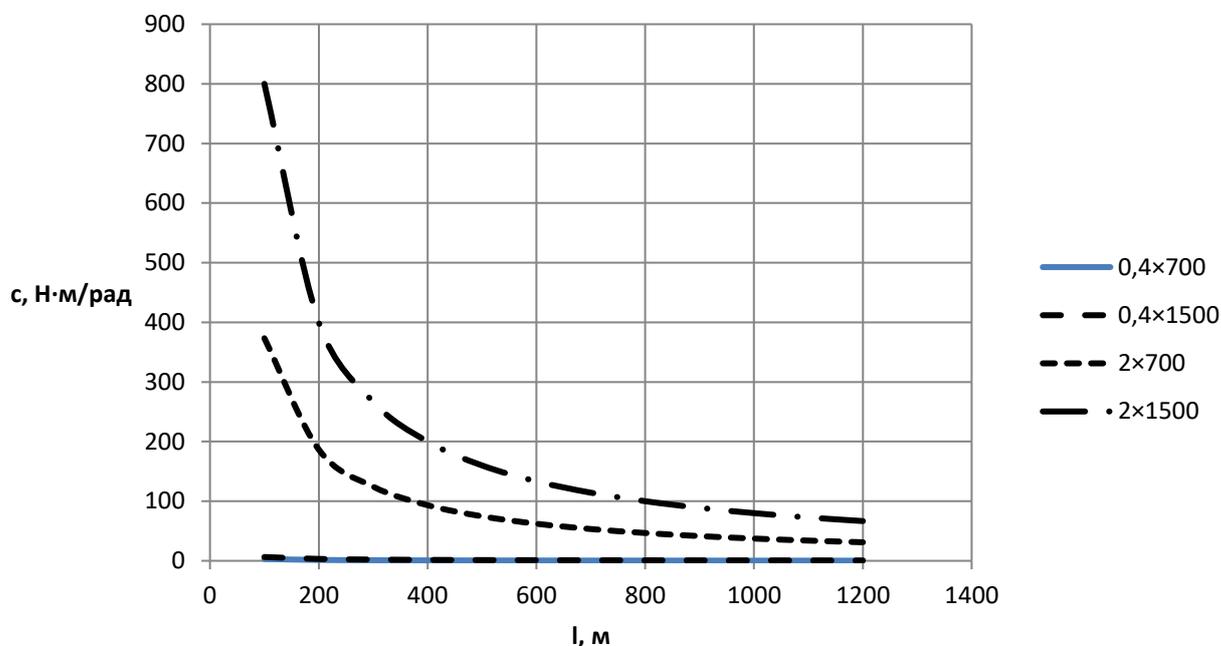


Рисунок 3.4 – Зависимость жесткости полосы для различных сечений

### 3.1.3 Математическая модель механической системы горизонтального накопителя полосы

На рисунке 3.5 представлена кинематическая схема горизонтального петлевого устройства [90, р. 2].

Натяжные, перегибный и центрирующий ролики установлены неподвижно. Ролики №1 и 2 установлены на подвижной тележке. В процессе работы тележка перемещается, при этом длина стальной полосы сокращается до минимальной (пустое устройство) или увеличивается до максимальной (полное устройство) [90, р. 2].

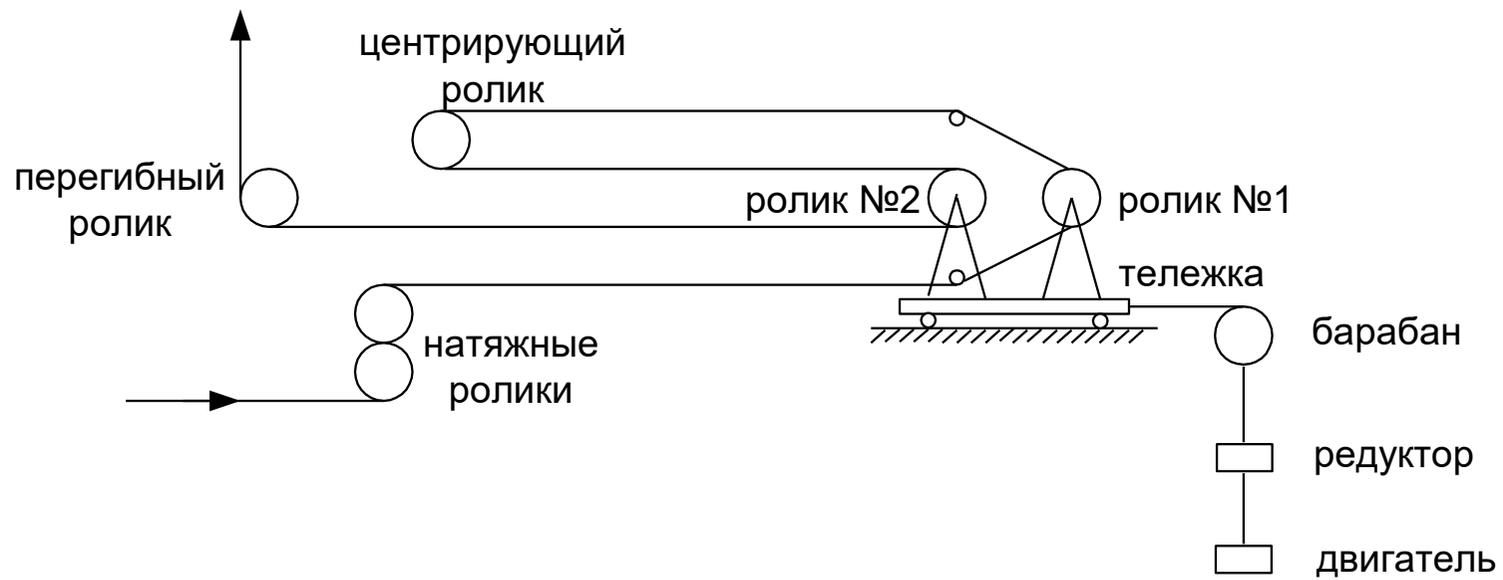


Рисунок 3.5 – Кинематическая схема горизонтального петлевого устройства

Моделирование петлевого устройства полосы во всех точках его работы является достаточно сложным, поэтому рассмотрим два крайних положения [2, с. 127; 56, с. 98; 94, с. 77; 105]:

- когда в накопитель полностью набрана полоса;
- когда из накопителя полностью выбрана полоса.

Расчетная схема примет для полностью заполненного петлевого устройства вид, приведенный на рисунке 3.6.

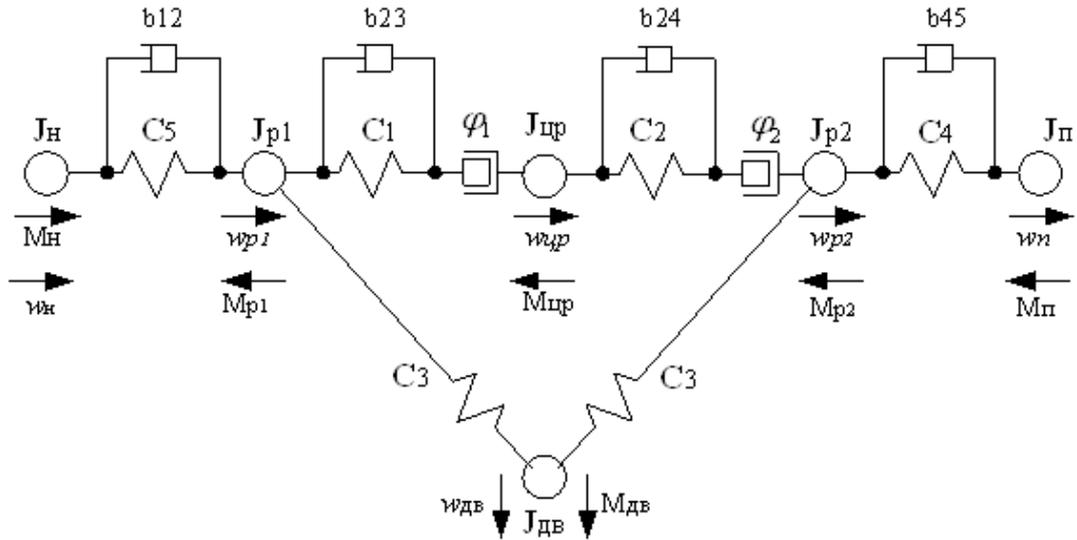


Рисунок 3.6 – Расчетная схема заполненного петлевого устройства

Система уравнений для этого случая [7, с.100; 89, р. 690; 90, р. 5; 106-110]:

$$\begin{aligned}
 M_n - M_{12} &= J_n \frac{dw_n}{dt} \\
 M_{12} &= c_5(\varphi_n - \varphi_{p1}) + b_{12}(w_n - w_{p1}) \\
 M_{12} - M_{23} - M_{56} &= J_{p1} \frac{dw_{p1}}{dt} \\
 M_{56} &= c_3(\varphi_{p1} - \varphi_{\partial\partial}) \approx M_{67} = c_3(\varphi_{p2} - \varphi_{\partial\partial}) \\
 \begin{cases} M_{23} = c_1(\varphi_{p1} - \varphi_{up} \pm \varphi_1/2) + b_{23}(w_{p1} - w_{up}) & \text{при } |\varphi_{p1} - \varphi_{up}| > \varphi_1/2 \\ M_{23} = 0 & \text{при } |\varphi_{p1} - \varphi_{up}| < \varphi_1/2 \end{cases} & (3.8) \\
 M_{23} - M_{34} &= J_{up} \frac{dw_{up}}{dt} \\
 \begin{cases} M_{34} = c_2(\varphi_{up} - \varphi_{p2} \pm \varphi_2/2) + b_{24}(w_{up} - w_{p2}) & \text{при } |\varphi_{up} - \varphi_{p2}| > \varphi_2/2 \\ M_{34} = 0 & \text{при } |\varphi_{up} - \varphi_{p2}| < \varphi_2/2 \end{cases} \\
 M_{34} - M_{45} - M_{67} &= J_{p2} \frac{dw_{p2}}{dt} \\
 M_{45} &= c_4(\varphi_{p2} - \varphi_n) + b_{45}(w_{p2} - w_n) \\
 M_{\partial\partial} - M_{56} - M_{67} &= J_{\partial\partial} \frac{dw_{\partial\partial}}{dt}
 \end{aligned}$$

где  $M_n, M_p, M_{дв}$  – моменты двигателей натяжного ролика, перегибного ролика и тележки петлевого устройства;

$J_n, J_{p1}, J_{p2}, J_{цр}, J_p, J_{дв}$  – моменты инерции натяжного ролика, ролика №1, ролика №2, центрирующего ролика, перегибного ролика, тележки петлевого устройства;

$c_1, c_2, c_4, c_5$  – жесткости упругих связей полосы между массами на соответствующих участках;

$c_3$  – жесткость упругой связи каната между барабаном тележки и тележкой петлевого устройства;

$\varphi_n, \varphi_{p1}, \varphi_{p2}, \varphi_{цр}, \varphi_p, \varphi_{дв}$  – вращательные перемещения натяжного ролика, ролика №1, ролика №2, центрирующего ролика, перегибного ролика, тележки петлевого устройства;

$\varphi_1, \varphi_2$  – зазоры;

$w_n, w_{p1}, w_{p2}, w_{цр}, w_p, w_{дв}$  – скорости вращения натяжного ролика, ролика №1, ролика №2, центрирующего ролика, перегибного ролика, тележки петлевого устройства;

$M_{12}, M_{23}, M_{34}, M_{45}, M_{56}, M_{67}$  – моменты упругих сил;

$b_{12}, b_{23}, b_{24}, b_{45}$  – коэффициенты демпфирования [7, с. 100].

Данная система уравнений действительна и для пустого и для заполненного горизонтального петлевого устройства. В системе уравнений будут меняться коэффициенты  $c, b$  и  $J$  для разных положений в зависимости от длины полосы.

На основании системы уравнений (3.8) разработана структурная схема электромеханической системы заполненного горизонтального петлевого устройства, представленная на рисунке 3.7. Схема дополнена электроприводом постоянного тока, выполненного по схеме с подчиненным регулированием. Двигатель на схеме обведен пунктирной линией. Так же на схеме пунктирной линией обведены механические части ролика 1, ролика 2, перегибного ролика, центрирующего ролика и натяжных роликов. Остальные блоки являются упругими механическими связями. Входным воздействием на двигатель является задающий сигнал от системы управления. Входные воздействия  $M_n$  и  $M_p$  являются моментами, соответствующим моментам двигателей натяжного ролика и перегибного ролика [7, с. 101; 90, р. 4].

Натяжение в полосе от вторых тянущих роликов до первого петлевого устройства  $F_1=500\div 2500$  кгс= $4905\div 24525$  Н.

Натяжение в полосе от первого петлевого устройства до третьих тянущих роликов  $F_2=500\div 2500$  кгс= $4905\div 24525$  Н.

Момент тянущих роликов №2, Н·м:

$$M_n = F_1 \cdot R_{рол} \quad (3.9)$$

где  $R_{рол}$  – радиус роликов, м.

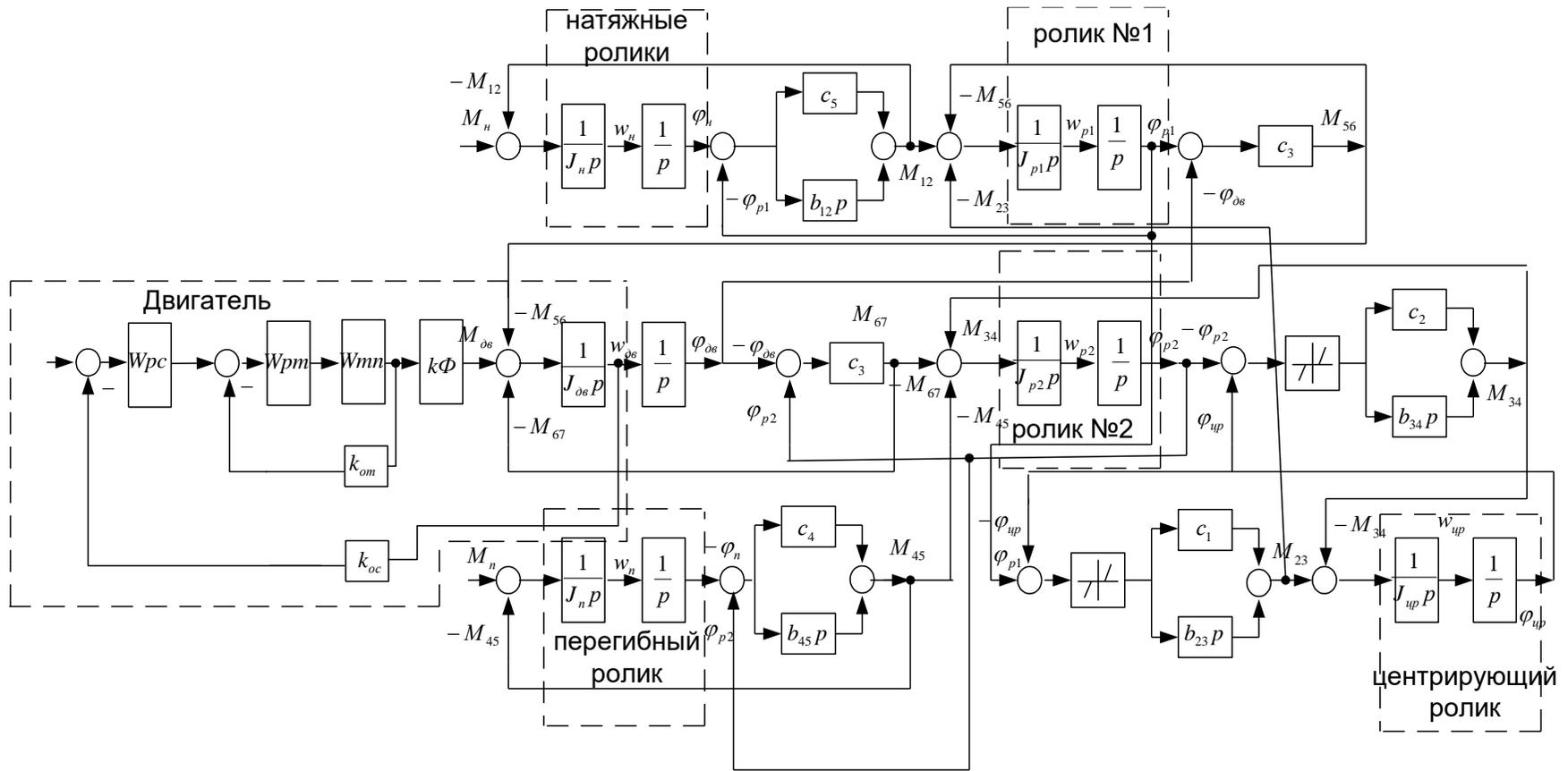


Рисунок 3.7 – Структурная схема петлевого устройства

Момент тянущих роликов №2, приведенный к валу двигателя, Н·м:

$$M'_H = \frac{M_H}{i_\Sigma} \quad (3.10)$$

Передаточное число:

$$i_\Pi = \frac{R_{\text{бар}}}{R_{\text{рол}}} \quad (3.11)$$

$$i_\Sigma = i_{\text{ред}} i_\Pi \quad (3.12)$$

Момент на перегибном ролике, Н·м:

$$M_\Pi = F_2 \cdot R_{\text{п.рол}} \quad (3.13)$$

где  $R_{\text{п.рол}}$  – радиус перегибного ролика, м.

Момент на перегибном ролике, приведенный к валу двигателя, Н·м:

$$M'_\Pi = \frac{M_\Pi}{i_\Sigma} \quad (3.14)$$

Масса полосы определяется как:

$$m_{\text{пол}} = V \cdot \rho = l \cdot h \cdot B \cdot \rho \quad (3.15)$$

где  $V$  – объем полосы, см<sup>3</sup>;

$l$  – длина полосы, м;

$h$  – толщина полосы, м;

$B$  – ширина полосы, м;

$\rho$  – плотность стали,  $\rho=7,8 \cdot 10^{-3}$  кг/см<sup>3</sup>.

Момент инерции натяжного ролика, кг·м<sup>2</sup> [111, 112]:

$$J_H = (m_H + m_4/3)R_H^2 \quad (3.16)$$

где  $m_H$  – масса натяжного ролика, кг;

$m_4$  – масса полосы от ролика №1 до натяжных роликов, кг.

Момент инерции перегибного ролика, кг·м<sup>2</sup>:

$$J_\Pi = (m_\Pi + m_1/3)R_\Pi^2 \quad (3.16)$$

где  $m_\Pi$  – масса перегибного ролика, кг;

$m_1$  – масса полосы от перегибного ролика до ролика №2, кг;

$R_\Pi$  – радиус перегибного ролика, м.

Момент инерции ролика №1, кг·м<sup>2</sup>:

$$J_{p1} = (m_{p1} + m_4/3 + m_3/3)R_{p1}^2 \quad (3.17)$$

где  $m_3$  – масса полосы от центрирующего ролика до ролика №1, кг;  
 $m_{p1}$  – масса ролика №1, кг;  
 $R_{p1}$  – радиус ролика №1, м.  
 Момент инерции ролика №2, кг·м<sup>2</sup>:

$$J_{p2} = (m_{p2} + m_2/3 + m_1/3)R_{p2}^2 \quad (3.18)$$

где  $m_2$  – масса полосы от ролика №2 до центрирующего ролика, кг;  
 $m_{p2}$  – масса ролика №2, кг;  
 $R_{p2}$  – радиус ролика №2, м.  
 Момент инерции центрирующего ролика, кг·м<sup>2</sup>:

$$J_{цр} = (m_{цр} + m_2/3 + m_3/3)R_{цр}^2 \quad (3.19)$$

где  $R_{цр}$  – радиус центрирующего ролика, м;  
 $m_{цр}$  – масса центрирующего ролика, кг.  
 Жесткость цепи, каната и др. деталей, подвергающихся растяжению или сжатию,  $\frac{Н \cdot м}{рад}$  [101, с. 463]:

$$c_3 = \frac{GJ_p}{l} \quad (3.20)$$

где  $J_p$  – полярный момент инерции сечения, см<sup>4</sup>;  
 $G$  – модуль упругости при сдвиге или модуль упругости второго рода, кг/см<sup>2</sup>.

Полярный момент инерции сечения каната представляет собой чисто геометрическую характеристику и определяется для сплошного кругового сечения по формуле [102, с. 559]:

$$J_{p.кан} = \frac{\pi D^4}{32} \quad (3.21)$$

где  $E$  – модуль Юнга или упругости второго рода, для стали  $E=2 \cdot 10^6$  кг/см<sup>2</sup>;  
 $G$  – модуль упругости второго рода, кг/см<sup>2</sup> определяется по формуле (2.7);  
 $\mu$  – коэффициент Пуассона или коэффициент поперечной деформации, для стали при упругих деформациях  $\mu=0,3$ .

Жесткость полосы,  $\frac{Н \cdot м}{рад}$ :

$$c = \frac{GJ_p}{l} \quad (3.22)$$

где  $J_p$  – полярный момент инерции сечения, см<sup>4</sup>;

$G$  – модуль упругости при сдвиге или модуль упругости второго рода, кг/см<sup>2</sup>.

Полярный момент инерции сечения полосы [102, с. 560]:

$$J_{p.пол} = \frac{h^3 B}{12} \quad (3.23)$$

где  $h$  – толщина полосы, м;

$B$  – ширина полосы, м.

Коэффициент внутреннего вязкого трения упругих элементов механических передач станов горячей прокатки,  $\frac{H \cdot m \cdot c}{рад}$  [113]:

$$b = (2 \div 12) \cdot 10^{-4} \cdot c \quad (3.24)$$

В механических элементах привода демпфирование соответствует логарифмическому декременту затухания  $\lambda=(0,15 \div 0,3)$ , а коэффициент демпфирования  $b$  можно определить по формуле [114]:

$$b = \frac{\lambda}{\pi} \sqrt{\frac{J}{e}} \quad (3.25)$$

где  $e=1/c$  – податливость.

Зазор, приведенный к валу двигателя, м [111, с. 230]:

$$\varphi = \frac{f i_{\Sigma}}{R_6} \quad (3.26)$$

Рассмотрим второй случай работы, когда в петлевом устройстве полностью выбрана полоса.

В этом случае, когда в петлевом устройстве полностью выбрана полоса, можно моменты инерции ролика №1, ролика №2 и центрирующего ролика объединить в один суммарный момент инерции, пренебрегая длиной, массой и жесткостью полосы между ними. Это обусловлено тем, что в указанном положении длина полосы незначительна по сравнению с тем случаем, когда петлевое устройство полностью заполнено [7, с. 101].

На рисунке 3.8 приведена расчетная схема пустого петлевого устройства.

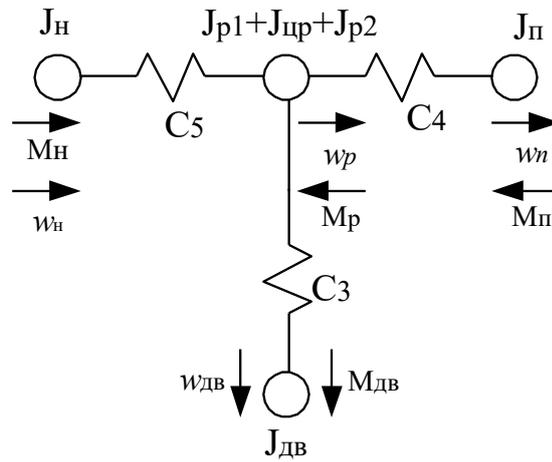


Рисунок 3.8 – Расчетная схема пустого петлевого устройства

Система уравнений для этого случая примет вид [7, с. 103]:

$$\begin{aligned}
 M_n - M_{12} &= J_n \frac{dw_n}{dt} \\
 M_{12} &= c_5(\varphi_n - \varphi_{p1+цр+p2}) + b_{12}(w_n - w_{p1+цр+p2}) \\
 M_{12} - M_{45} - M_{56} &= (J_{p1} + J_{цр} + J_{p2}) \frac{dw_p}{dt} \\
 M_{45} &= c_4(\varphi_n - \varphi_{p1+цр+p2}) + b_{12}(w_n - w_p) \\
 M_{56} &= c_3(\varphi_{p1+цр+p2} - \varphi_{дв}) \\
 M_{дв} - M_{56} &= J_{дв} \frac{dw_{дв}}{dt}
 \end{aligned} \tag{3.27}$$

В уравнении 3.27 приведены те же величины, что и в уравнении 3.8.

На основании системы уравнений (3.27) разработана структурная схема электромеханической системы пустого горизонтального петлевого устройства, представленная на рисунке 3.9. Схема дополнена электроприводом постоянного тока, выполненного по схеме с подчиненным регулированием. Двигатель на схеме обведен пунктирной линией. Так же на схеме пунктирной линией обведены механические части центрирующего ролика и натяжных роликов, а также суммарная механическая часть ролика 1, ролика 2 и перегибного ролика, объединенных в одну массу. Остальные блоки являются упругими механическими связями. Входным воздействием на двигатель является задающий сигнал от системы управления. Входные воздействия  $M_n$  и  $M_p$  являются моментами, соответствующим моментам двигателей натяжного ролика и перегибного ролика [89, р. 685].

Структурная схема пустого петлевого устройства приведена на рисунке 3.9.

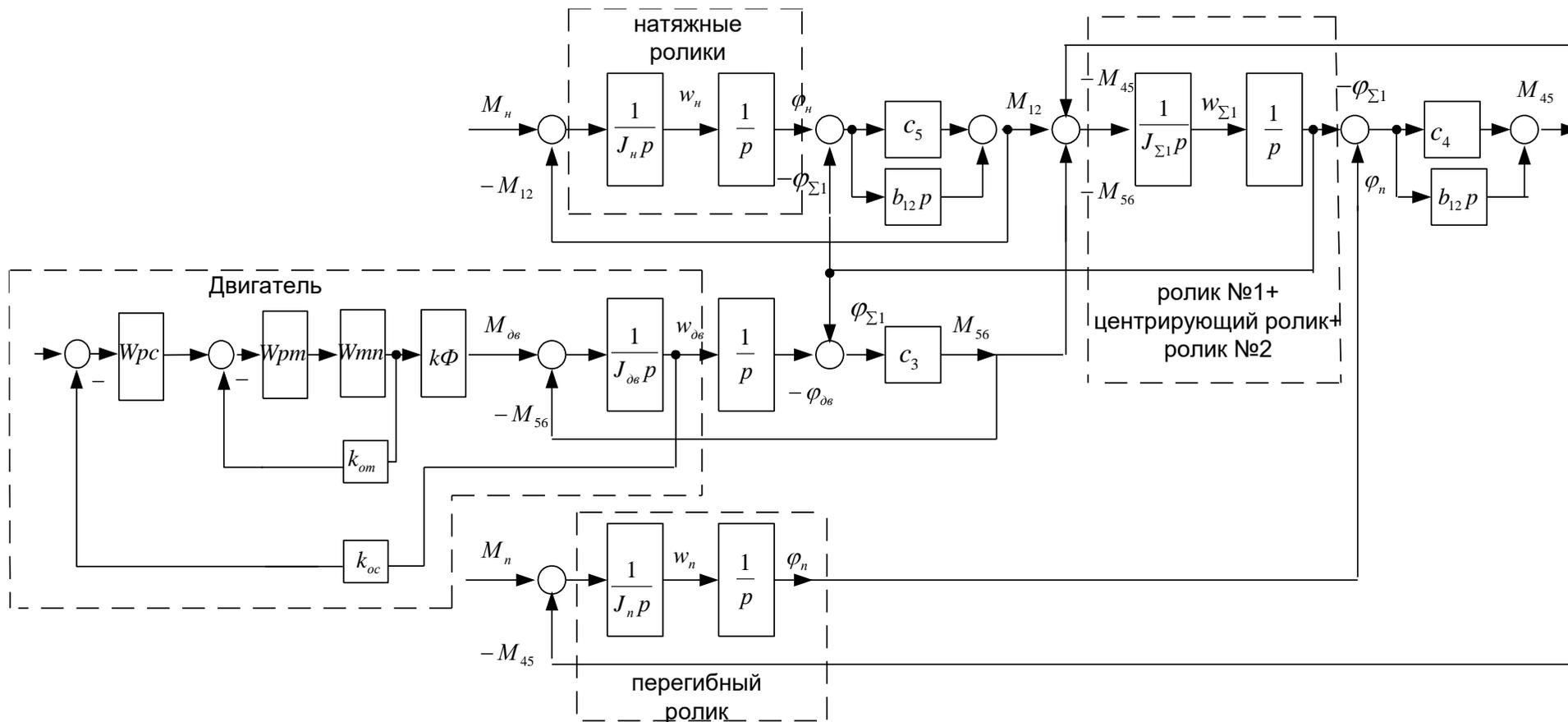


Рисунок 3.9 – Структурная схема пустого петлевого устройства

## **3.2 Разработка имитационной модели электромеханической системы горизонтального петлевого устройства**

### **3.2.1 Методы и средства разработки имитационных моделей**

Различают физическое и математическое моделирование. Примером физической модели является уменьшенная копия какого-либо объекта. При использовании математического моделирования поведение системы описывается с помощью формул. Особым видом математических моделей являются имитационные модели [115].

Имитационное моделирование (ситуационное моделирование) – метод, позволяющий строить модели, описывающие процессы так, как они проходили бы в действительности. Такую модель можно «проиграть» во времени как для одного испытания, так и заданного их множества. При этом результаты будут определяться случайным характером процессов. По этим данным можно получить достаточно устойчивую статистику [116].

При имитационном моделировании изучаемая система заменяется моделью, с достаточной точностью описывающей реальную систему, с которой проводятся эксперименты с целью получения информации об этой системе. Экспериментирование с моделью называют имитацией (имитация – это постижение сути явления, не прибегая к экспериментам на реальном объекте) [116].

Имитационным моделированием иногда называют получение частных численных решений сформулированной задачи на основе аналитических решений или с помощью численных методов [116].

Имитационная модель – это компьютерная программа, которая описывает структуру и воспроизводит поведение реальной системы во времени. Имитационная модель позволяет получать подробную статистику о различных аспектах функционирования системы в зависимости от входных данных [115].

Имитационная модель – логико-математическое описание объекта, которое может быть использовано для экспериментирования на компьютере в целях проектирования, анализа и оценки функционирования объекта [116].

К имитационному моделированию прибегают, когда [116]:

- дорого или невозможно экспериментировать на реальном объекте;
- невозможно построить аналитическую модель: в системе есть время, причинные связи, последствие, нелинейности, стохастические (случайные) переменные;

- необходимо симитировать поведение системы во времени.

Цель имитационного моделирования состоит в воспроизведении поведения исследуемой системы на основе результатов анализа наиболее существенных взаимосвязей между её элементами или другими словами – разработке симулятора (англ. simulation modeling) исследуемой предметной области для проведения различных экспериментов [116].

Имитационное моделирование позволяет имитировать поведение системы во времени. Причём плюсом является то, что временем в модели можно управлять: замедлять в случае с быстропротекающими процессами и

ускорять для моделирования систем с медленной изменчивостью. Можно имитировать поведение тех объектов, реальные эксперименты с которыми дороги, невозможны или опасны [116].

Виды имитационного моделирования [116].

- агентное моделирование;
- дискретно-событийное моделирование;
- системная динамика.

Применение имитационных моделей дает множество преимуществ по сравнению с выполнением экспериментов над реальной системой и использованием других методов [115].

*Стоимость.* Натурные эксперименты весьма дороги или они могут нарушить ход производственного процесса [115; 117].

*Время.* В реальности оценить эффективность, например, новой структуры технологического процесса можно лишь через месяцы или даже годы. Имитационная модель позволяет определить оптимальность таких изменений за считанные минуты, необходимые для проведения эксперимента [115; 117, с. 39].

*Повторяемость.* С помощью имитационной модели можно провести неограниченное количество экспериментов с разными параметрами, чтобы определить наилучший вариант [115; 117, с. 39].

*Точность.* Традиционные расчетные математические методы требуют применения высокой степени абстракции и не учитывают важные детали. Имитационное моделирование позволяет описать структуру системы и её процессы в естественном виде, не прибегая к использованию формул и строгих математических зависимостей [115; 117, с. 39].

*Наглядность.* Имитационная модель обладает возможностями визуализации процесса работы системы во времени, схематичного задания её структуры и выдачи результатов в графическом виде. Это позволяет наглядно представить полученное решение и донести заложенные в него идеи до клиента и коллег [115; 117, с. 39].

*Универсальность.* Имитационное моделирование позволяет решать задачи из любых областей производства. В каждом случае модель имитирует, воспроизводит, реальную жизнь и позволяет проводить широкий набор экспериментов без влияния на реальные объекты [115; 117, с. 39].

Различие в подходе к моделированию больших и технических систем накладывает отпечаток и на характер интерпретации выходной информации при моделировании. Если рассматривать предельные случаи, то вероятностная имитационная модель большой системы может использоваться для получения одного единственного числа, характеризующего, например, уровень средней рентабельности к определенному году. В то же время модель детерминированной, но разветвленной технической конструкции с распределенной массой, которая используется для принятия решения о траектории ее перемещения, может потребовать интерпретации громадного

массива трехмерных координат и углов ориентации для множества элементов этой конструкции [118, 119].

Имитационное моделирование на цифровых вычислительных машинах является одним из наиболее мощных средств исследования, в частности, сложных динамических систем. Как и любое компьютерное моделирование, оно дает возможность проводить вычислительные эксперименты с еще только проектируемыми системами и изучать системы, натурные эксперименты с которыми, из-за соображений безопасности или дороговизны, не целесообразны. В тоже время, благодаря своей близости по форме к физическому моделированию, этот метод исследования доступен более широкому кругу пользователей [120].

Пакеты визуального моделирования позволяют пользователю вводить описание моделируемой системы в естественной для прикладной области и преимущественно графической форме (например, в буквальном смысле рисовать функциональную схему, размещать на ней блоки и соединять их связями), а также представлять результаты моделирования в наглядной форме, например, в виде диаграмм или анимационных картинок [120].

Еще одной важной особенностью современного пакета автоматизации моделирования является использование технологии объектно-ориентированного моделирования, что позволяет резко расширить границы применимости и повторного использования уже созданных и подтвердивших свою работоспособность моделей [120].

В настоящее время существует большое количество визуальных средств моделирования. Рассмотрим универсальные пакеты, позволяющие моделировать структурно-сложные гибридные системы, которые можно условно разделить на три группы [117, с. 40; 120]:

- 1) пакеты «блочного моделирования»;
- 2) пакеты «физического моделирования»;
- 3) пакеты, ориентированные на схему гибридного автомата.

Это деление является условным прежде всего потому, что все эти пакеты имеют много общего: позволяют строить многоуровневые иерархические функциональные схемы, поддерживают в той или иной степени технологию объектно-ориентированного моделирования, предоставляют сходные возможности визуализации и анимации. Отличия обусловлены тем, какой из аспектов сложной динамической системы сочтен наиболее важным [120].

Пакеты «блочного моделирования» ориентированы на графический язык иерархических блок-схем. Элементарные блоки являются либо predetermined, либо могут конструироваться с помощью некоторого специального вспомогательного языка более низкого уровня. Новый блок можно собрать из имеющихся блоков с использованием ориентированных связей и параметрической настройки. В число predetermined элементарных блоков входят чисто непрерывные, чисто дискретные и гибридные блоки [120].

К достоинствами этого подхода следует отнести, прежде всего, чрезвычайную простоту создания не очень сложных моделей даже не слишком

подготовленным пользователем. Другим достоинством является эффективность реализации элементарных блоков и простота построения эквивалентной системы. В то же время при создании сложных моделей приходится строить довольно громоздкие многоуровневые блок-схемы, не отражающие естественной структуры моделируемой системы. Другими словами, этот подход работает хорошо, когда есть подходящие стандартные блоки [120].

Наиболее известными представителями пакетами "блочного моделирования" являются [120]:

- подсистема SIMULINK пакета MATLAB (MathWorks, Inc.);
- EASY5 (Boeing);
- подсистема SystemBuild пакета MATRIXx (Integrated Systems, Inc.);
- VisSim (Visual Solution).

Пакеты «физического моделирования» позволяют использовать неориентированные и потоковые связи. Пользователь может сам определять новые классы блоков. Непрерывная составляющая поведения элементарного блока задается системой алгебро-дифференциальных уравнений и формул. Дискретная составляющая задается описанием дискретных событий (события задаются логическим условием или являются периодическими), при возникновении которых могут выполняться мгновенные присваивания переменным новых значений. Дискретные события могут распространяться по специальным связям. Изменение структуры уравнений возможно только косвенно через коэффициенты в правых частях (это обусловлено необходимостью символьных преобразований при переходе к эквивалентной системе) [120].

Пакеты, основанные на использовании схемы гибридного автомата, позволяют очень наглядно и естественно описывать гибридные системы со сложной логикой переключений. Необходимость определения эквивалентной системы при каждом переключении заставляет использовать только ориентированные связи. Пользователь может сам определять новые классы блоков. Непрерывная составляющая поведения элементарного блока задается системой алгебро-дифференциальных уравнений и формул. К недостаткам следует также отнести избыточность описания при моделировании чисто непрерывных систем [120].

Для имитационного моделирования электропривода горизонтального петлевого устройства был выбран пакет расширения Simulink пакета прикладных программ MATLAB.

Данная компьютерная система проведения математических расчетов довольно широко применяется для моделирования и научных исследований [121-127].

MATLAB – это высокоуровневый язык технических расчетов, интерактивная среда разработки алгоритмов и современный инструмент анализа данных. MATLAB по сравнению с традиционными языками программирования (C/C++, Java, Pascal, FORTRAN) позволяет на порядок сократить время решения типовых задач и значительно упрощает разработку

новых алгоритмов. MATLAB представляет собой основу всего семейства продуктов MathWorks и является главным инструментом для решения широкого спектра научных и прикладных задач, в таких областях как: моделирование объектов и разработка систем управления, проектирование коммуникационных систем, обработка сигналов и изображений, измерение сигналов и тестирование, финансовое моделирование, вычислительная биология и др. [128].

Программа Simulink является приложением к пакету прикладных программ MATLAB. При моделировании с использованием Simulink реализуется принцип визуального программирования, в соответствии с которым, пользователь на экране из библиотеки стандартных блоков создает модель устройства и осуществляет расчеты. При этом, в отличие от классических способов моделирования, пользователю не нужно досконально изучать язык программирования и численные методы математики, а достаточно общих знаний требующихся при работе на компьютере и, естественно, знаний той предметной области, в которой он работает [129].

Simulink является достаточно самостоятельным инструментом MATLAB и при работе с ним совсем не требуется знать сам MATLAB и остальные его приложения. С другой стороны доступ к функциям MATLAB и другим его инструментам остается открытым и их можно использовать в Simulink. Часть входящих в состав пакетов имеет инструменты, встраиваемые в Simulink (например, LTI-Viewer приложения Control System Toolbox – пакета для разработки систем управления). Имеются также дополнительные библиотеки блоков для разных областей применения (например, Power System Blockset – моделирование электротехнических устройств, Digital Signal Processing Blockset – набор блоков для разработки цифровых устройств и т.д) [129].

При моделировании пользователь может выбирать метод решения дифференциальных уравнений, а также способ изменения модельного времени (с фиксированным или переменным шагом). В ходе моделирования имеется возможность следить за процессами, происходящими в системе. Для этого используются специальные устройства наблюдения, входящие в состав библиотеки Simulink. Результаты моделирования могут быть представлены в виде графиков или таблиц [129].

Simulink предоставляет решатели для симуляции широкого диапазона типов систем, включая системы непрерывного времени (аналоговые), дискретного времени (цифровые), гибридные (смешанный сигнал) и системы с различными периодами дискретизации любого размера. При помощи решателей в Simulink можно выполнять симуляцию жёстких систем и систем с разрывами. Можно задавать опции симуляции, включая тип и свойства решателя, время начала и конца симуляции и выполнять загрузку или сохранение данных симуляции. Можно также настраивать оптимизационную и диагностическую информацию. Вместе с моделью можно сохранять разные опциональные комбинации [130].

В Simulink имеются 2 размера шага расчета [131]:

1. Решатели фиксированного шага решают модель с помощью того же размера шага с начала в конец симуляции. Можно задать размер шага или позволить решателю выбрать его. Обычно уменьшение размера шага увеличивает точность результатов и время, требуемое симулировать систему [131].

2. Решатели переменного шага варьируются размер шага во время симуляции. Эти решатели уменьшают размер шага, чтобы увеличить точность в определенных событиях во время симуляции модели, таких как быстрые изменения состояния, события пересечения нулем, и т.д. Кроме того, они увеличивают размер шага, чтобы не делать ненужные шаги, когда состояния изменения модели медленно. Вычисление размера шага добавляет к вычислительным издержкам на каждом шаге. Однако это может сократить общее количество шагов, и, следовательно, время симуляции, требуемое обеспечить заданный уровень точности для моделей с нулевыми пересечениями, быстро изменив состояния и другие события, требующие дополнительного расчета [131].

Непрерывные решатели используют численное интегрирование, чтобы вычислить непрерывные состояния модели на шаге текущего времени на основе состояний на предыдущих временных шагах и производных состояния. Непрерывные решатели используют отдельные блоки, чтобы вычислить значения дискретных состояний модели на каждом временном шаге [131].

Дискретные решатели, в основном, используются в решении чисто дискретных моделей. Они вычисляют только следующий шаг времени симуляции для модели. Когда они выполняют этот расчет, они используют каждый блок в модели, чтобы обновить ее отдельное дискретное состояние. Они не вычисляют непрерывные состояния [131].

Для исследований был использован одношаговый явный метод Рунге-Кутты 4 и 5 порядка. Этот классический метод, который обычно дает удовлетворительные результаты [131].

### 3.2.2 Имитационная модель системы автоматического регулирования скорости двигателя

Имитационная модель системы автоматического регулирования (САР) двигателя постоянного тока приведена на рисунке 3.10.

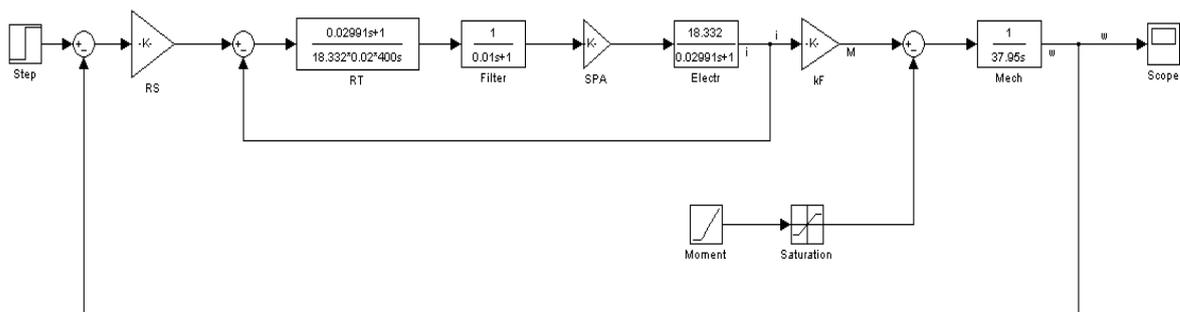


Рисунок 3.10 – Имитационная модель САР

Модель включает в себя регулятор скорости RS, регулятор тока RT, фильтр Filter, силовой полупроводниковый агрегат SPA, электрическую Electr и механическую Mech часть двигателя, блок кФ, осуществляющий переход от тока к моменту.

В традиционных моделях двигателей не учитывается, что в начальный момент моделирования момент сопротивления превышает электромагнитный момент двигателя, поэтому направление вращения двигателя в модели может быть отрицательным. Для устранения этого недостатка в модель введены блоки Saturation и Moment. Они обеспечивают постепенное повышение момента сопротивления во времени и ограничение его на определенном уровне, соответствующем номинальной нагрузке. Входными воздействиями являются напряжение задания Step, момента статического сопротивления Moment, а выходными – значения скорости вращения  $\omega$  и тока якоря  $i$ .

В таблице 3.2 приведены параметры САР горизонтального петлевого устройства.

Таблица 3.2 – Параметры САР горизонтального петлевого устройства

Обозначение параметра	$k_{PC}$	$R_{я}$	$k_{п}$	$T_{я}$	$T_{ц}$	$T_{M}$
Величина	127,932	0,0332	440	0,02991	0,01	37,95

На рисунке 3.11 представлены результаты имитационного моделирования САР электропривода горизонтального петлевого устройства. На нем приведена реакция на управляющее воздействие на двигатель. На графиках показаны скорость двигателя (а) и ток двигателя (б).

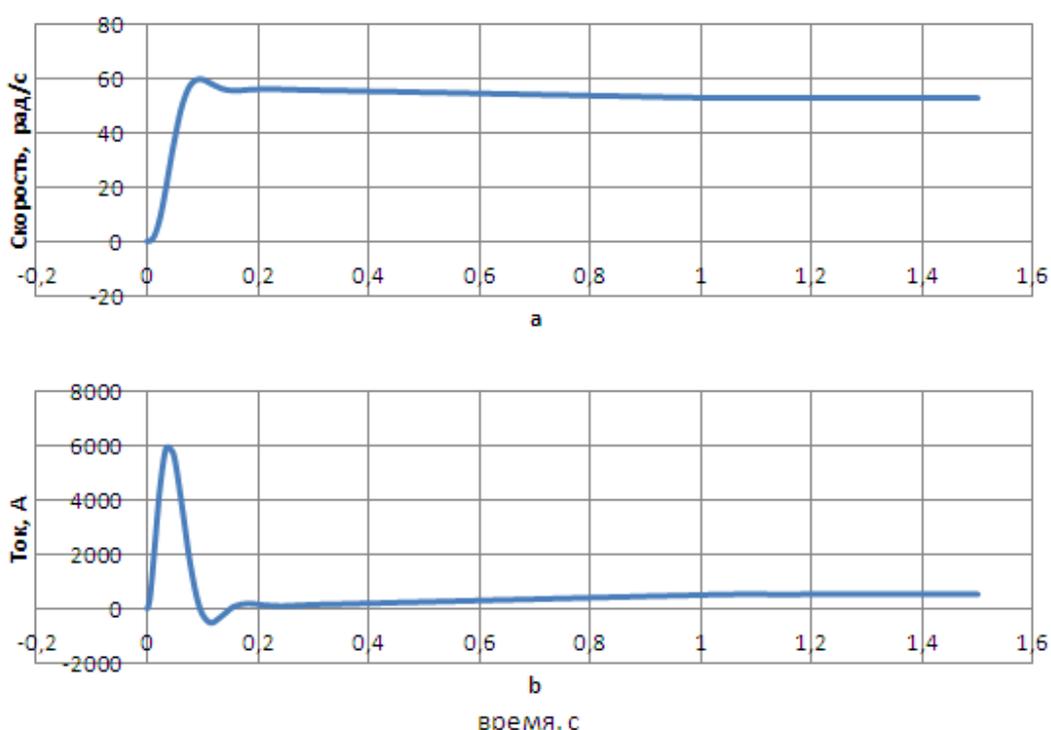


Рисунок 3.11 – Переходные процессы в САР

Результаты имитационного эксперимента практически совпадают с номинальными данными двигателя. Проверка адекватности модели осуществляется с помощью средней ошибки аппроксимации, величина которой не должна превышать 12-15% [132].

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{n} \sum \frac{|y_i - y_x|}{y_i} \cdot 100\% \quad (3.28)$$

где  $y_i$  – значение параметра по отклику модели;

$y_x$  – номинальное значение параметра;

$n$  – количество измерений.

Для  $n=5$  измерений средняя ошибка аппроксимации равна  $\bar{\varepsilon} = 1,5 \%$ .

Эксперименты, проведенные на модели, показывают, что полученная модель достоверно описывает моделируемый процесс с доверительной вероятностью 98,5% (таблица 3.3).

Таблица 3.3 – Результаты имитационного моделирования и номинальные данные двигателя 4П-355-25-200-У3

Параметр	$I_H, A$	$\omega, \text{рад/с}$	$M, \text{Н}\cdot\text{м}$
Номинальные параметры	515	52,356	3829,71
Результаты имитационного моделирования	516,4	52,96	3830
$\Delta, \%$	0,27	1,14	0,008

### 3.2.3 Имитационные модели механической системы горизонтального накопителя полосы

Для разработки математической модели такого сложного агрегата необходимо обладать информацией о механических параметрах полосы, включая упругие моменты и частоты колебаний полосы. Однако в действующем агрегате осциллографируются только 3 параметра горизонтального петлевого устройства: ток двигателя, линейная скорость и запас петли в устройстве. Измерение упругих моментов в ветвях полосы и расстояние между ветвями не представляются возможным в связи с отсутствием в действующем агрегате необходимых для этого датчиков [90, р. 2].

В связи с изложенным, на агрегате был проведен визуальный эксперимент, который описан во второй главе. Визуально с помощью видеозаписи и секундомера был определен период колебаний. Частота колебаний изменялась в пределах  $0,3 \div 0,5$  Гц. Была зафиксирована амплитуда колебаний, равная расстоянию между параллельными нитками полосы. Расстояние между параллельными ветвями полос в петлевом накопителе составляет 0,85 м. Визуальные наблюдения показывают, что максимальная амплитуда колебаний полосы составляет 0,85 м [90, р. 2].

Имитационная модель петлевого устройства составлена по системе уравнений (3.8) и приведена на рисунке 3.12 [133].

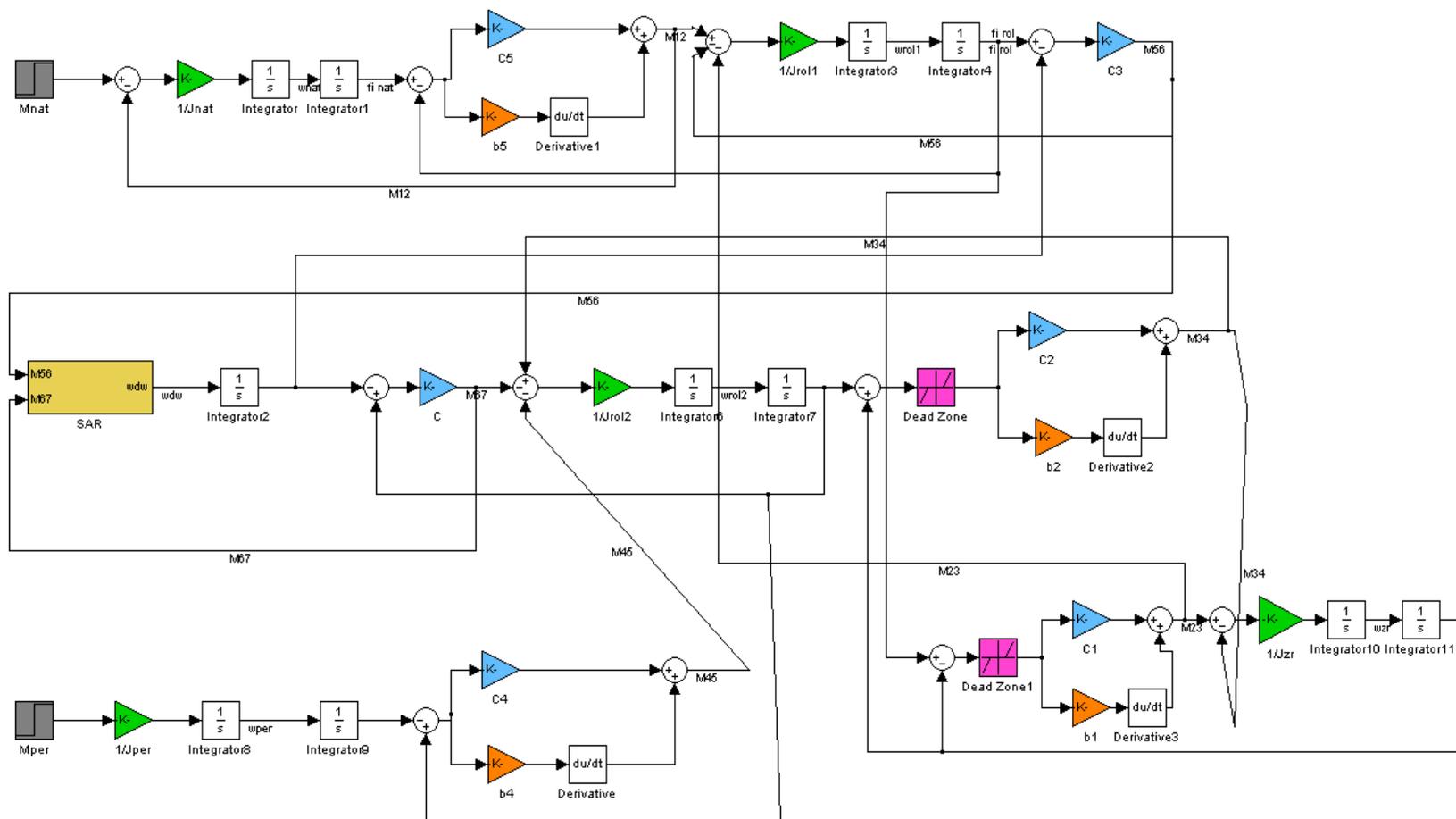


Рисунок 3.12 – Имитационная модель петлевого устройства

Субсистема SAR является системой автоматического регулирования скорости двигателя горизонтального петлевого устройства. Блоки  $c_1, c_2, c_4, c_5$  – жесткости упругих связей полосы между массами на соответствующих участках;  $c_3$  – жесткость упругой связи каната между барабаном тележки и тележкой петлевого устройства;  $b_1, b_2, b_4, b_5$  – коэффициенты демпфирования. Блоки DeadZone и DeadZone1 – зазоры. Блоки  $1/J_{per}, 1/J_{nat}, 1/J_{rol1}, 1/J_{rol2}, 1/J_z$  представляют собой механические части перегибного ролика, натяжных роликов, ролика №1, ролика №2 и центрирующего ролика соответственно [7, с. 102; 90, р. 5].

Входными воздействиями в модели являются  $M_{nat}, M_{per}$ , – моменты натяжного ролика, перегибного ролика и напряжение задания Step, выходными – скорость и ток двигателя, моменты упругих сил.

На выходе фиксировалась реакция на входное ступенчатое воздействие.

На осциллограммах рисунка 3.13 приведены результаты эксперимента для пустого накопителя полосы, на рисунках 3.14 и 3.15 – для заполненных на 50% и 75% соответственно, а на рисунке 3.16 – для полностью заполненного накопителя полосы.

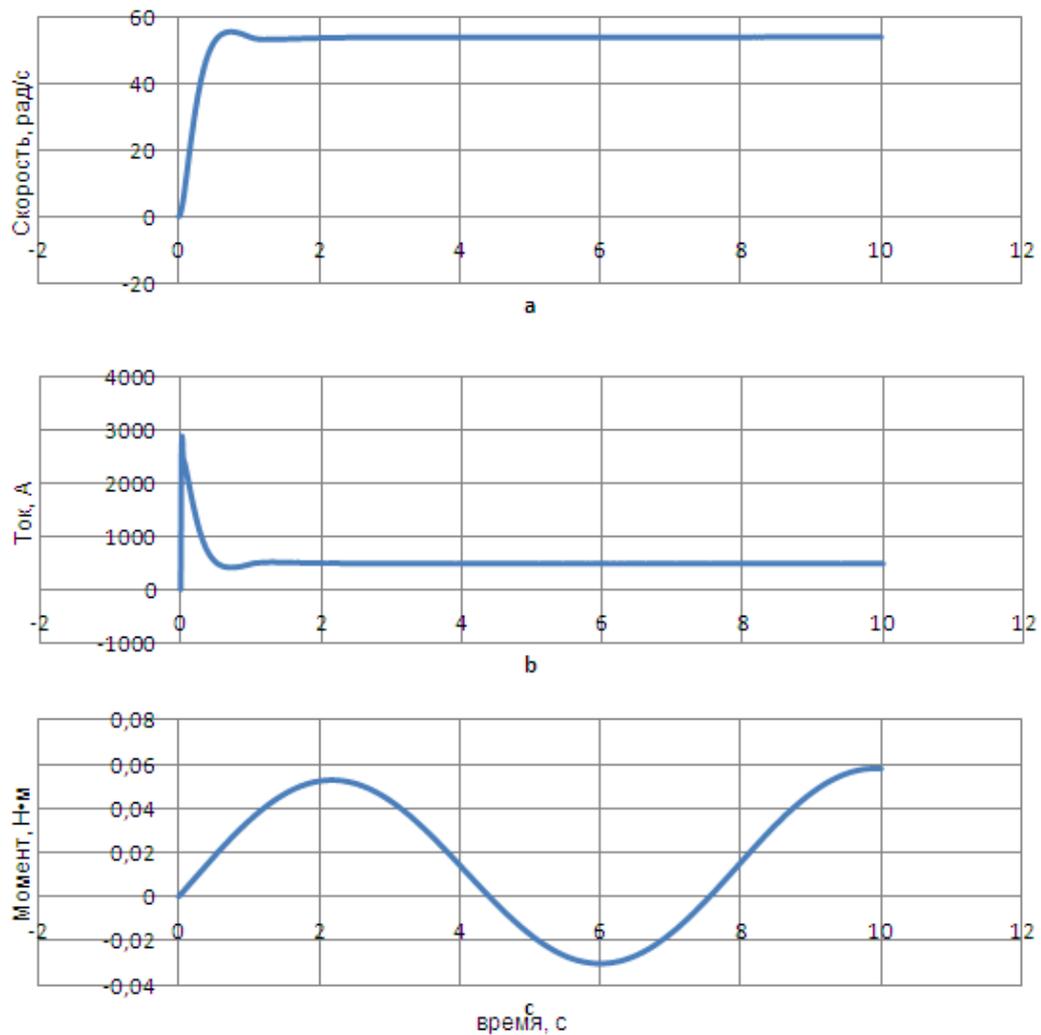


Рисунок 3.13 – Результаты моделирования для пустого петлевого устройства

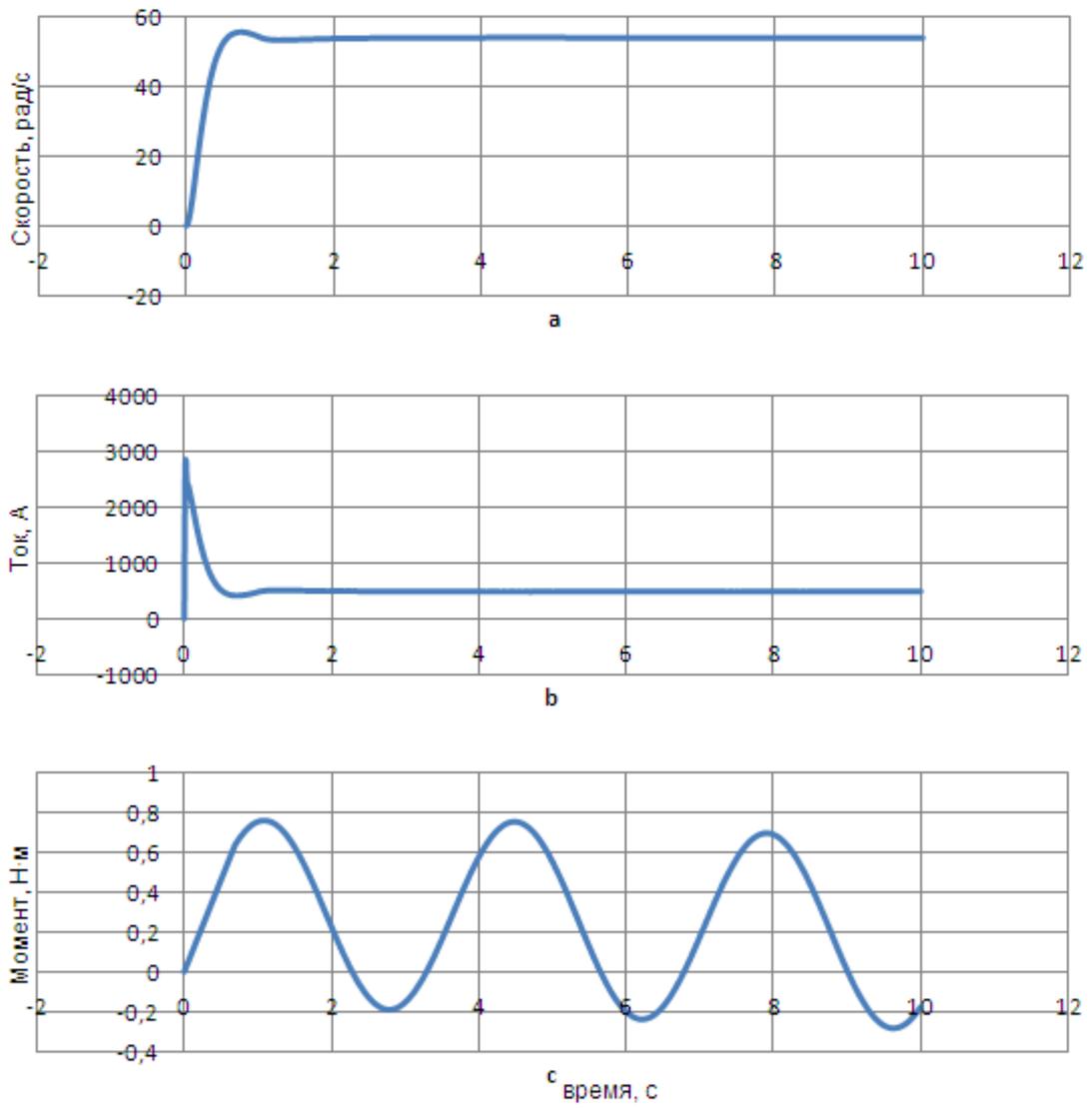


Рисунок 3.14 – Результаты моделирования для петлевого устройства, заполненного на 50%

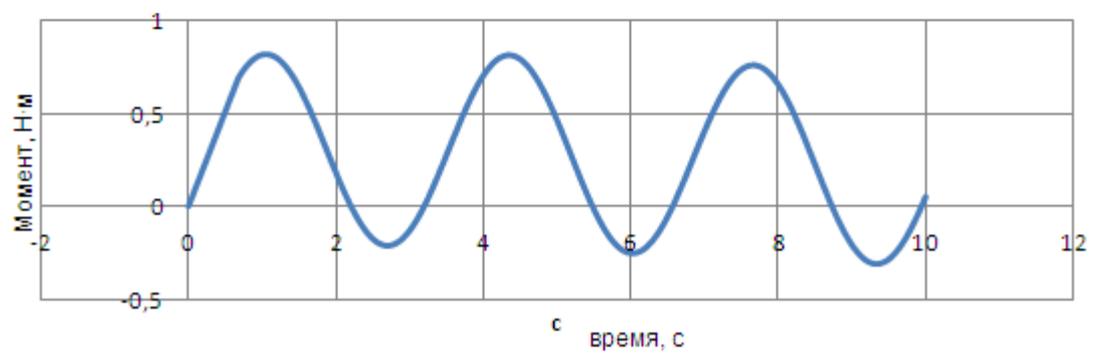
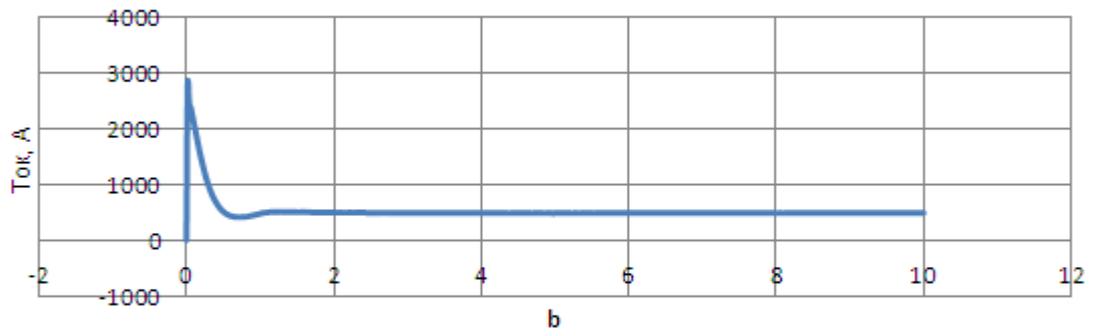
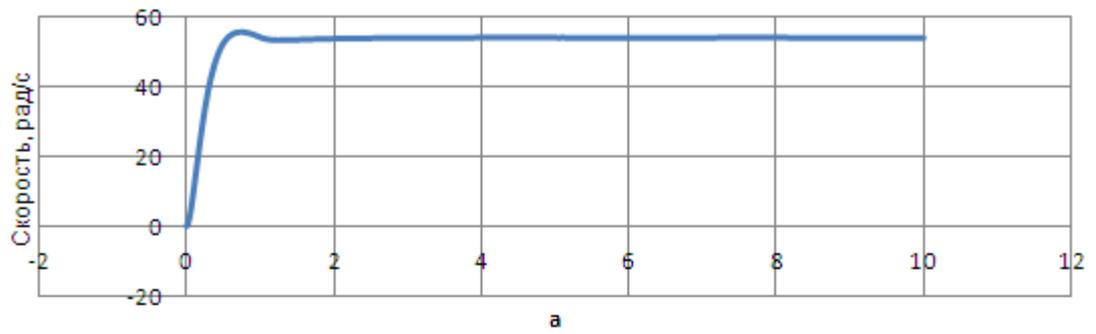


Рисунок 3.15 – Результаты моделирования для петлевого устройства, заполненного на 75%

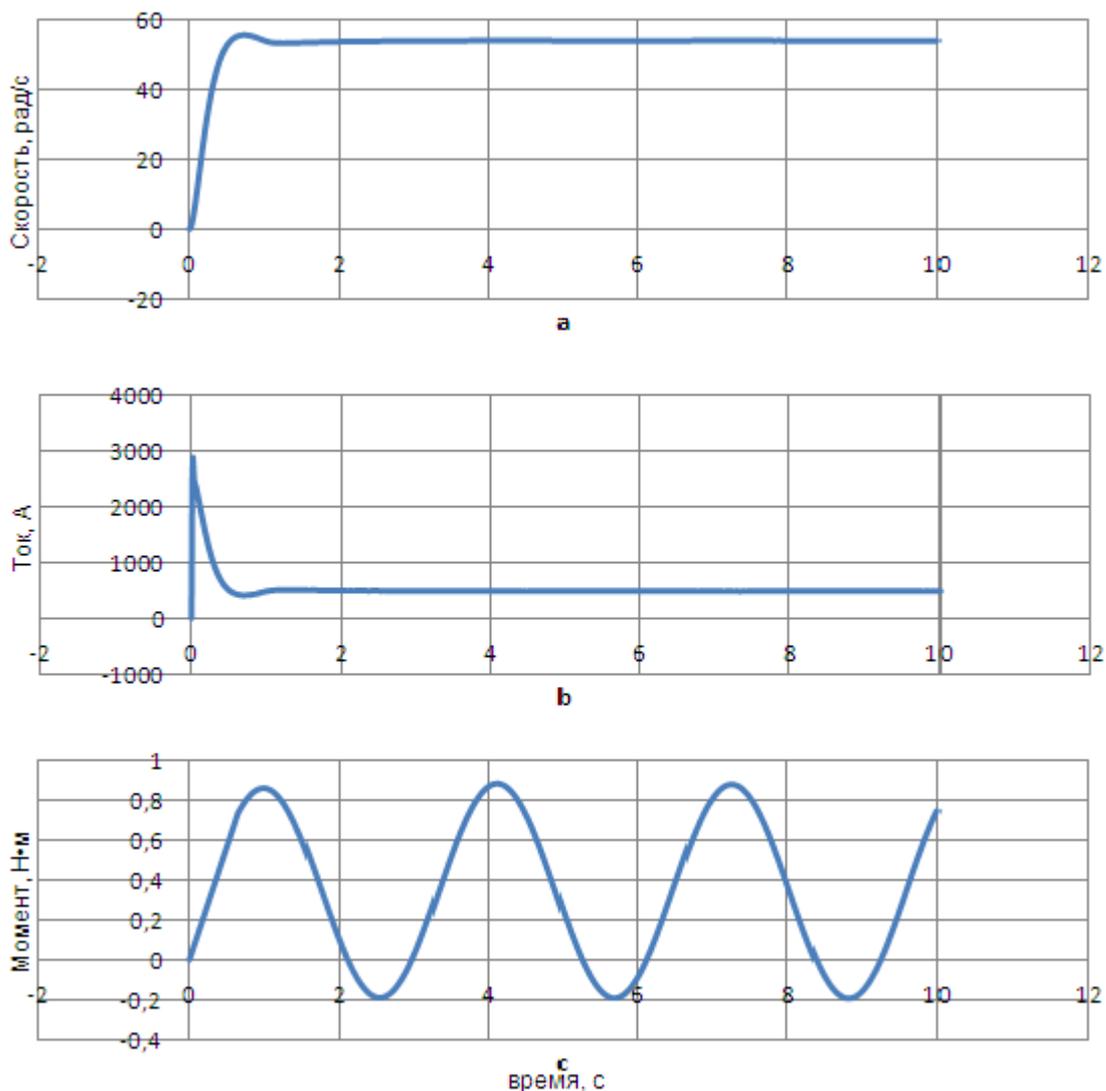


Рисунок 3.16 – Результаты моделирования полностью заполненного устройства

Было проведено 20 опытов. При этом задавалось различное время работы системы: от 5 до 90 секунд [90, р. 8; 134].

В таблице 3.4 приведены значения параметров, полученных при имитационном моделировании.

Таблица 3.4 – Результаты имитационного моделирования

Номер опыта	Амплитуда первого перерегулирования упругого момента, Н·м	Время достижения первого максимума, с	Частота колебаний, Гц
1	2	3	4
Пустое петлевое устройство			
1	0,0495	2,225	0,126
2	0,0527	2,2	0,132
3	0,053	2,19	0,132

Продолжение таблицы 3.4

1	2	3	4
4	0,051	2,17	0,13
5	0,049	2,15	0,128
Среднее значение	0,051	2,187	0,129
Петлевое устройство, заполненное на 50%			
6	0,763	1,085	0,303
7	0,762	1,078	0,307
8	0,765	1,08	0,304
9	0,763	1,1	0,304
10	0,76	1,08	0,306
Среднее значение	0,723	1,085	0,3105
Петлевое устройство, заполненное на 75%			
11	0,821	1,055	0,313
12	0,82	1,05	0,313
13	0,822	1,046	0,312
14	0,821	1,05	0,313
15	0,825	1,056	0,311
Среднее значение	0,822	1,051	0,312
Петлевое устройство, заполненное на 100%			
16	0,855	1,01	0,335
17	0,853	1,05	0,336
18	0,844	1,005	0,334
19	0,856	1,01	0,335
20	0,844	0,95	0,333
Среднее значение	0,85	1,005	0,335

Разность значений параметров при моделировании составляет меньше 5%.

Как видно из результатов моделирования, электромеханическая система горизонтального петлевого устройства является слабодемпфированной системой. Амплитуда колебаний упругого момента снижается на 35-40% за 7 периодов колебаний.

На рисунках 3.13, 3.14, 3.15 и 3.16 показаны переходные процессы для электромеханической системы петлевого устройства, когда в накопителе находится полоса с наибольшим сечением  $2 \times 1500 \text{ мм}^2$ . На них приведена реакция на управляющее воздействие на двигатель. На графиках показаны скорость двигателя (а), ток двигателя (b) и упругий момент (с) между роликом №2 и центрирующим роликом [90, р. 7].

Адекватность имитационной модели была подтверждена путем сравнения с экспериментально снятыми данными [89, р. 690; 134, с. 77]. Переходные процессы тока, скорости соответствуют реальным значениям, измеренным на агрегате. Частота колебаний упругого момента для заполненного устройства при имитационных экспериментах составляла  $0,3105 \div 0,335$  Гц, что соответствует значениям, зафиксированным на агрегате.

Участок полосы между двумя опорными роликами можно принять, как струну, закрепленную с двух сторон. На этом участке возникают колебательные процессы. Частота колебания струны, закрепленной с двух сторон, определяется как [135]:

$$f = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{F}{\rho s}} \quad (3.29)$$

где  $f$  – частота колебаний, Гц;

$l$  – длина струны, м;

$F$  – сила натяжения, Н;

$\rho$  – плотность материала, кг/м<sup>3</sup>;

$s$  – площадь поперечного сечения струны, м<sup>2</sup>.

Частота колебаний известна из имитационных экспериментов и составляет  $0,3105 \div 0,335$  Гц. За длину закрепленной струны или полосы возьмем расстояние между двумя опорными роликами. Плотность стали составляет 7800 кг/м<sup>3</sup>. Площадь поперечного сечения полосы:

$$s = B \cdot h \quad (3.30)$$

где  $h$  – толщина полосы, м;

$B$  – ширина полосы, м

Тогда усилие:

$$F = \frac{f^2 \cdot 4l^2 \cdot \rho \cdot s}{i} \quad (3.31)$$

Для полосы сечением  $0,2 \times 1500$  мм<sup>2</sup> и частоты колебаний  $0,3105 \div 0,335$  Гц, величина усилия составит  $28,792 \div 33,514$  Н. Это значение соответствует диапазону величины усилия, рассчитанного во второй главе.

В таблице 3.5 приведены сравнительные значения экспериментальных данных, полученных при эксперименте на агрегате и имитационного моделирования.

Таблица 3.5 – Сравнительный анализ экспериментальных данных

Петлевое устройство	Частота, Гц	Амплитуда, Н·м	Усилие, Н
1	2	3	4
Визуальный эксперимент	$0,3 \div 0,5$	0,85	$20,218 \div 59,67$

Продолжение таблицы 3.5

1	2	3	4
Имитационное моделирование			
Пустое	0,129	0,051	4,97
Заполненное на 50%	0,31	0,723	28,792
Заполненное на 75%	0,312	0,822	29,071
Заполненное на 100%	0,335	0,85	33,514

Как видно из рисунков (графиков) 3.13-3.16 и таблицы 3.4, амплитуда и частота колебаний момента для пустого петлевого устройства значительно меньше, чем для полностью заполненного. При пустом накопителе в полосе возникают колебания, но амплитуда колебаний упругого момента составляет 0,051 Н·м, а при полностью заполненном – 0,85 Н·м. Т.е. разница между ними составляет больше, чем в 15 раз. При этом частота колебаний изменилась от 0,129 Гц до 0,335 Гц [89, р. 693, 90, р. 8; 134, с. 79].

С учетом того, что при пустом горизонтальном петлевом устройстве расстояния небольшие, упругие свойства полосы проявляются незначительно.

Важным фактором является то, что в устройстве коэффициент инерции изменяется от 1,059 до 1,163, поэтому влияние электропривода на переходные процессы в механической части существенно. В то же время динамические процессы в полосе слабо влияют на переходные процессы в электроприводе.

Как видно на рисунках 3.13-3.16, колебания в упругом моменте ( $c$ ) практически не отражаются на переходных процессах скорости ( $a$ ) и тока ( $b$ ) в электроприводе [90, р. 8; 134, с. 79].

Из анализа осциллограмм промышленных экспериментов и результатов имитационных исследований следует, что разработанная модель адекватна, отклонение от фактического сигнала составляет не более 10%, что является достаточным условием для решения проектных задач, в которых анализируются динамические процессы, происходящие в электромеханической системе горизонтального петлевого устройства АНГА.

Таким образом, в результате анализа и научных исследований, разработана имитационная модель электромеханической системы горизонтального петлевого устройства, учитывающая основные факторы, влияющие на динамические свойства полосы обрабатываемого металла [7, с. 103].

Полученные результаты предназначены для оптимизации режимов работы горизонтального петлевого устройства.

### 3.2 Выводы по третьему разделу

На основании исследования математических и имитационных моделей электромеханической системы горизонтального петлевого устройства можно сделать следующие выводы:

Осуществлен переход от системы с распределенными параметрами, описываемой волновыми уравнениями, к многомассовой системе, что дало

возможность перейти от уравнений в частных производных к системе обыкновенных дифференциальных уравнений.

Разработана математическая модель электромеханической системы горизонтального петлевого устройства, учитывающая механические свойства стальной полосы.

Разработана имитационная модель электромеханической системы горизонтального петлевого устройства. Из анализа переходных процессов, полученных при моделировании можно сделать вывод, что полученные модели с точностью, достаточной для решения проектных задач, описывают динамические процессы, происходящие в данной электромеханической системе.

Доказана адекватность имитационной модели и реальной системы электропривода путем сравнения переходных процессов при реакции на аналогичные воздействия в электроприводе и в его имитационной модели.

## 4 СИНТЕЗ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ПЕТЛЕВОГО УСТРОЙСТВА С УЧЕТОМ СВОЙСТВ СТАЛЬНОЙ ПОЛОСЫ

### 4.1 Разработка методов управления электроприводом горизонтального петлевого устройства с целью снижения упругих колебаний в электромеханической системе

Наличие упругих звеньев приводит к значительному усложнению объекта автоматической системы регулирования по сравнению с жесткой системой. Когда параметры объекта таковы, что электромеханическая связь между исполнительным механизмом и электроприводом сильная, упругость заметно влияет на контур скорости, а при определенных условиях – на контур тока, в этом случае реализация стандартных настроек контуров, принятых в жесткой системе, обычно оказывается невозможной. Тогда приходится либо идти на значительное снижение коэффициентов усиления, либо искать способы настройки, обеспечивающие достаточные запасы устойчивости контуров при удовлетворительном быстродействии. При слабой электромеханической связи воздействие со стороны механизма на электропривод ничтожно мало (например, при  $J_2 \ll J_1$ ). В этом случае контуры тока и скорости могут быть настроены так же, как в жесткой системе. Однако это будет означать, что электропривод с автоматической системой управления не оказывает заметного демпфирующего влияния на колебания механизма, которые затухают только за счет сил трения. Обычно это недопустимо, поэтому в данном случае может оказаться необходимым изменить настройку регуляторов или настройку системы [40, с. 33].

Разработка способов коррекции автоматических систем управления электроприводами с упругостью связана с анализом сложных многоконтурных структур [40, с. 33].

Для проведения структурной оптимизации были рассмотрены различные структуры моделей электроприводов агрегатов непрерывной обработки полосы и была выявлена необходимость введения корректирующего воздействия, влияющего на динамические нагрузки приводов.

При наличии зазоров и упругих звеньев в механических трансмиссиях в системе электропривода появляются различного рода механические колебания. К ним относятся вынужденные колебания, возникающие под действием внешних периодических сил, автоколебания, обусловленные динамической неустойчивостью некоторых рабочих режимов механизмов линии, а также свободные колебания, появляющиеся при пуске и переходе от одной скорости работы линии к другой и при изменении момента нагрузки [136].

При совпадении частоты внешних периодических сил с одной из собственных частот электромеханической системы появляются резонансные колебания. При этих колебательных явлениях пиковые значения упругих моментов в электромеханической системе электродвигатель – трансмиссия с упругими элементами – рабочий механизм могут быть значительными ( $2 \div 3$

$M_n$ ), они приводят к поломке или преждевременному износу рабочих механизмов и механических соединений, а также к преждевременному выходу из строя электродвигателей. Появление колебаний в системе отрицательно сказывается и на качестве выпускаемой продукции [136, с. 22].

Исходя из описания рассмотренных в первой главе способов управления электроприводами с упругими связями и переменными параметрами, можно сделать вывод о том, что необходимо выбирать наиболее целесообразное решение при разработке системы управления электроприводом горизонтального петлевого устройства, учитывающее его характерные особенности [8, с. 126; 34, с. 119].

Как показано выше, при работе горизонтального петлевого устройства изменяется коэффициент инерции, частота свободных колебаний электромеханической системы, значительно изменяется масса полосы.

В связи с этим возникает необходимость в применении способов управления электроприводом с использованием дополнительных обратных связей и корректирующих устройств [8, с. 126; 89, р. 679].

В настоящее время наиболее перспективным для применения с целью синтеза систем управления электроприводами с упругими связями считается метод последовательно-параллельной коррекции [134, с. 77]. Такой выбор объясняется относительной простотой реализации, возможностью формировать необходимый вид переходных процессов в электроприводе практически без увеличения времени протекания переходных процессов.

Исходя из вышеизложенного, наиболее целесообразным решением будет введение нескольких корректирующих устройств [8, с. 126].

Обратные связи находят наиболее широкое применение вследствие простоты технической реализации. Использование корректирующих устройств в виде отрицательных обратных связей, как правило, дает возможность добиться лучших результатов по сравнению с другими типами корректирующих устройств [9, с. 122].

Структурная схема скорректированной электромеханической системы приведена на рисунке 4.1. Схема содержит такие же блоки механической части, как на рисунке 3.7. Кроме того, в нее введены блоки модернизированной системы управления, выделенные желтым цветом. Данные блоки будут описаны ниже. Входные переменные на рисунке 4.1 (схема) такие же, как на рисунке 3.7 [89, р. 680].

На рисунке 4.2 приведена функциональная схема скорректированной электромеханической системы.

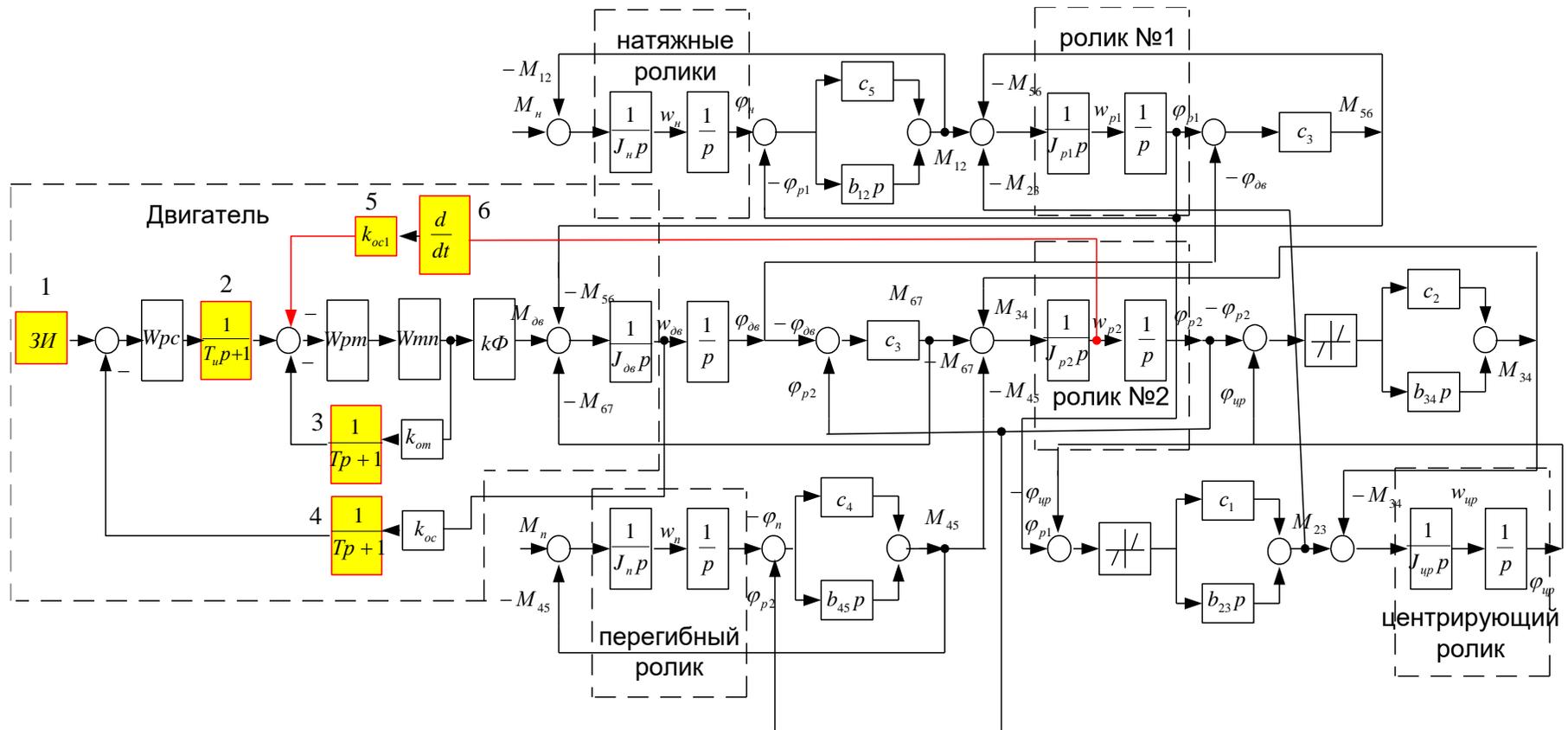


Рисунок 4.1 – Структурная схема скорректированной электромеханической системы

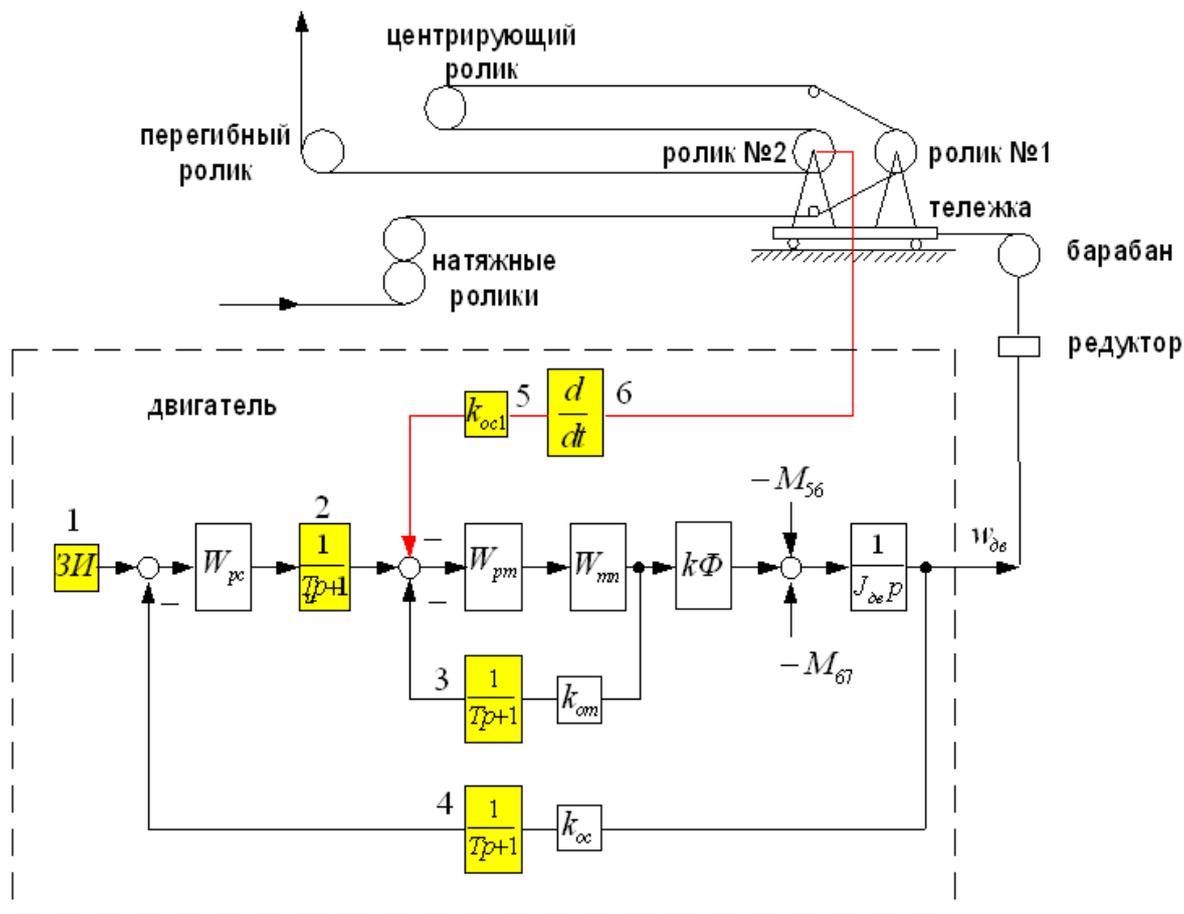


Рисунок 4.2 – Функциональная схема скорректированной электромеханической системы

Электромеханическая система горизонтального петлевого устройства является слабодемпфированной системой. Такие системы чувствительны к управляющим воздействиям.

В режиме выдачи полосы из петлевого устройства колебания в самой стальной полосе практически отсутствуют. Двигатель при этом работает в генераторном режиме. В режиме заполнения петлевого устройства двигатель работает в двигательном режиме. Но при этом наблюдаются значительные раскачивания полосы. В связи с этим в работе рассматривается только двигательный режим электропривода накопителя при наборе полосы.

Задатчики интенсивности служат для получения необходимого закона изменения во времени задающего сигнала системы регулирования. Задатчик интенсивности позволяет сформировать процессы разгона и торможения электропривода с заданным темпом. В системах вентильного электропривода эти устройства, как правило, определяют задающий сигнал скорости двигателя. Применение задатчика интенсивности позволяет поддерживать в процессе разгона постоянный динамический момент двигателя, величина которого определяется темпом изменения выходного напряжения задатчика интенсивности. Тем самым обеспечивается независимость ускорения от

статической нагрузки. По этой причине в систему введен задатчик интенсивности (блок 1 на рисунке 4.1) [89, р. 681; 134, с. 78].

Введение в прямую цепь апериодического звена с постоянной времени значительно большей, чем у звеньев исходной системы автоматического управления, повышает запас устойчивости системы автоматического управления. К достоинствам можно отнести также снижение высокочастотных помех и колебательности переходных процессов. Такой прием повышения запаса устойчивости называется демпфированием с подавлением высоких частот [9, с. 123].

Недостатком является уменьшение частоты среза  $\omega_{ср}$ , то есть снижение быстродействия системы [41].

Введем последовательно с регулятором скорости апериодическое звено первого порядка с передаточной функцией:

$$W = \frac{1}{T_{и}p+1} \quad (4.1)$$

где  $T_{и}$  – постоянная времени интегрирования.

$$T_{и} = \frac{32T_{\mu}^2 k_{ос}}{k_{от} \beta_e T_{м}} \quad (4.2)$$

где  $T_{\mu}$  – малая постоянная времени преобразователя, с;

$k_{ос}$  – коэффициент обратной связи по скорости, В/рад/с;

$k_{от}$  – коэффициент обратной связи по току, В/А;

$T_{м}$  – электромеханическая постоянная времени, с;

$\beta_e$  – модуль жесткости статической механической характеристики в разомкнутой системе.

Модуль жесткости статической механической характеристики в разомкнутой системе определяется [111, с. 42]:

$$\beta_e = \frac{C_E \Phi_H}{R_{яц}} \quad (4.3)$$

На рисунке 4.1 апериодическое звено обозначено блоком 2.

Фильтры в цепях обратных связей тока и скорости (блоки 3 и 4 на рисунке 4.1) введены для подавления возможных пульсаций для исключения возникновения слабозатухающих колебаний.

В реальных системах автоматического управления с подчиненным регулированием параметров величина  $T_{\mu}$  лежит в пределах  $0,004 \div 0,01$  с. Выберем постоянную времени фильтра в цепи обратной связи по току  $T_{офт}=0,001$  с [137].

Из-за наличия щётчного коллектора снимаемое с тахогенератора напряжение имеет небольшие пульсации напряжения, для устранения которых используются фильтры.  $T_{офс}=(0,001 \div 0,005)$  с – постоянная времени фильтра в

цепи обратной связи по скорости, для снижения уровня полюсных и оборотных пульсаций в  $k$  раз. Выберем  $T_{офс} = 0,004$  с.

При значениях  $\gamma < 1,5 \div 2$  добиться эффективного демпфирования упругих колебаний скорости исполнительного органа без значительного снижения быстродействия только за счет выбора структуры и параметров регулятора скорости невозможно. Методы коррекции таких систем связаны с применением тех или иных корректирующих связей по скорости механизма [9, с. 123].

Введение обратной связи по производной от скорости исполнительного вала приводит к эффекту, эквивалентному увеличению коэффициента инерции. Следовательно, можно, вводя обратную связь по производной скорости, получить плавные переходные процессы, несмотря на то, что в нескорректированной системе движение исполнительного вала имеет сильный колебательный характер [9, с. 123; 51, р. 740].

Положительный эффект может быть получен и при введении на вход регулятора скорости сигнала по второй производной от скорости исполнительного механизма. Однако двукратное дифференцирование обычно трудно выполнить из-за наличия пульсаций на выходе измерителя скорости. В отношении качества переходного процесса по управлению тот же результат может быть получен, если на вход регулятора скорости ввести сигнал, пропорциональный разности скорости двигателя и приведенной к двигателю скорости исполнительного органа [9, с. 123; 39, с. 222; 51, р. 740].

Из анализа структуры горизонтального петлевого устройства следует, что положительный эффект может быть достигнут от введения обратной связи по производной по скорости ролика за счет демпфирования распространяющейся вдоль полосы металла упругой волны усилий. Электромеханическая система горизонтального петлевого устройства является распределенной, при его заполнении возникают колебания. Сигнал по производной скорости ролика демпфирует распространение упругой волны за счет воздействия на электропривод. Введение дополнительной обратной связи по производной скорости второго ролика позволит подавить упругую волну, которая распространяется по полосе при перемещении тележки накопителя. Ролики в горизонтальном петлевом устройстве неприводные, воздействовать на них не представляется возможным. Воздействовать можно только на электропривод тележки, но информацию о скорости роликов можно снимать при условии установки соответствующих датчиков. Поскольку система распределенная, для сигнала обратной связи использовать скорость тележки не имеет смысла, т.к. колебания в механической части не оказывают никакого влияния на электропривод. Для организации обратной связи предлагается измерять скорость второго ролика [9, с. 123; 35, р. 345].

Обратная связь по производной скорости эквивалентна обратной связи по динамическому моменту [9, с. 124; 89, р. 691]:

$$M_{дин} = J \frac{dw}{dt} \quad (4.4)$$

где  $M_{\text{дин}}$  – динамический момент, Н·м;

$J$  – момент инерции, кг·м<sup>2</sup>;

$w$  – угловая скорость, рад/с.

Динамическое усилие распределяется вдоль полосы. Поскольку упругая волна идет от ролика к тележке, то, вводя сигнал, пропорциональный производной скорости второго ролика, тем самым обеспечиваем опережающее управление, которое компенсирует влияние упругой волны, распространяющейся вдоль полосы металла [9, с. 124; 89, р. 691].

Корректирующее воздействие, в виде сигнала производной скорости, сформировано на базе сигнала скорости второго ролика (блок 6 на рисунке 4.1) [9, с. 124; 89, р. 691].

В процессе имитационных экспериментов было выявлено, что недостаточно ввести только обратную связь по производной скорости, т.к. в процессе работы петлевого устройства изменяется длина полосы в накопителе [9, с. 124; 89, р. 691].

Момент инерции второго ролика зависит согласно (3.15) и (3.18) от параметров ролика и полосы. В то время как для одного прокатываемого сортамента полосы масса ролика, ширина и толщина полосы остаются неизменными, длина полосы в петлевом устройстве меняется в значительных пределах. Основное влияние на характер протекания процессов оказывает момент инерции. С увеличением длины стальной полосы увеличивается ее момент инерции, увеличивается частота ее колебаний и амплитуда, что приводит к дополнительным динамическим ударам. Так как амплитуда колебаний напрямую зависит от момента инерции, поэтому проведена адаптация по динамическому моменту [9, с. 125; 89, р. 692].

Было выявлено, что для улучшения качества регулирования в двигательном режиме работы электропривода петлевого устройства, следует изменять величину коэффициента обратной связи по производной скорости с изменением длины полосы в накопителе, т.е. система должна быть адаптивной [9, с. 125; 89, р. 692].

Скорость полосы жестко связана со скоростью ролика, т.к. проскальзывание полосы не учитываем.

Коэффициент усиления регулятора скорости пропорциональный и зависит от момента инерции:

$$W_{PC}(p) = k_{PC} = \frac{J_{\Sigma} \cdot k_{OT}}{c \cdot k_{OC} \cdot a_{\mu c} \cdot T_{\mu c}} \quad (4.5)$$

где  $J_{\Sigma}$  – суммарный момент инерции электропривода, кг·м<sup>2</sup>;

$k_{OC}$  – коэффициент обратной связи по скорости, В/рад/с;

$k_{OT}$  – коэффициент обратной связи по току, В/А;

$a_{\mu c}$  – коэффициент настройки;

$c$  – коэффициент ЭДС и электромагнитного момента двигателя при номинальном потоке возбуждения;

$T_{\text{мс}}$  – суммарная малая постоянная времени, с;

$p$  – оператор Лапласа

В суммарный момент инерции входят моменты инерции двигателя, редуктора и тележки (величина которых не изменяется во время работы) и момента инерции полосы. При работе горизонтального петлевого устройства длина полосы значительно меняется (24580 мм до 329480 мм). Следовательно, меняется масса полосы (от 48,683 кг до 7709,832 кг) и, соответственно момент инерции полосы (от 2,257 кг·м<sup>2</sup> до 6,1924 кг·м<sup>2</sup>) [8, с. 126].

$$J_{\Sigma} = J_{\text{дв+р+т}} + J_{\text{пол}} \quad (4.6)$$

где  $J_{\text{дв+р+т}}$  – момент инерции двигателя, редуктора и тележки, кг·м<sup>2</sup>;

$J_{\text{пол}}$  – момент инерции полосы, кг·м<sup>2</sup>.

Масса стальной полосы зависит от ее геометрических размеров (формула (3.15)). Соответственно, и момент инерции зависит от размеров полосы. Эту зависимость можно выразить следующим образом:

$$J_{\text{пол}} = J_0 \cdot l, \quad (4.7)$$

где  $J_0$  – удельный момент инерции,  $\frac{\text{кг}\cdot\text{м}^2}{\text{м}}$ ;

$l$  – длина полосы, м.

Как видно из (4.6) и (4.7) суммарный момент инерции при пустом петлевом устройстве равен неизменному моменту инерции двигателя, редуктора и тележки. По мере заполнения петлевого устройства суммарный момент инерции возрастает. И полоса начинает оказывать влияние на динамические процессы в электромеханической системе.

Передаточная функция регулятора скорости прямо пропорционально зависит от суммарного момента инерции привода формула (4.5). Выразим эту зависимость следующим способом:

$$k_{\text{РС}} = a + b \cdot l \quad (4.8)$$

где  $a$  – передаточная функция регулятора скорости, посчитанная по стандартной методике;

$b$  – коэффициент зависимости момента инерции от длины;

$l$  – длина полосы, м.

В результате анализа переходных процессов на имитационной модели для разных положений накопителя выявлена линейная зависимость коэффициента обратной связи по производной скорости от длины стальной полосы, которая приведена на рисунке 4.3 [9, с. 125; 89, р. 693].

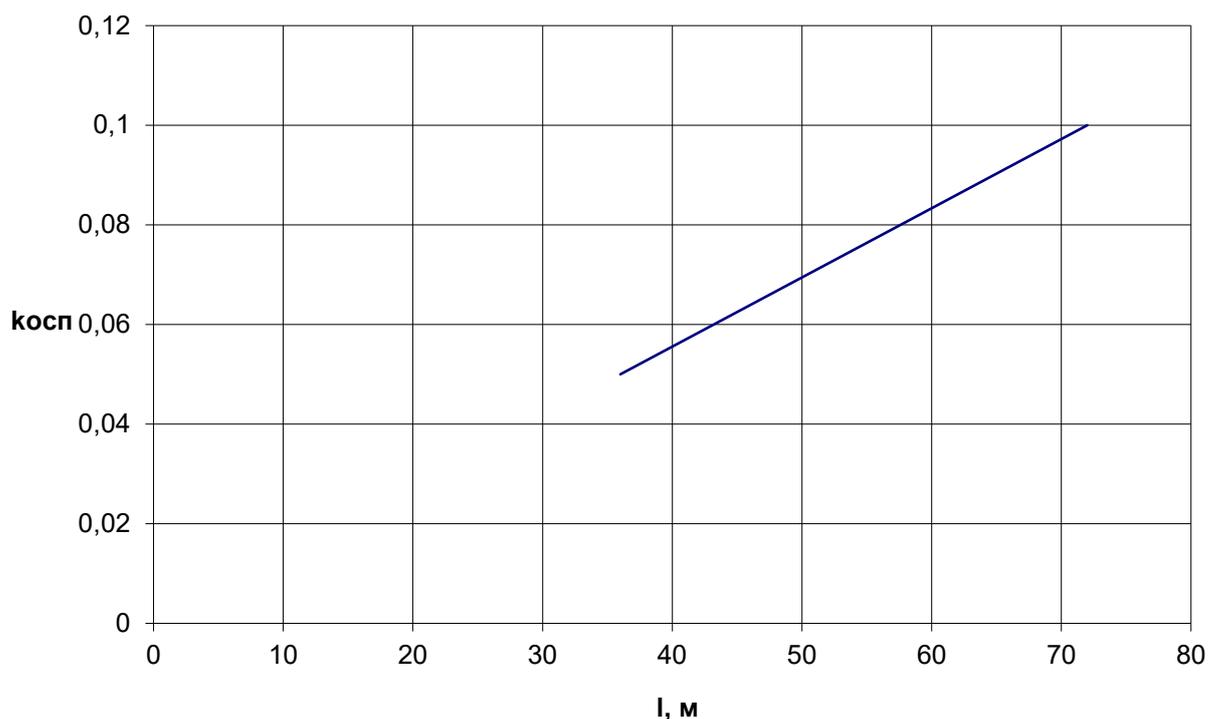


Рисунок 4.3 – Зависимость коэффициента обратной связи по производной скорости от длины полосы в петлевом устройстве

Численные значения коэффициентов приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Коэффициент обратной связи по производной скорости в зависимости от длины полосы в петлевом устройстве

Длина, м	Коэффициент
36	0,05
54	0,075
72	0,1

Эту зависимость можно выразить аналитически [9, с. 125; 89, р. 693]:

$$k_{осп} = k_{вз} \cdot l \quad (4.9)$$

где  $k_{осп}$  – коэффициент обратной связи по производной скорости;

$k_{вз}$  – коэффициент взаимосвязи между  $k_{осп}$  и длиной полосы  $l$ ;

$l$  – длина полосы, м.

При исследовании электромеханической системы горизонтального петлевого устройства на имитационных моделях был определен коэффициент взаимосвязи  $k_{вз}=0,0013889$ . Для учета коэффициента в схему введен блок 5 на рисунке 4.1 [9, с. 125; 89, р. 693].

Внесенные блоки и связи отмечены на рисунке 4.1 цветом.

Следовательно, в данной системе обеспечена адаптация по изменяющемуся моменту инерции [9, с. 125; 89, р. 693].

В результате предложена структура звена для учета изменения длины стальной полосы при определении коэффициента обратной связи по производной скорости (рисунок 4.4) [9, с. 125; 89, р. 693].

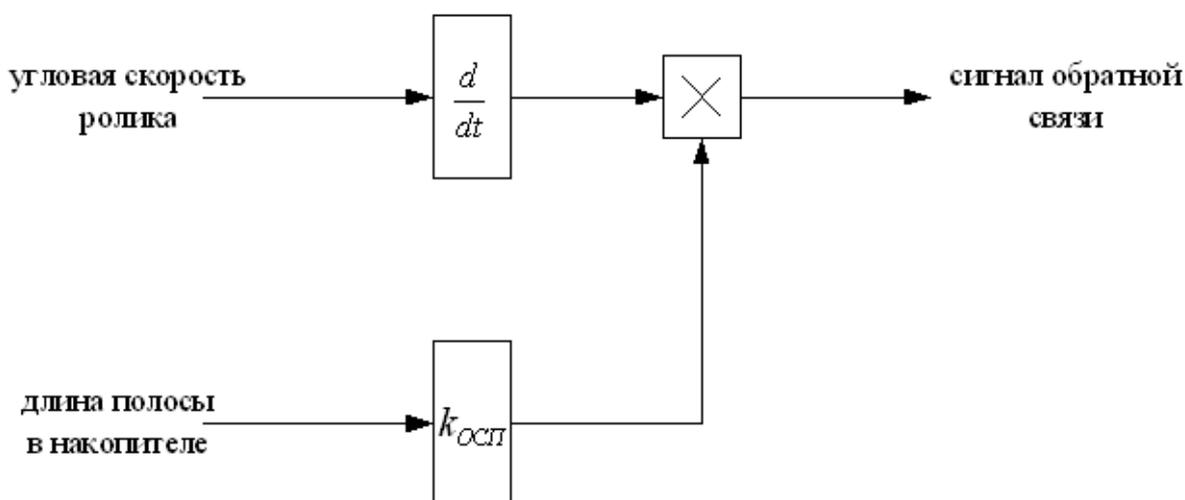


Рисунок 4.4 – Структурная схема блока, учитывающего изменение коэффициента обратной связи по производной скорости при изменении длины полосы

## 4.2 Имитационные эксперименты на модели электропривода горизонтального петлевого устройства с учетом переменной длины стальной полосы

По полученной структурной схеме (рисунок 4.1) в программе Simulink пакета MATLAB была построена имитационная модель скорректированной системы управления электромеханической системы горизонтального петлевого устройства. Имитационная модель приведена на рисунке 4.5.

Субсистема motor является системой автоматического регулирования скорости двигателя горизонтального петлевого устройства. Блоки  $c_1, c_2, c_4, c_5$  – жесткости упругих связей полосы между массами на соответствующих участках;  $c_3$  – жесткость упругой связи каната между барабаном тележки и тележкой петлевого устройства;  $b_1, b_2, b_4, b_5$  – коэффициенты демпфирования. Блоки DeadZone и DeadZone1 – зазоры. Блоки  $1/J_{пер}, 1/J_{нат}, 1/J_{рол1}, 1/J_{рол2}, 1/J_z$  представляют собой механические части перегибного ролика, натяжных роликов, ролика №1, ролика №2 и центрирующего ролика соответственно [7, с. 99; 90, р. 5].

Входными воздействиями в модели являются  $M_{нат}, M_{пер}$ , – моменты натяжного ролика, перегибного ролика и напряжение задания Step, выходными – скорость и ток двигателя, моменты упругих сил [7, с. 99; 90 р. 5].

Имитационная модель скорректированной системы автоматического регулирования двигателя постоянного тока приведена на рисунке 4.6.

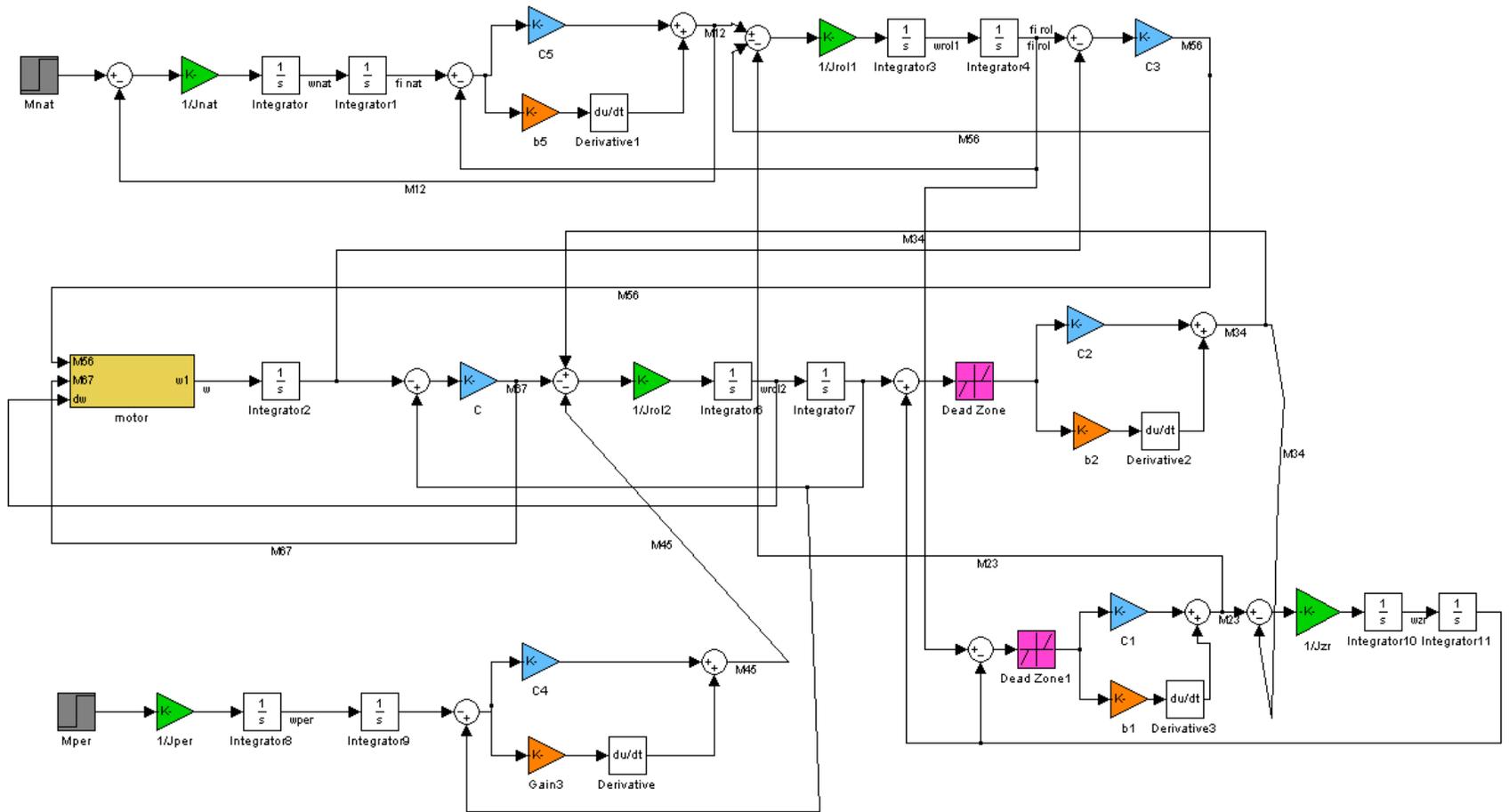


Рисунок 4.5 – Имитационная модель скорректированной системы управления электромеханической системы горизонтального петлевого устройства

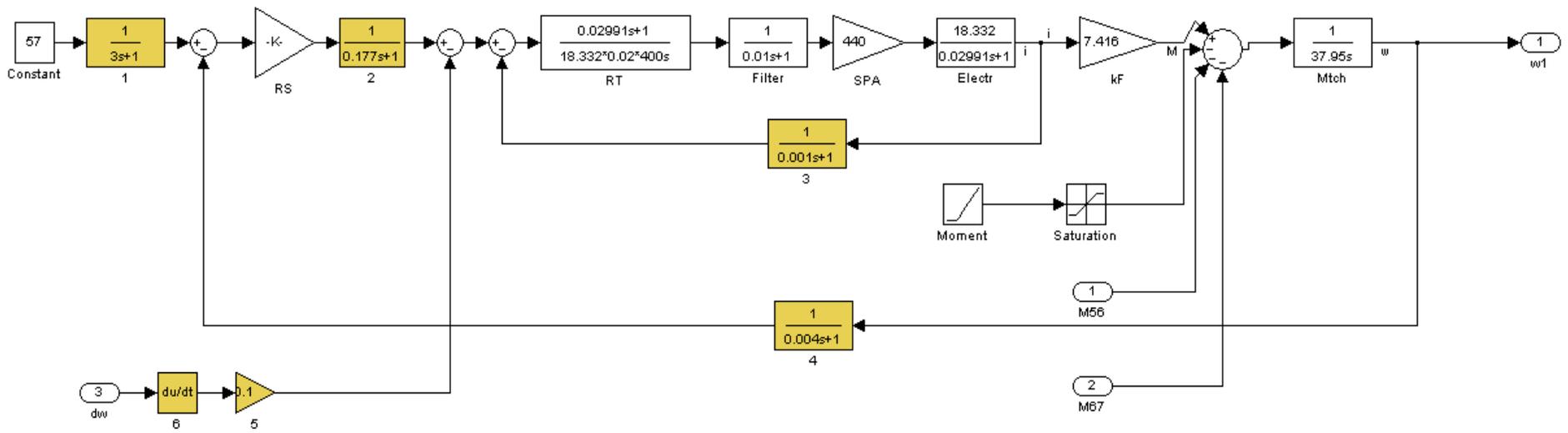


Рисунок 4.6 – Имитационная модель скорректированной САР

Модель включает в себя регулятор скорости RS, регулятор тока RT, фильтр Filter, силовой полупроводниковый агрегат SPA, электрическую Electr и механическую Mech часть двигателя, блок kФ, осуществляющий переход от тока к моменту. Входными воздействиями являются напряжение задания Constant, момента статического сопротивления Moment, моменты упругих сил M56 и M67, а также скорость второго ролика  $\dot{w}$ . Выходным значением является значения скорости вращения  $w$ .

Цветом обозначены введенные блоки 1-6 из структурной схемы 4.1.

Было проведено 15 опытов. При этом задавалось различное время работы системы: от 5 до 90 секунд. Улучшение работы достигалось за весь период времени.

Несколько реализаций опытов для скорректированной системы автоматического регулирования для петлевого устройства приведены на рисунках 4.7-4.9 [9, с. 124; 90, р. 7].

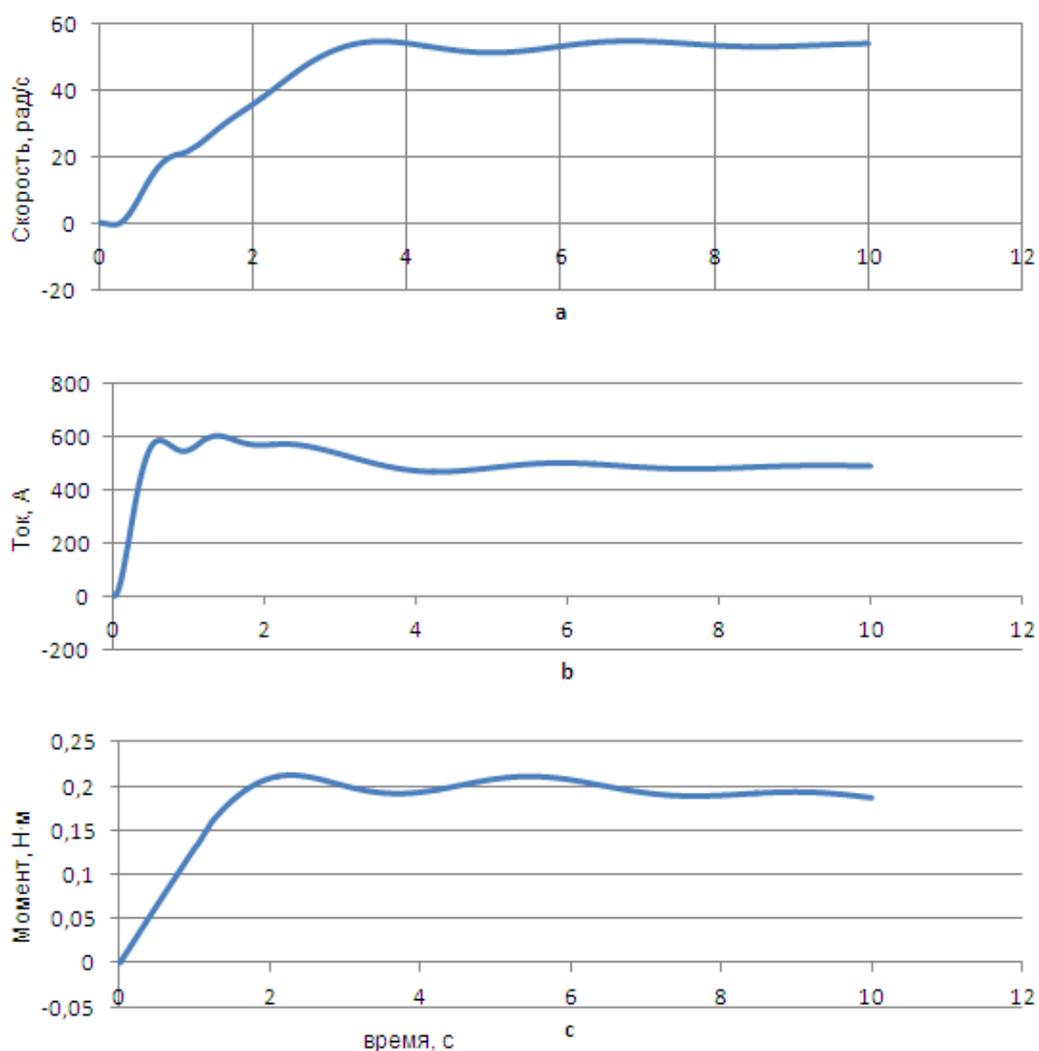


Рисунок 4.7 – Результаты моделирования для скорректированной системы автоматического регулирования электромеханической системы горизонтального петлевого устройства, заполненного на 50%

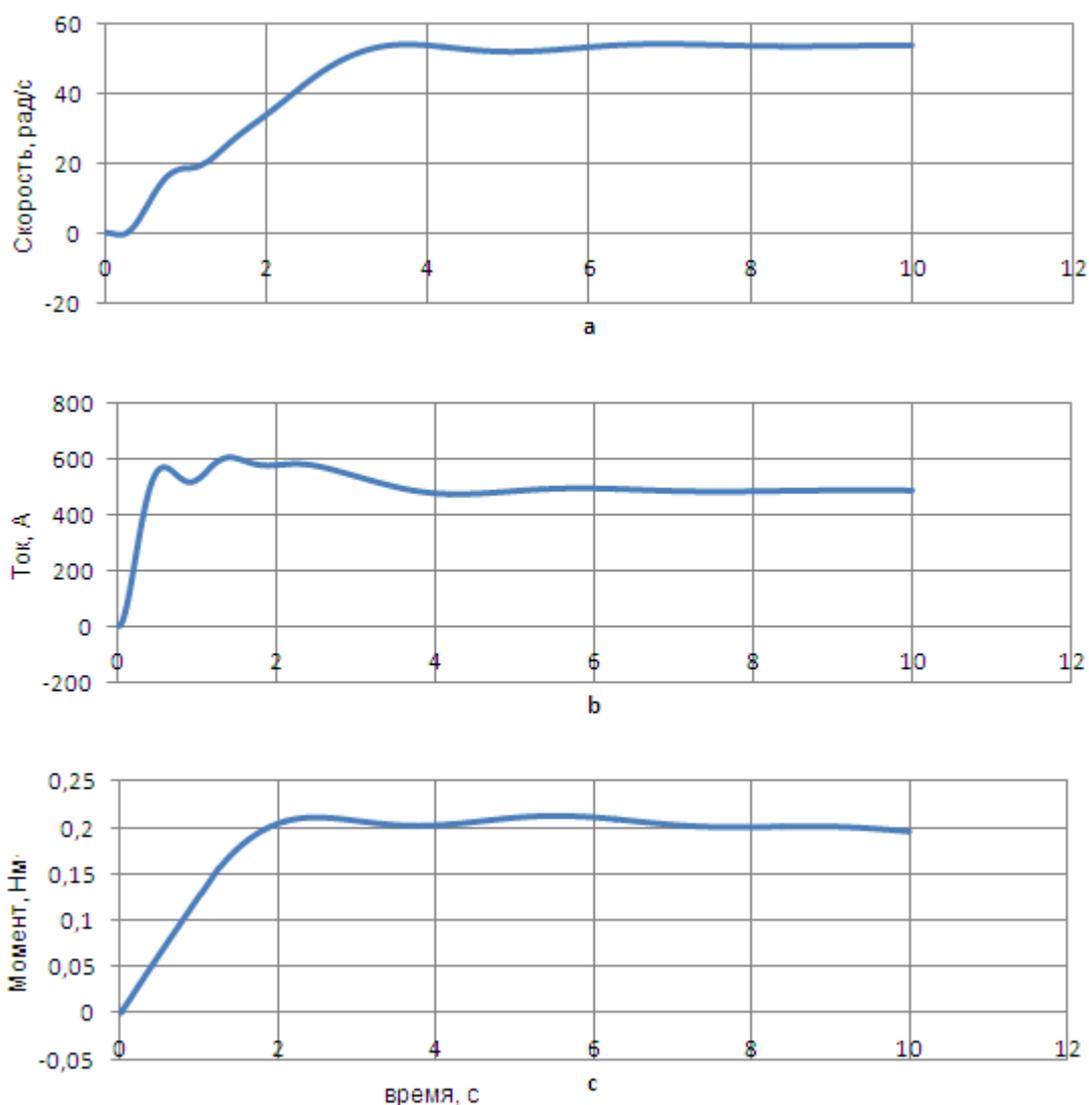


Рисунок 4.8 – Результаты моделирования для скорректированной системы автоматического регулирования электромеханической системы горизонтального петлевого устройства, заполненного на 75%

На рисунках 4.7-4.9 приведены результаты имитационных экспериментов для переходных процессов модернизированной системы. На графиках показаны скорость двигателя (а), ток двигателя (b) и упругий момент (с) между роликом №2 и центрирующим роликом [90, р. 5].

В таблице 4.2 приведены сравнительные данные по амплитуде упругого момента в электромеханической системе горизонтального петлевого устройства, полученных при имитационном моделировании для системы автоматического регулирования для схемы до введения корректирующих звеньев и после их введения.

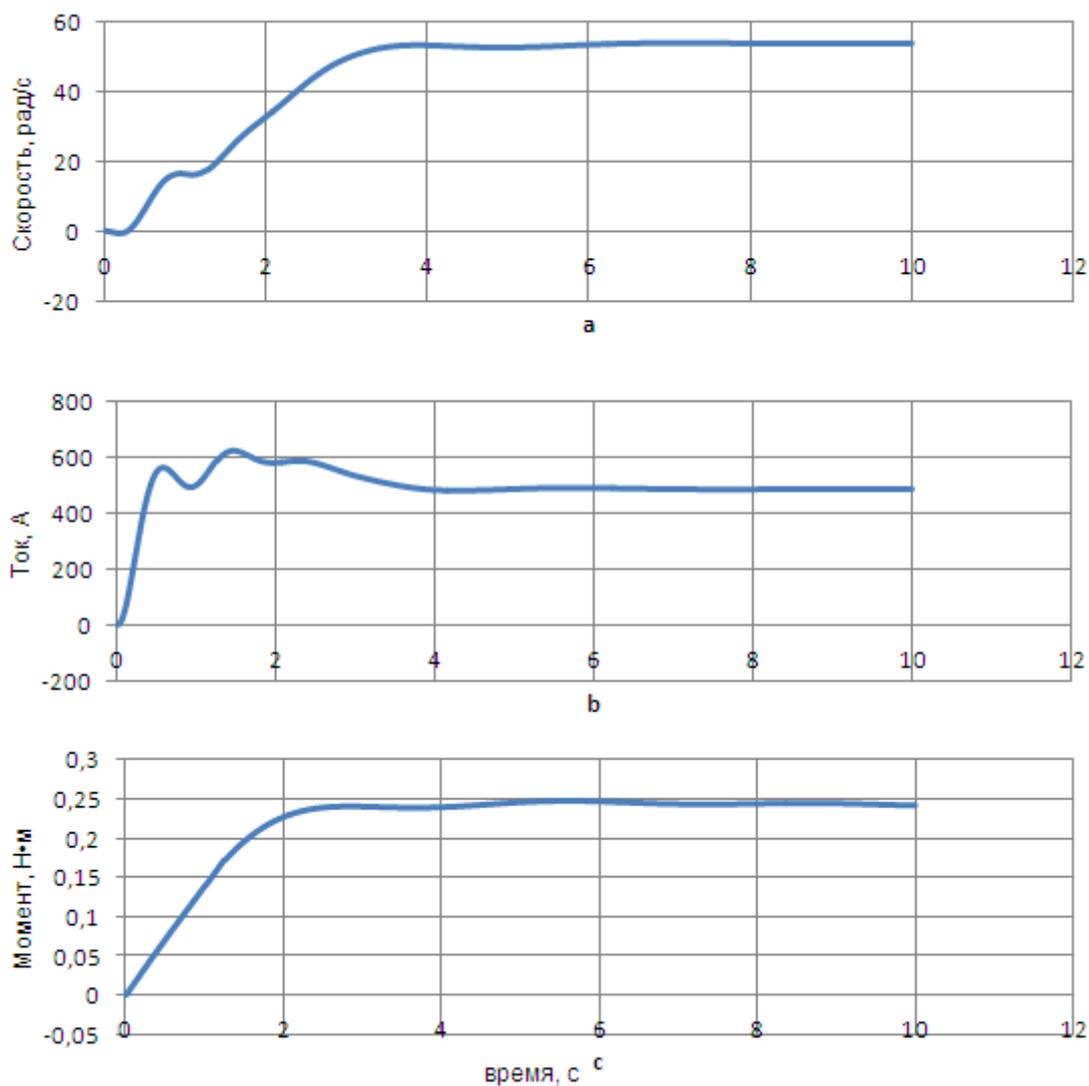


Рисунок 4.9 – Результаты моделирования для скорректированной системы автоматического регулирования электромеханической системы горизонтального петлевого устройства, заполненного на 100%

Таблица 4.2 – Значения амплитуды упругого момента

Номер опыта	Амплитуда упругого момента, Н·м	
	до коррекции	после коррекции
1	2	3
Петлевое устройство, заполненное на 50%		
1	0,763	0,213
2	0,762	0,212
3	0,765	0,215
4	0,763	0,213
5	0,76	0,2
Среднее значение	0,723	0,211
Петлевое устройство, заполненное на 75%		
6	0,821	0,213

Продолжение таблицы 4.2

1	2	3
7	0,82	0,211
8	0,822	0,21
9	0,821	0,214
10	0,825	0,221
Среднее значение	0,822	0,214
Петлевое устройство, заполненное на 100%		
11	0,855	0,241
12	0,853	0,247
13	0,844	0,249
14	0,856	0,25
15	0,844	0,251
Среднее значение	0,85	0,248

Амплитуда упругого момента уменьшилась до 0,248 Н·м, т.е. в 3,5 раза при реакции на управляющее воздействие на двигатель.

При сравнении переходных процессов скорости и тока, представленных на рисунках 3.14-3.16 и 4.7-4.9, видно, что на рисунках 4.7-4.7 демпфирование осуществляется за счет возникновения дополнительных колебаний в токе, и незначительных изменений на начальном участке скорости во время разгона. Демпфирование происходит за счет того, что расширяется полоса пропускания привода, повышается чувствительность привода, и он начинает демпфировать колебания [89, р. 694].

Скорость продольной упругой волны в стали равна [138]:

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (4.10)$$

где  $E$  – модуль Юнга или модуль продольной упругости, для стали  $E=200$  ГПа;  
 $\rho$  – плотность вещества, для стали  $\rho=7,8$  г/см<sup>3</sup>.

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}} = \sqrt{\frac{200 \cdot 10^9}{7,8 \cdot 10^3}} = 5064 \text{ м/с}$$

Скорость поперечной упругой волны в стали равна [138, с. 314]:

$$v = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (4.11)$$

где  $G$  – модуль сдвига или модуль жесткости, для стали  $G=80$  ГПа.

$$v = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{80 \cdot 10^9}{7,8 \cdot 10^3}} = 3203 \text{ м/с}$$

Максимальная длина полосы в накопителе составляет 329480 мм, максимальное расстояние от стационарных роликов до петлеобразующей тележки составляет 84000 мм (длина одной из четырех параллельных ниток в накопителе). Т.е. максимальное время распространения упругой волны 0,103 с. За счет того, что для обратной связи используется скорость второго ролика, опережается распространение упругой волны, компенсируется запаздывание фронта распространения упругих колебаний.

Таким образом, проведенные эксперименты на имитационной модели электромеханической системы горизонтального петлевого устройства позволяют сделать выводы о том, что введение обратной связи по производной скорости второго ролика с переменным коэффициентом усиления позволяет демпфировать колебания в стальной полосе во время работы привода устройства в двигательном режиме, т.е. при наборе полосы в накопитель. Эффект адаптации начинает проявляться по мере заполнения полосой петлевого устройства. В начале работы, когда накопитель пустой, полоса имеет незначительную длину и массу, т.е. является жесткой. В процессе работы, когда длина полосы увеличивается (полоса становится упругой), изменяется и коэффициент в обратной связи по производной скорости. Происходит компенсация упругих колебаний за счет опережения распространения упругой волны с учетом изменяющегося коэффициента инерции [9, с. 125; 89, р. 694].

### 4.3 Выводы по четвертому разделу

В результате исследования модели электромеханической системы горизонтального петлевого устройства разработана структура электромеханической системы накопителя, содержащая адаптивную систему управления электроприводом петлевого устройства, которая включает в себя датчик интенсивности, апериодическое звено, фильтры в цепях обратных связей по току и скорости двигателя, отрицательную обратную связь по производной скорости второго неприводного ролика с переменным коэффициентом усиления.

Полученные результаты показывают, что введение обратной связи по производной скорости промежуточного ролика (динамическому моменту) дает эффект, эквивалентный увеличению коэффициента инерции. Это позволяет демпфировать колебания средствами электропривода. Скорость полосы жестко связана со скоростью ролика, т.к. проскальзывание полосы не учитывается. Введение обратной связи по динамическому моменту позволяет учесть запаздывание упругой волны в стальной полосе и частично ее компенсировать. Изменение коэффициента обратной связи приводит к тому, что учитывается изменение длины и массы полосы в процессе работы накопителя, корректируя при этом коэффициент регулятора скорости. Т.е. система становится

адаптивной, обеспечивая параметрическую адаптацию к изменению массы полосы и минимизировать колебания упругого момента в полосе.

Таким образом, проведенные эксперименты на имитационной модели электромеханической системы горизонтального петлевого устройства, позволяют сделать выводы о том, что введение задатчика интенсивности, апериодического звена, фильтров в цепях обратных связей по току и скорости двигателя, отрицательной обратной связи по производной скорости второго ролика в электромеханическую систему позволяет оптимизировать динамические процессы, происходящие в полосе обрабатываемого металла во время работы накопителя [9, с. 125; 89, р. 694].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертационная работа посвящена исследованию методов и разработке технических решений по демпфированию колебаний в стальной полосе в электромеханической системе горизонтального петлевого устройства агрегата непрерывного горячего алюмоцинкования. Решена актуальная научная проблема по исследованию и созданию адаптивной системы управления для электропривода горизонтального петлевого устройства агрегата непрерывного горячего алюмоцинкования.

Основные результаты выполненных исследований заключаются в следующем:

1. Проведен эксперимент. Выявлены основные параметры и закономерности работы горизонтального петлевого устройства. Установлено, что в процессе работы петлевого устройства возникают колебания полосы с частотой 0,3-0,5 Гц и амплитудой 0,8-0,85 м.

2. Разработана математическая модель электромеханической системы горизонтального петлевого устройства.

3. На основании математической модели построена имитационная модель электромеханической системы горизонтального петлевого устройства, которая защищена свидетельством авторского права (Приложение Б). Имитационная модель создана для пустого устройства, для частично и полностью заполненного устройства.

4. Выполнены имитационные эксперименты на модели, подтверждающие ее адекватность с экспериментальными исследованиями.

5. Произведена структурно-параметрическая оптимизация системы управления, заключающаяся во введении корректирующих звеньев: задатчика интенсивности, фильтров, а также обратной связи по производной скорости неприводного ролика №2. Введение обратной связи по производной скорости ролика компенсирует запаздывание.

6. Выполнен синтез адаптивного регулятора, настройка которого меняется в функции длины полосы, что обеспечивает компенсацию изменяющегося момента инерции.

7. Предложенные технические решения и разработанная имитационная модель применяются в учебном процессе Карагандинского индустриального университета на факультете энергетики, транспорта и систем управления (Приложение А).

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Справочная информация о ГКМ Казахстана // <http://mining.kz>. 20.02.2014.
- 2 Брейдо И.В., Кунтуш Е.В. Разработка имитационной модели электромеханической системы электропривода горизонтального петлевого устройства // Тр. университета. – 2017. – №4(69). – С. 124-128.
- 3 Металлургическая промышленность // <http://www.cas.kz>. 20.02.2014.
- 4 Бодров Е.Э. Модернизация многосвязной системы электропривода непрерывного листового стана холодной прокатки: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03. – Магнитогорск, 2010. – 147 с.
- 5 Казаков В.П. Разработка и сравнительное исследование семейства адаптивных систем управления двух- и трехмассовыми упругими электромеханическими объектами: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03. – СПб., 2011. – 223 с.
- 6 Сивякова Г.А. Взаимосвязанный электропривод агрегата непрерывного отжига: автореф. .... канд. техн. наук: 05.09.03. – Алматы, 2007. – 24 с.
- 7 Брейдо И.В., Кунтуш Е.В. Структурно - параметрическая оптимизация электропривода горизонтального петлевого устройства листопрокатного стана // Тр. университета. – 2014. – №1(54), ч. 3. – С. 98-103.
- 8 Брейдо И.В., Зюзев А.М., Кунтуш Е.В. Обзор методов демпфирования упругих колебаний в электромеханической системе горизонтального петлевого устройства // Тр. университета. – 2019. – №3(76). – С. 126-130.
- 9 Брейдо И.В., Кунтуш Е.В. Разработка модернизированной системы управления электроприводом горизонтального петлевого устройства // Тр. университета. – 2019. – №4(77). – С. 120-125.
- 10 Арселор Миттал Темиртау // <http://www.arcelormittal.kz> 24.10.2020.
- 11 Васильев А.Г. Накопители полосы агрегатов подготовки и отделки в цехах холодной прокатки в СССР и за рубежом. – М.: НИИинформтяжмаш, 1972. – 19 с.
- 12 Кунтуш Е.В., Сиверская Т.И. Анализ петлевых устройств станов холодной прокатки // Матер. 10-й междунар. науч.-практ. конф. «Научная индустрия европейского континента». – Прага: Образование и наука, 2014. – С. 5-9.
- 13 Паршин В.С., Боголюбова Д.Д. Анализ конструкции накопителей плоской полосы непрерывных агрегатов // <http://econfr.ae.ru/pdf>. 13.10.2012.
- 14 Юдин А.Ю. Совершенствование систем управления взаимосвязанными электроприводами входного участка агрегата непрерывного горячего цинкования: автореф. канд. техн. наук: 05.09.03. – Магнитогорск, 2006. – 22 с.
- 15 Лимонов Л.Г. Автоматизированный электропривод промышленных механизмов. – Харьков: Форт, 2009. – 272 с.
- 16 Целиков А.И., Полухин П.И., Гребенник В.М. и др. Машины и агрегаты металлургических заводов. – М.: Металлургия, 1978. – Т. 2. – 328 с.

17 Пат. 55650 U1 РФ. Устройство управления электроприводом накопителя полосы / Распопов А.Л., Божевалева В.Ю., Юдин А.Ю. и др.; опубл. 27.08.06, Бюл. №24. – 4 с.

18 Пат. 2433945 РФ, МПК В65Н20/34. Способ работы петлевого накопителя с выравниванием натяжения / Б. Шульце; опубл. 20.11.11, Бюл. №25. – 4 с.

19 А.С. 242836. Петлеобразующее устройство горизонтального типа / Е.Г. Белоглазов, Н.Т. Дудин, Г.Н. Румако; опубл. 30.08.86, Бюл. №46. – 6 с.

20 А.С. 1933060/22-2. Петлеобразующее устройство горизонтального типа / А.М. Бабкин, И.Т. Дудин, Г.Н. Румако; опубл. 30.05.76, Бюл. №34. – 6 с.

21 А.С. 2227074 RU, МПК 7 В21В41/12, В21С47/26. Спиральный накопитель полосы / В.М. Волков, С.А. Федоров; опубл. 20.04.04, Бюл. №8. – 2 с.

22 Пат. 2344892 РФ, МПК В21В 41/10. Спиральный накопитель полосы / Стрельцов А.П., Пышный В.Г.; опубл. 27.01.09, Бюл. №3. – 3 с.

23 Герасимьяк Р.П., Рамарувахуака А.М.. Система управления электропривода двухмассовой электромеханической системой // Электротехника. – 1998. – №6. – С. 28-31.

24 Попов А.Н., Франценюк И.В. О влиянии переходных режимов на упругие механические колебания в электроприводе // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 1983. – №5. – С. 134-138.

25 Приходько И.Ю., Крот П.В., Парсенюк Е.А. и др. Система контроля и методы снижения резонансных вибрации на непрерывных станах холодной прокатки полос // Фундаментальные и прикладные проблемы горной металлургии: сб. науч. тр. – Днепропетровск, 2006. – С. 232-244.

26 Кунин П.Н., Петрачков А.И., Кунин В.П.. Проблемы и перспективы совершенствования электроприводов металлургического производства // Известия вузов. Черная металлургия. – 1990. – №6. – С. 89-92.

27 Нестеров С.В., Нестеров А.В. Определение условий возбуждения первого параметрического резонанса в электромеханических системах с переменным моментом инерции // Матер. 7-й междунар. науч.-техн. конф. «Современные проблемы машиностроения». – Томск, 2013. – С. 263-265.

28 Болгова А.С., Перелома К.А., Задорожная И.Н. Изучение особенностей динамических режимов промышленных машин по критерию электромеханической совместимости средствами компьютерного моделирования // Автоматизация технологичних об'єктів та процесів. Пошук молодих: матер. междунар. науч.-техн. конф. – Донецьк: ДонНТУ, 2013. – С. 140-148.

29 Zhang Y., Yan X., Lin Q. Characteristic of Torsional Vibration of Mill Main Drive Excited by Electromechanical Coupling // Chinese Journal of Mechanical Engineering. – 2016. – Vol. 29. – P. 180-187.

30 Задорожный Н.А. Элементы теории электромеханического взаимодействия в двухмассовых системах электропривода с упругими механическими связями. – Краматорск: ДГМА, 2006. – Ч. 1. – 75 с.

31 Mazunin V.P., Dvoynikov D.A. Improving Response in Control of Adjustable Electric Drives of Mechanisms with Elastic Links // Russian Electrical Engineering. – 2012. – Vol. 83, №10. – P. 556-561.

32 Kazantsev V.P., Dadenkov D.A. On the Synthesis of Discrete Continuous Control Systems with Elastic Dissipative Links for Electric Drives // Russian Electrical Engineering. – 2012. – Vol. 83, №11. – P. 605-608.

33 Назарова Е.С., Ефименко Р.А. Особенности моделирования электромеханических систем с переменным моментом инерции // Вестник Национального технического университета «Харьковский политехнический институт». – 2017. – №27(1249). – С. 71-74.

34 Вишнеревский В. Т., Овсянников К. В., Леневский Г. С. Анализ способов построения замкнутых систем управления электроприводами, содержащими упругие элементы в механической подсистеме // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2012. – №2(35). – С. 119-125.

35 Malafeev S.I., Malafeeva A.A., Konyashin V.I. Oscillations in the Mechatronic System of a Multi-Stand Rolling Mill // Russian Engineering Research. – 2018. – Vol. 38, №5. – P. 342-347.

36 Мещеряков В.Н., Толчеев В.М. Разработка способа снижения динамических нагрузок электропривода прокатной клетки стана холодной прокатки // Электротехнические системы и комплексы. – 2015. – №3(28). – С. 14-19.

37 Степанов А.Г. Динамика машин. – Екатеринбург: УрО РАН, 1999. – 302 с.

38 Борцов Ю.А., Соколовский Г.Г. Автоматизированный электропривод с упругими связями. – СПб.: Энергоатомиздат, 1992. – 288 с.

39 Башарин А.В., Новиков В.А., Соколовский Г.Г. Управление электроприводами. – Л.: Энергоиздат, 1982. – 392 с.

40 Борцов Ю.А., Соколовский Г.Г. Тиристорные системы электропривода с упругими связями. – Л.: Энергия, 1979. – 160 с.

41 Включение корректирующих звеньев // <http://www.toehelp.ru/theory/tau/lecture15.htm> 15.05.2013.

42 Gannel' L.V. Built In Filters to Suppress Vibrations in a Linear Elastic Electric Drive on Account of Reduction in the Effective Mass// Russian Electrical Engineering. – 2013. – Vol. 84, №3. – P.145-148.

43 Malafeev S.I., Malafeeva A.A., Konyashin V.I. Correction of Rolling Mill Mechatronic System to Limit Dynamic Loads // Russian Engineering Research. – 2018. – Vol. 38, №6. – P. 431-433.

44 Belykh I.A., Grigor'ev M.A., Belousov E.V. An electrical feed drive-control system for a cold reducing mill // Russian Electrical Engineering. – 2017. – Vol. 88, №4. – P. 205-208.

45 Дракин А.Ю., Ильин В.М., Хвостов В.А. Синтез адаптивного регулятора системы управления электроприводом с демпфированием колебаний груза // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2012. – №2(34). – С. 61-66.

- 46 Джонсон Д., Джонсон Дж., Мур Г. Справочник по активным фильтрам. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 128 с.
- 47 Егоров В. Н., Шестаков В. М. Динамика систем электропривода. – Л.: Энергоатомиздат, 1983. – 216 с.
- 48 Liu S., Zhao S., Niu B. et al. Stability analysis of a nonlinear electromechanical coupling transmission system with time delay feedback // *Nonlinear Dynamics*. – 2016. – Vol. 86, №3. – P. 1863-1874.
- 49 Кольцов С.В., Концевенко О.В., Овсянников К.В. Последовательно-параллельная коррекция систем управления электроприводами с подчиненным регулированием параметров и упругими связями // *Вестник Белорусско-Российского университета*. – 2010. – №3. – С. 113-118.
- 50 Belykh I.A., Grigorev M.A. The Pipe Rotation Electric Drive of a Cold Rolling Mill at JSC Chelyabinsk Pipe Plant // *Russian Electrical Engineering*. – 2019. – Vol. 90, №5. – P. 370-374.
- 51 Kozhevnikova A.A., Kozhevnikov A.V., Sorokin G.A. et al. Damping of Vibrations in the Primary Drives of Cold-Rolling Mills // *Steel in Translation*. – 2016. – Vol. 46, №10. – P. 739-741.
- 52 Электропривод постоянного тока. Система преобразователь – двигатель // <https://mybiblioteka.su/3-23881.html>. 23.11.2018.
- 53 Электроприводы постоянного тока // [http:// powergroup.com.ua](http://powergroup.com.ua). 23.11.2018.
- 54 Приводы постоянного тока // <http://remont220.ru>. 24.11.2018.
- 55 Электропривод – переменного или постоянного тока? // <http://www.intechnics.ru>. 24.11.2018.
- 56 Брейдо И.В., Кунтуш Е.В. Структурно-параметрическая оптимизация электропривода горизонтального петлевого устройства листопрокатного стана // *Матер. междунар. симпоз. «Информационно-коммуникационные технологии в промышленности, образовании и науке»*. – Караганда: КарГТУ, 2012. – Ч. 1. – С. 98-103.
- 57 СЗЭМО. Как правильно подобрать электродвигатель // <http://www.szemo.ru>. 24.11.2018.
- 58 Мощность асинхронного двигателя формула – советы электрика // <https://orenburgelectro.ru/podklyuchenie/moshhnost-asinhronnogo>. 24.06.2019.
- 59 Алюмоцинк или листовая сталь // <http://www.lissantyug.ru>. 24.06.2019.
- 60 Афанасьев В.Д. Автоматизированный электропривод в прокатном производстве. – М.: Металлургия, 1977. – 280 с.
- 61 Тарасов А.С. Разработка и исследование системы двухдвигательного электропривода конвейеров для транспортировки сыпучих материалов: автореф. канд. техн. наук: 05.09.03. – Липецк, 2013. – 18 с.
- 62 Kazantsev V.P., Dadenkov D.A. On the Synthesis of Discrete Continuous Control Systems with Elastic Dissipative Links for Electric Drives // *Russian Electrical Engineering*. – 2012. – Vol. 83, №11. – P. 605-608.

63 Colombo J.J.R., Afonso R.J.M., Galvão R.K.H. et al. Robust Model Predictive Control of a Benchmark Electromechanical System // Journal of Control, Automation and Electrical Systems. – 2016. – Vol. 27, №2. – P. 119-131.

64 Лехов О.С., Малахов А.В., Жигалин А.Г. Оптимизация параметров многомассовых систем главных линий прокатных станов // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 1986. – №12. – С. 122-126.

65 Поваляев В.Д., Горелик В.С., Гладчук Е.А., Василянский О.Н. Моделирование главной линии листопрокатной клетки с конструктивно-асимметричным индивидуальным приводом валков // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 1990. – №6. – С. 82-84.

66 Назарова Е.С. Математическое моделирование электромеханических систем станов холодной прокатки // Технічна електродинаміка. – 2015. – №5. – С. 82-89.

67 Malafeeva S.I., Konyashina V.I. Mechatronic Simulation of the 300 Rolling Mill // Russian Engineering Research. – 2014. – Vol. 34, №5. – P. 311-316.

68 Белов М.П., Новиков В.А., Рассудов Л.Н. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов. – М.: Академия, 2004. – 576 с.

69 Борцов Ю.А. Адаптивное управление электроприводами // Электротехника. – 1992. – №3. – С. 17-21.

70 Radionov A.A., Karandaev A.S., Khramshin V.R. et al. Mathematical Modelling of the Interrelated Electric and Mechanical Systems of Continuous Sub-Group of the Rolling Mill Stands // Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering. – 2015. – Vol. 15, №2, Part 2. – P. 67-76.

71 Safin A.R. Selection of Efficient Control Circuits for a Tram Traction Electric Drive on the Basis of Development of a Simulation Model // Russian Electrical Engineering. – 2013. – Vol. 84, №1. – P. 51-55.

72 Erkaya S., Uzman I. Experimental investigation of joint clearance effects on the dynamics of a slider-crank mechanism // Multibody System Dynamics. – 2010. – Vol. 24. – P. 81-102.

73 Neto M.A., Ambrósio J.A.C., Roseiro L.M. et al. Active vibration control of spatial flexible multibody systems // Multibody System Dynamics. – 2013. – Vol. 30, №1. – P. 13-35.

74 Лимонов Л.Г. Автоматизированный электропривод промышленных механизмов. – Харьков: Форт, 2009. – 272 с.

75 Wójcik W., Yuchshenko O. Development of simulation model of strip pull self-regulation system in dynamic modes in a continuous hot galvanizing line // Informatyka, Automatyka, Pomiar. – 2014. – №1. – P. 11-13.

76 Брейдо И.В., Сивякова Г.А. Экспериментальные исследования взаимосвязанных электроприводов агрегата непрерывного отжига // Энергетика, телекоммуникации и высшее образование в современных условиях: тез. докл. 3-й междунар. науч.-техн. конф. – Алматы, 2002. – С. 528-531.

77 Sapronov K.A., Cherepanov A.A., Yatsun S.F. Investigation of Motion of a Mobile Two Mass Vibration Driven System // Journal of Computer and Systems Sciences International. – 2010. – Vol. 49, №1. – P. 144-151.

78 Пятибратов Г.Я., Барыльник Д.В. Моделирование электромеханических систем: учеб. пос. – Новочеркасск: ЮРГПУ, 2013. – 103 с.

79 Filipovic M., Vukobratovic M. Complement of Source Equation of Elastic Line // Journal of Intelligent and Robotic Systems. – 2008. – Vol. 52. – P. 233-261.

80 Volkov M.A., Ishmatov Z.Sh. Development and Study of Robast Control System for DC Thyristor Electric Drive Using Polynomial Techniques // Russian Electrical Engineering. – 2009. – Vol. 80, №9. – P. 517-523.

81 Паунов А.М., Кунин П.Н., Дружилов С.А. и др. Классификация электромеханических систем металлургического производства по степени изменения приведенных маховых масс // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 1988. – №1. – С. 128-131.

82 Vul'fson I. On the Problem of Dynamic Damping of Torsional Oscillations of a Machine Drive // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. – 2009. – Vol. 38, №1. – P. 13-18.

83 Briskin E.S., Kalinin Y.V., Maloletov A.V. et al. On the Energy Efficiency of Cyclic Mechanisms // Mechanics of Solids. – 2014. – Vol. 49, №1. – P. 11-17.

84 Jafari A., Vu H.Q., Iida F. Determinants for Stiffness Adjustment Mechanisms // Journal of Intelligent & Robotic Systems. – 2016. – Vol. 82, №3-4. – P. 435-454.

85 Kamman J.W., Huston R.L. Multibody Dynamics Modeling of Variable Length Cable Systems // Multibody System Dynamics. – 2001. – Vol. 5, №3. – P. 211-221.

86 Кирпичников Ю.А., Николаев А.А. К определению скоростных режимов взаимосвязанных электроприводов выходной зоны агрегата непрерывного горячего цинкования ОАО «ММК» // Вестник МГТУ им Г.И. Носова. – 2006. – №2. – С. 34-37.

87 Автоматизация металлургической промышленности // <http://elites-montage.com.ua>. 16.09.2017.

88 Ющенко О.А. Зависимость натяжения от толщины полосы при термообработке в линии непрерывного горячего цинкования // Тр. Университета. – 2011. – №1. – С. 76-77.

89 Breido I., Kuntush Ye. Synthesis of adaptive electric drive control system of horizontal looper // Archives of Electrical Engineering. – 2020. – Vol. 69, Issue 3. – P. 679-694.

90 Kuntush Ye.V., Breido I.V., Zyuzev A.M. Developing a Mathematical Model of a Horizontal Looper Taking into Account the Features of a Steel Strip // EAI Endorsed Transactions on Energy Web. – 2020. – Vol. 7, Issue 28. – P. 1-9.

- 91 Кунтуш Е.В., Брейдо И.В. Специфика электропривода горизонтального накопителя полосы стана холодной прокатки // Матер. 16-й междунар. науч.-практ. конф. «Научный прогресс на рубеже тысячелетий – 2020». – Прага, 2020. – С. 87-89.
- 92 Малышев Л.Г., Повзнер А.А. Избранные главы курса физики. Колебания и волны. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2017. – 200 с.
- 93 Шрейнер Р.Т. Системы подчиненного регулирования электроприводов. – Екатеринбург: ГОУ ВПО «Рос. гос. проф.-пед. ун-т», 2008. – 279 с.
- 94 Брейдо И.В., Кунтуш Е.В. Разработка математической модели электромеханической системы горизонтального петлевого устройства // Тр. университета. – 2005. – №1. – С. 76-79.
- 95 Брейдо И.В., Кунтуш Е.В. Разработка математической модели изменения жесткости полосы горизонтального петлевого устройства // Матер. междунар. симпоз. «Информационные и системные технологии в индустрии, образовании и науке». – Караганда, 2006. – С. 86-88.
- 96 Брейдо И.В., Кунтуш Е.В. Разработка математической модели провиса полосы горизонтального петлевого устройства // Тр. университета. – 2007. – №4. – С. 67-69.
- 97 Брейдо И.В., Кунтуш Е.В. Разработка математической модели изменения свойств стальной полосы горизонтального петлевого устройства // Матер. междунар. науч.-практ. конф. «Актуальные проблемы горно-металлургического комплекса Казахстана». – Караганда: КарГТУ, 2007. – С. 413-416.
- 98 Opeiko O.F. Control of an Electric Drive for a Continuous Material Processing Unit // Russian Electrical Engineering. – 2009. – Vol. 80, №2. – P. 74-77.
- 99 Вахитов Ш.Я., Башарин С.А., Смирнова Н.А. и др. Аналитическая модель и способ расчета колебательной системы динамических преобразователей купольного типа // Фундаментальные исследования. – 2015. – №7-3. – С. 511-516.
- 100 Давыдов Б.Л., Скородумов Б.А. Статика и динамика машин в типичных режимах эксплуатации. – М.: Машиностроение, 1976. – 430 с.
- 101 Феодосьев В.И. Сопротивление материалов. – М.: Наука, 1986. – 512 с.
- 102 Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В. Справочник по сопротивлению материалов. – Киев: Наукова думка, 1975. – 703 с.
- 103 Jafari A., Vu H.Q., Iida F. Determinants for Stiffness Adjustment Mechanisms // Journal of Intelligent & Robotic Systems. – 2016. – Vol. 82, №3-4. – P. 435-454.
- 104 Коваль А.С., Скарыно Б.Б., Лагун Н.С. Структурная схема механической подсистемы электропривода лифтов при учёте переменной длины канатов подвеса // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2016. – №2(51). – С. 130-138.

105 Ruderman M., Aranovskii S.V., Bobtsov A.A. et al. Nonlinear Dynamics of Drives with Elasticities and Friction// Automation and Remote Control. – 2012. – Vol. 73, №10. – P. 1604-1615.

106 Брейдо И.В., Кунтуш Е.В. Структурно-параметрическая оптимизация электропривода горизонтального петлевого устройства листопркатного стана // Матер. междунар. науч.-практ. конф. «Наука и образование – ведущие факторы стратегии «Казахстан – 2052» (Сагиновские чтения №5). – Караганда: КарГТУ, 2013. – Ч. 2. – С. 251-253.

107 Malafeeva S.I., Konyashina V.I. Mechatronic Simulation of the 300 Rolling Mill // Russian Engineering Research. – 2014. – Vol. 34, №5. – P. 311-316.

108 Ford P.J., Amiri E., Mendrela E. Electric elevator drive with position control// Electrical Engineering. – 2016. – Vol. 98, №3. – P. 307-319.

109 Hwang I.C., Kim S.B. Feedback linearization control of the looper system in hot strip mills // KSME International Journal. – 2003. – Vol. 17, №11. – P. 1608-1615.

110 Зюзев А.М. Математические модели механической части электроприводов. – Екатеринбург: УрФУ, 2010. – 154 с.

111 Ключев В.И. Теория электропривода. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 560 с.

112 Назарова Е.С., Ефименко Р.А. Особенности моделирования электромеханических систем с переменным моментом инерции // Вестник Национального технического университета "Харьковский политехнический институт". – 2017. – №27. – С. 71-74.

113 Удут Л.С., Кояин Н.В., Мальцева О.П. Проектирование и исследование автоматизированных электроприводов: учеб. пос. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2007. – Ч. 6. – 148 с.

114 Ванин В.А., Колодин А.Н., Кулешов Ю.В., Никитина Л.Х. Расчет динамических характеристик металлорежущих станков: учеб. пос. – Тамбов: Изд-во Тамб. гос.техн. ун-та, 2007. – 104 с.

115 Многоподходное имитационное моделирование // [http://www.simulation.ru/consulting/what\\_is\\_simulation](http://www.simulation.ru/consulting/what_is_simulation). 23.03.2017.

116 Имитационное моделирование // <http://ru.wikipedia.org>. 23.03.2017.

117 Кунтуш Е.В., Сиверская Т.И., Баясилова З.А. Имитационное моделирование как метод исследования электропривода горизонтального петлевого устройства // Матер. 10-й междунар. науч.-практ. конф. «Конкурентоспособность нации – основное условие повышения благосостояния народа». – Темиртау, 2018. – С. 39-44.

118 Кунтуш Е.В., Брейдо И.В., Зюзев А.М. Математическое моделирование электропривода горизонтального петлевого устройства // Матер. междунар. науч.-практ. конф. «Интеграция науки, образования и производства – основа реализации Плана нации» (Сагиновские чтения №11). – Караганда: КарГТУ, 2019. – С. 62-63.

119 Имитационное моделирование // <http://works.doklad.ru/view/15Vcnhkv-6s.html>. 25.04.2017.

120 Колесов Ю.Б., Сениченков Ю.Б. Имитационное моделирование сложных динамических систем Exponenta.ru // [http://www.exponenta.ru/soft/others/mvs/ds\\_sim.asp](http://www.exponenta.ru/soft/others/mvs/ds_sim.asp). 18.12.2013.

121 Polyakov A.E., Polyakov K.A., Pavlov N.K. et al. Effect of the Elasticity of the mechanical Part of an Extruder Takeup Shaft on the dynamic Characteristics of the electric Drive // *Fibre Chemistry*. – 2010. – Vol. 42, №1. – P. 63-67.

122 Назарова Е.С. Математическое моделирование электромеханических систем станов холодной прокатки // *Технічна електродинаміка*. – 2015. – №5. – С. 82-89.

123 Коваль А.С., Скарыно Б.Б., Лагун Н.С. Структурная схема механической подсистемы электропривода лифтов при учёте переменной длины канатов подвеса // *Вестник Белорусско-Российского университета*. – 2016. – №2(51). – С. 130-138.

124 Zhang Y., Yan X., Lin Q. Characteristic of Torsional Vibration of Mill Main Drive Excited by Electromechanical Coupling // *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. – 2016. – Vol. 29, №1. – P. 180-187.

125 Abdulrahman I., Radman G. Simulink-based programs for power system dynamic analysis // *Electrical Engineering*. – 2019. – Vol. 101, №2. – P. 345-356.

126 Harrouz A., Becheri H., Colak I. et al. Backstepping control of a separately excited DC motor // *Electrical Engineering*. – 2018. – Vol. 100, №3. – P. 1393-1403.

127 Gołębiowski M., Smoleń A., Gołębiowski L., Mazur D. Functional simulation model of the axial flux permanent magnet generator // *Archives of Electrical Engineering*. – 2018. – Vol. 67, №4. – P. 857-868.

128 Matlab – пакет прикладных программ для решения задач технических вычислений – установка и настройка // <https://pro-spo.ru/information-required-to-install/1053-matlab>. 24.06.2020.

129 Система моделирования динамических систем Simulink. Bourabai Research. Частное Боровское исследовательское учреждение по внедрению новых технологий // <http://bourabai.kz/cm/simulink.htm>. 27.06.2020.

130 Simulink. Группа компаний CSoft // <https://www.csoft.ru/catalog/soft/simulink/simulink.html>. 25.06.2020.

131 Выберите решатель // <https://docs.exponenta.ru/simulink/ug/choose-a-solver.html>. 12.09.2020.

132 Елисеева И.И., Курышева С.В., Костеева Т.В. Эконометрика. – М.: Финансы и статистика, 2007. – 576 с.

133 АС 247 РК. Имитационная модель электромеханической системы горизонтального петлевого устройства стана холодной прокатки / Е.В. Кунтуш, И.В. Брейдо; опубли. 22.10.18. – 1 с.

134 Кунтуш Е.В., Брейдо И.В. Исследование модернизированной системы управления электроприводом горизонтального накопителя полосы листопрокатного стана // *Вестник КГИУ*. – 2020. – №2(29). – С. 76-83.

135 Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. – М.: Изд-во МГУ, 2004. – 798 с.

136 Иванов Г.М., Левин Г.М., Хуторецкий В.М. Автоматизированный многодвигательный электропривод постоянного тока. – М.: Энергия, 1978. – 160 с.

137 Евзеров И.Х., Горобец А.С. и др. Комплектные тиристорные электроприводы: справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 319 с.

138 Перунова М.Н. Колебания и волны. – Оренбург: ОГУ, 2012. – 386 с.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

### Акт внедрения диссертационной работы в учебный процесс

УТВЕРЖДАЮ:

И.о. члена Правления,

проректор КИУ по УР



Сивякова Г.А.

« 09 » 2020 г.

### АКТ ВНЕДРЕНИЯ

Настоящим актом подтверждается использование результатов диссертации Кунтуш Елены Викторовны «Синтез электропривода горизонтального петлевого устройства листопрокатного стана с учетом механических свойств стальной полосы», представленной на соискание степени доктора философии (PhD) по специальности 6D071800 – «Электроэнергетика». Основные теоретические положения и результаты исследований, изложенные в диссертационной работе, внедрены в учебный процесс в Карагандинском индустриальном университете на кафедре «Энергетика» факультета «Энергетика, транспорт и системы управления» и используются в следующих курсах:

- в лекционном и практическом курсах по дисциплине «Математические задачи и компьютерное моделирование» для студентов образовательной программы 6B07105 – «Энергообеспечение промышленных объектов»;
- в лекционном и практическом курсах по дисциплине «Моделирование электромеханических систем» для магистрантов образовательной программы 7M07112 – «Электроэнергетика».

Зав.кафедрой «Энергетика»

к.т.н., доцент

Конакбаева А.Н.

# ПРИЛОЖЕНИЕ Б

## Авторское свидетельство

**ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ**  **РЕСПУБЛИКА КАЗАХСТАН**

**АВТОРЛЫҚ ҚҰҚЫҚПЕН ҚОРҒАЛАТЫН ОБЪЕКТІЛЕРГЕ ҚҰҚЫҚТАРДЫҢ  
МЕМЛЕКЕТТІК ТІЗІЛІМГЕ МӘЛІМЕТТЕРДІ ЕНГІЗУ ТУРАЛЫ**

**КУӘЛІК**

2018 жылғы « 22 » қазан № 247

Автордың (лардың) жөні, аты, әкесінің аты (егер ол жеке басын куәландыратын құжатта көрсетілсе):  
**Кунтуш Елена Викторовна, Брейдо Иосиф Вульфович**

Авторлық құқық объектісі: ЭЕМ-ге арналған бағдарлама  
**Имитационная модель электромеханической системы горизонтального петлевого**

Объектінің атауы: **устройства стана холодной прокатки**

Объектіні жасаған күні: **01.10.2018**

**СВИДЕТЕЛЬСТВО**

**О ВНЕСЕНИИ СВЕДЕНИЙ В ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РЕЕСТР  
ПРАВ НА ОБЪЕКТЫ, ОХРАНЯЕМЫЕ АВТОРСКИМ ПРАВОМ**

№ 247 от « 22 » октября 2018 года

Фамилия, имя, отчество, (если оно указано в документе, удостоверяющем личность) автора (ов):  
**Кунтуш Елена Викторовна, Брейдо Иосиф Вульфович**

Вид объекта авторского права: **программа для ЭВМ**  
**Имитационная модель электромеханической системы горизонтального петлевого**

Название объекта: **устройства стана холодной прокатки**

Дата создания объекта: **01.10.2018**





Құжат түпнұсқасының <http://www.kazpatent.kz/ru/> сайтымен  
"Авторлық құқық", бағамінде тексеруге болсады <https://copyright.kazpatent.kz>  
Подлинность документа возможно проверить на сайте [kazpatent.kz](http://kazpatent.kz)  
в разделе «Авторское право» <https://copyright.kazpatent.kz>

Подписано ЭЦП

Оспанов Е. К.