

Министерство образования и науки Украины

А.В. Садовой, Е.С. Назарова,
В.И. Бондаренко, А.В. Пирожок

**НОВОЕ В МОДЕЛИРОВАНИИ И ИССЛЕДОВАНИИ
ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ
СТАНОВ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ**

Монография

«Просвіта»

2014

УДК 669.18
ББК К1+К327
С143

*Рекомендовано к печати Ученым советом
Запорожского национального технического университета,
протокол № 04 от 25.12.2013 г.*

Рецензенты:

А.С. Бешта – д.т.н., профессор, член-кор. НАНУ, зав. кафедрой «Электропривод», проректор по научной работе Национального горного университета.

И.С. Шевченко – к.т.н., доцент, профессор кафедры «Автоматизированные электромеханические системы» Донбасского государственного технического университета

Авторы:

А.В. Садовой – д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Электротехника и электромеханика», проректор по научной работе Днепропетровского государственного технического университета.

Е.С. Назарова – к.т.н., доцент кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Запорожского национального технического университета.

В.И. Бондаренко – к.т.н., доцент, заведующий кафедрой «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Запорожского национального технического университета.

А.В. Пирожок – к.т.н., доцент кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Запорожского национального технического университета.

С143

Садовой А.В., Назарова Е.С., Бондаренко В.И., Пирожок А.В.

Новое в моделировании и исследовании электромеханических систем прокатного производства / А.В. Садовой, Е.С. Назарова, В.И. Бондаренко, А.В. Пирожок, – Запорожье: «Просвіта», 2014. – 144 с., ил.

ISBN 978-966-653-363-3

© Садовой А.В., Назарова Е.С.,
Бондаренко В.И., Пирожок А.В.
© «Просвіта», 2014.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
Глава 1. АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПРОКАТНОГО ПРОИЗВОДСТВА	8
1.1. Краткая характеристика электромеханического комплекса холодной прокатки	8
1.2. Технологические требования к системам автоматического управления станами холодной прокатки	9
1.3. Состояние и тенденции развития систем автоматизации станов холодной прокатки	11
1.4. Задачи управления электроприводами станов холодной прокатки	15
1.5. Средства управления электромеханическим комплексом холодной прокатки	17
1.6. Методы оптимизации систем управления электрическими приводами станов холодной прокатки	19
1.7. Актуальность применения математического моделирования при совершенствовании и оптимизации систем управления электроприводами	21
Глава 2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ, ИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ В ОСНОВНЫХ МЕХАНИЗМАХ И АГРЕГАТАХ СТАНОВ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ	25
2.1. Намоточно-размоточное устройство	25
2.2. Прокатная клеть	34
2.3. Правильная машина	39
2.4. Приводные двигатели механизмов прокатного производства	41
2.5. Взаимосвязь исполнительного механизма и двигателя через длинный вал	45
2.6. Математическое описание состояния металлической полосы в межклетевом промежутке	49
2.7. Математическое описание процесса прокатки с петлеобразованием	54
2.8. Математическое описание четырехмассовых моделей взаимосвязанных механизмов прокатных станов	56
Глава 3. КОМПЛЕКС КОМПЬЮТЕРНЫХ МОДЕЛЕЙ ЭЛЕМЕНТОВ ПРОКАТНОГО ПРОИЗВОДСТВА	65
3.1. Анализ средств компьютерного моделирования взаимосвязанных электроприводов станов холодной прокатки	65

3.2. Компьютерные модели, учитывающие взаимосвязанность каналов управления.....	67
3.3. Четырехмассовая модель взаимосвязанных электроприводов с упругими связями первого и второго рода.....	80
3.4. Компьютерная модель реверсивного одноклетового стана холодной прокатки.....	87
3.5. Компьютерная модель 4-х клетового стана холодной прокатки «Гандем».....	90
3.6. Компьютерная модель агрегата поперечной резки.....	93
Глава 4. МНОГОКАНАЛЬНЫЙ ДИАГНОСТИРУЮЩИЙ КОМПЛЕКС СТАНА ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ	96
4.1. Аппаратурный состав.....	96
4.2. Программное обеспечение.....	100
Глава 5. МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА ПРИМЕРЕ ДРЕССИРОВОЧНОГО СТАНА	104
5.1. Краткая характеристика оборудования дрессировочного стана 1700.....	104
5.2. Анализ показателей существующей системы управления натяжением (достоинства и недостатки).....	105
5.3. Моделирование существующей системы управления натяжением.....	107
5.4. Проверка адекватности моделей.....	110
Глава 6. ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ НАТЯЖЕНИЕМ ПРОКАТЫВАЕМОЙ ПОЛОСЫ ДРЕССИРОВОЧНОГО СТАНА 1700	115
6.1. Проектирование оптимальной системы управления взаимосвязанными электроприводами.....	115
6.2. Синтез алгоритма управления скоростью рабочей клетки и натяжением прокатываемой полосы дрессировочного стана.....	122
6.3. Моделирование оптимальной системы управления взаимосвязанными электроприводами.....	127
6.4. Результаты сравнения синтезированной и существующей систем при внешних и параметрических возмущениях.....	132
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	139
СПИСОК ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ	141
ПЕРЕЧЕНЬ ПРИНЯТЫХ СОКРАЩЕНИЙ	144

ВВЕДЕНИЕ

В основу настоящей книги положены результаты научных исследований по моделированию электромеханических систем станов холодной прокатки, выполненных авторами на протяжении ряда лет в Запорожском национальном техническом университете и Днепродзержинском государственном техническом университете.

В ходе исследований разработаны математическое описание и комплекс компьютерных взаимосвязанных моделей электромеханического оборудования станов холодной прокатки с учетом упругих связей первого и второго рода, эффекта обрыва, реверсирования и переменности толщины прокатываемой полосы металла; создан диагностирующий комплекс для мониторинга электромеханических процессов электроприводов агрегатов прокатного производства и выявления причин аварийных ситуаций; проведена оценка адекватности разработанных моделей реальному оборудованию с использованием результатов мониторинга диагностирующим многоканальным комплексом; с использованием указанного выше комплекса взаимосвязанных моделей проведен синтез и исследование систем оптимального управления скоростью рабочей клетки и натяжением прокатываемой полосы металла.

Основная цель книги – показать новые возможности разработки и исследования электромеханических систем станов холодной прокатки с использованием комплекса взаимосвязанных моделей элементов прокатного производства, что позволит повысить качество холодной прокатки и снизить количество аварийных ситуаций, вызванных обрывом полосы во время прокатки.

Для анализа и решения поставленных задач использованы методы теории прокатки, механики, электропривода и автоматического управления; численные методы и компьютерное моделирование с использованием прикладных программ – при разработке комплекса моделей элементов прокатного производства. Для синтеза систем оптимального управления скоростью прокатной клетки и натяжением полосы применяются методы теории оптимального управления и задачи аналитического конструирования оптимальных регуляторов на основе концепции возмущенного-невозмущенного движения А.М. Ляпунова. Экспериментальная проверка теоретических положений выполнена путем проведения эксперимента на реальном оборудовании с использованием данных мониторинга диагностирующим многоканальным комплексом. Впервые предложен метод исследования многомассовых взаимосвязанных электроприводов станов холодной прокатки с учетом изменения момента инерции, статического момента сопротивления и толщины прокатываемого металла путем использования разработанного

комплекса математических моделей элементов прокатного производства. Получила дальнейшее развитие теория взаимосвязанных электроприводов с упругими связями путем разработки математической модели четырехмассовой электромеханической системы, в которой двигатели прокатной клетки и намоточно-размоточного механизма связаны с собственными рабочими органами упругими связями первого рода, а механизмы между собой – упругими связями второго рода.

Усовершенствована математическая модель процессов, связанных с переменностью толщины полосы и её обрывом, путем дополнения модели функциональными зависимостями для моделирования работы электро-механического оборудования в аварийных режимах, что способствует повышению надежности новых систем управления, сокращению времени и стоимости процесса проектирования и ремонта существующего электромеханического оборудования станов холодной прокатки.

Учет переменной толщины полосы металла и радиуса рулона в математической модели намоточно-размоточного механизма при решении задачи аналитического конструирования регуляторов позволяет получить алгоритмы оптимального управления электроприводом моталки, весовые коэффициенты которых являются функциями переменных параметров, что обеспечивает необходимое качество процессов управления натяжением полосы и низкую чувствительность синтезированной системы к указанным дестабилизирующим факторам. Выполненный комплекс теоретических и экспериментальных исследований позволил развить теорию и практику многомассовых взаимосвязанных электроприводов основного оборудования станов холодной прокатки с упругими связями первого и второго родов на основе разработанного комплекса взаимосвязанных моделей элементов прокатного производства.

Монография написана в виде самостоятельных разделов, объединенных одной целью. В первом разделе дана краткая характеристика электромеханического комплекса станов холодной прокатки, сформулированы задачи и требования к системам управления, предложены методы их оптимизации, обоснована ее актуальность. Второй и третий разделы посвящены математическому описанию электромеханических процессов, их взаимодействию в основных механизмах и агрегатах станов холодной прокатки; созданию на основе этого описания комплекса взаимосвязанных компьютерных моделей элементов прокатного производства. Четвертый раздел знакомит с созданием диагностирующего комплекса на примере дрессировочного стана 1700-1 цеха холодной прокатки №1 ОАО «Запорожсталь», приводится описание разработки аппаратного состава и программного обеспечения комплекса. В пятом разделе моделируется существующая система управления этим станом и доказывается адекватность разработанных моделей реальным процессам прокатного оборудования.

В шестом разделе предлагается оптимизация системы управления взаимосвязанными электроприводами, синтезирован алгоритм управления скоростью рабочей клетки и натяжением прокатываемой полосы, создана модель этой системы, приведены результаты сравнения синтезированной и существующей систем при внешних и параметрических возмущениях.

Книга рассчитана на инженеров, научных работников и специалистов в области автоматизированного электропривода и систем автоматического управления, может быть полезна при подготовке бакалавров, магистров и аспирантов по направлению «Электромеханика».

Авторы признательны доктору технических наук, профессору, члену-корреспонденту НАНУ, проректору по научной работе Национального горного университета, зав. кафедрой электропривода Беште Александру Степановичу и кандидату технических наук, доценту, профессору кафедры автоматизированных электромеханических систем Донбасского государственного технического университета Шевченко Ивану Степановичу, взявшим на себя труд рецензирования монографии и сделавшим ряд замечаний, устранение которых способствовало улучшению ее содержания.

Авторы заранее выражают благодарность за все замечания и пожелания, которые просят прислать по адресу: 69063, г. Запорожье, ул. Жуковского, 64, ЗНТУ, кафедра ЭПА или на электронный адрес: spn@gmail.com.

Глава 1. АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПРОКАТНОГО ПРОИЗВОДСТВА

1.1. Краткая характеристика электромеханического комплекса холодной прокатки

Металлопрокатное производство относится к наиболее сложным технологическим процессам, поскольку в этом процессе тесно взаимосвязаны полоса металла, механические элементы, технологические машины (моталка, клеть, размотыватель, нажимные устройства, шпиндель, шестереночная клеть и другие) станов и электроприводы этих механизмов.

Известно, что электроприводы (ЭП) станов холодной прокатки (СХП) – это сложные электромеханические комплексы (ЭМК), предназначенные для управления машинами, преобразующими электрическую энергию в механическую, установленные в непосредственной близости друг от друга, выполняющие совместную работу [1]. СХП оборудованы механизмами размотки рулонов и подачи конца рулона в рабочие валки клетки, механизмами, производящими обжатие заготовки в одной или одновременно в нескольких клетях, а также механизмами для сматывания рулонов, их упаковки и транспортировки на склад.

При относительно небольших объемах производства холоднокатаных листов и полос, например из специальных сталей и многих цветных металлов, широко используются одноклетевые реверсивные многовалковые станы, оборудованные мощными намоточно-натяжными барабанами (моталками). Максимальная скорость прокатки на этих станах находится на уровне 10-15 м/с. Интенсивно разрабатываются новые конструкции одноклетевых станов, рассчитанные на работу с повышенными усилиями обжатия при больших скоростях.

Исходным материалом для холодной прокатки является горячекатаная полоса, прокатанная на тонколистовых станах горячей прокатки и свернутая в рулон, предварительно прошедшая колпаковые печи для отжига рулонов стального листа, травильный агрегат для очищения поверхности полосы от окалины, обрезания передних и задних кромок полосы, промасливания. Механические свойства холоднокатаной листовой стали – важнейшие характеристики ее качества, так как определяют способность к вытяжке для получения готовых изделий. Качество холоднокатаных полос характеризуется точностью прокатки (в том числе и плоскостностью), уровнем механических свойств, штампуемостью металла, качеством поверхности. Непостоянство толщины холоднокатаных полос (продольная разнотолщинность)

обусловлено продольной разнотолщиной подката (горячекатаной полосы), биением валковой системы стана холодной прокатки, обусловленным эксцентриситетом бочек и шеек валков. В свою очередь изменение механических свойств влияет на технологические параметры самого процесса холодной прокатки. Комплекс систем автоматизации современного прокатного стана предназначен для реализации таких задач: повышения качества готового проката в результате автоматического регулирования основных технологических параметров; улучшения условий труда производственного персонала; повышения производительности стана за счет сокращения длительности перестроек оборудования и количества аварийных ситуаций, вызванных ошибочным действием обслуживающего персонала; повышения надежности оборудования стана благодаря более совершенному техническому диагностированию; сокращения расхода энергоносителей в результате оптимизации режимов прокатки.

1.2. Технологические требования к системам автоматического управления станами холодной прокатки

Для ведения процесса холодной прокатки и дрессировки требуется осуществление в необходимой последовательности ряда технологических операций. Этим определяются время включения и отключения отдельных двигателей, а также соотношения их частот вращения. Выполнение этих функций, а также некоторых других операций являются объектом автоматизации. Кроме того, системы управления и регулирования станов холодной прокатки должны включать элементы, обеспечивающие надежное функционирование устройств автоматики и защиту системы от аномальных и аварийных режимов.

При прокатке полос система автоматического управления (САУ) главной линией стана должна предусматривать возможность выполнения ряда важнейших операций и функций и отвечать следующим требованиям [2]:

- возможность отдельного управления двигателями клетки и моталок, а для многоклетового стана двигателями каждой клетки в отдельности, двигателями всей группы клеток в целом либо определенной комбинацией двигателей отдельных клеток и моталок в условиях конкретного стана;
- возможность быстрой остановки как стана в целом, так и отдельных его клеток (для многоклетового стана), что не приведет к аварии;
- выключение двигателя одной клетки, последовавшее в результате действия автоматических защитных устройств или воздействия оператора на соответствующие органы управления, вызывает отключение и останов

двигателей всех клеток стана, что важно и для предотвращения брака металла или поломки валков;

- пуск двигателей для заправки полосы должен происходить одновременно или в порядке их следования в направлении движения металла, а также возможность пуска двигателей каждой последующей клетки при заправке металла независимо от других клеток (для многоклетевого стана) [3];

- возможность быстрого снижения скорости двигателя моталки до малой величины к моменту выхода полосы из последней клетки, а также при обрыве полосы, во избежание нанесения концом полосы травм персоналу;

- если работа с металлом в валках была прервана, то для продолжения прокатки после подачи импульса на пуск, двигатели должны автоматически приобрести скорость предшествующую аномальной работе стана;

- ручная и автоматическая регулировки частоты вращения каждого из двигателей должны быть возможны и без связи с двигателями других механизмов;

- возможность реверса валков клетки как с металлом, так и вхолостую. Эта операция требуется также и для двигателя моталки во время снятия рулона и при заправке его в барабан, при настройке электромеханического оборудования, а также после аварийных ситуаций [1];

- система должна обеспечивать возможность работы толчком, т.е. должна допускать кратковременное вращение или кратковременное изменение частоты вращения двигателей отдельно клетки и моталок для подтягивания петли, образовавшейся при заправке, а также для облегчения самой заправки. Весь стан в целом также должен допускать проворачивание валков толчком в любом направлении;

- возможность сообщения каждому из двигателей кратковременно более интенсивного ускорения, необходимого для подтягивания петли, возникшей при заправке или образовавшейся на ходу стана, а также для изменения величины натяжения;

- двигатели наматывающих барабанов должны иметь возможность ускорения или замедления вне зависимости от работы других двигателей стана;

- обеспечение автоматического поддержания постоянства натяжения между клетями стана (для многоклетевого стана) и между клетью и моталками, а также между клетью и размотателем, как в состоянии покоя, так и в установившемся режиме вращения прокатных валков. Кроме того, в периоды разгона и торможения должно осуществляться такое изменение натяжения, которое способствовало бы поддержанию постоянства толщины металла;

- осуществление непрерывного контроля толщины полосы, поступающей на моталку, а также восстановления необходимого размера в случае отклонения его от заданной величины сверх предусмотренных допусков. Возможны и другие требования, обусловленные особенностями каждого конкретного стана.

Для определения требований к САУ станов холодной прокатки важно знать необходимую величину ускорений двигателей в переходных процессах регулирования. Она определяется скоростями изменения основных технологических регулируемых параметров: толщины прокатываемого металла и его натяжения. Зная закономерности, которым должны следовать ускорения регулируемых двигателей в различных режимах управления и регулирования, можно определить необходимые законы изменения их магнитного потока возбуждения и напряжения на их зажимах, найти передаточные коэффициенты различных звеньев системы регулирования, и другие параметры [2].

1.3. Состояние и тенденции развития систем автоматизации станов холодной прокатки

Проблемы построения и оптимизации САУ взаимосвязанных электроприводов технологических линий привлекают к себе широкое внимание специалистов. Указанные вопросы решались многими учеными. В трудах Н.Н. Дружинина [3], Ю.М. Файнберга [2], Ю.А. Борцова, Г.Г. Соколовского [4], В.Н. Егорова, А.Б. Зеленова [5], А.В. Башарина, В.А. Новикова [6], В.И. Ключева, А.В. Садового [7], Л.Г. Лимонова [8], В.Б. Клепикова, О.И. Толочко [9], П.Х. Коцегуба, Чорного О.П., Р.П. Герасимьяка и других разработаны вопросы теории взаимосвязанных электромеханических систем с упругими связями, определены основные пути их анализа и синтеза.

В работах Н.Н. Дружинина дан глубокий анализ статического и динамического режимов многодвигательного электропривода непрерывного стана с учетом влияния характеристик электропривода, упругости механической системы и параметров технологического процесса, была, в частности, показана доминирующая роль упругих свойств системы валок-клеть [3]. В его трудах широко освещены также физические процессы, происходящие при намотке и размотке полосы с барабана моталки. Использование введенного В.И. Ключевым коэффициента электромеханической связи при оценке влияния упругости механических передач на динамику ЭП [10] и синтезе коррекции упростило аналитические исследования, повысило их наглядность. Ю.А. Борцов и Г.Г. Соколовский рассмотрели влияние упругих связей на динамику тиристорных систем ЭП, построенных по принципам подчиненного регулирования [4]. Необходимость осуществления в

короткое время проектирования и наладки ЭП прокатных станов обусловила работу учёных О.В. Слежановского, Н.П. Куницкого в этом направлении. А.Б. Зеленовым были изложены принципы построения систем электромашиного управления и регулирования [5]. О.И. Толочко и П.Х. Коцегуб уделили внимание исследованию систем подчиненного регулирования с наблюдателями состояния динамического и статического токов, системам позиционного ЭП с комбинированным управлением по задающему и возмущающему воздействиям [9].

Однако, в большинстве случаев авторами была рассмотрена двухмассовая система, что значительно упрощает взаимное влияние упругих связей на электроприводы.

Ю.М. Файнбергом приведены физическая трактовка, математическое описание законов, определяющих связи электромеханических величин с параметрами технологического процесса, математическое описание процессов намотки и коррекции раствора валков [2]. Я.П. Ронин уделил большое внимание проблеме комплексной автоматизации моталок [11], а именно регуляторам натяжения полосы между клетью и наматывающим устройством, поскольку ЭП моталки является особо сложным элементом в общей системе стана или линии.

В то же время не достаточно полно разработаны адекватные математические модели многомассовых одновременно взаимосвязанных через обрабатываемый металл и «длинный вал» ЭП СХП, в существующих многомассовых моделях не учитывалось влияние изменяющейся случайным образом толщины прокатываемой полосы.

На сегодняшний день большая часть, существующих прокатных станов имеет следующие общие характеристики [12]:

- использование приводов постоянного тока с аналоговыми системами управления;
- построение СУ ЭП на базе локальных контроллеров и реле;
- надежная работа силовых выпрямительных секций и двигателей в условиях наличия достаточного количества запчастей и качественного обслуживания;
- высокая жесткость элементов электромеханической системы главных приводов прокатных клеток, определяющая динамические возможности приводов;
- отсутствие системы информационного сопровождения работы электроприводов, влияющей на оперативность управления технологическим процессом прокатки;
- отсутствие математического аппарата, позволяющего на уровне синтеза использовать модели подсистем СХП.

С учетом анализа литературы можно выделить следующие тенденции развития холоднокатаного проката [12]:

- повышение производительности станов за счет комплексной автоматизации процесса прокатки;

- улучшение качественных характеристик холоднокатаного проката (точность геометрических размеров, состояние поверхности, разнотолщинность, физико-математические свойства и однородность структуры металла и прочее) за счет повышения качества управления электромеханическими системами станов холодной прокатки;

- оптимизация технологических параметров процесса прокатки;

- снижение металлоемкости и энергоемкости оборудования;

- переоснащение и модернизация систем управления ЭП СХП.

Комплексная автоматизация процесса прокатки предусматривает построение многоуровневой системы автоматического управления (САУ) ЭП СХП, решающей следующие задачи управления [13]:

- выработка управляющих воздействий для приводов основных и вспомогательных механизмов в соответствии с производственной программой и текущими параметрами прокатки;

- прямая или косвенная оценка технологических параметров для регулирования натяжения и петлеобразования, контроля движения проката, стартовых команд для ножниц, толкателей, охлаждающих сопел и прочее;

- представление и изображение установочных и текущих значений параметров и координат, таких как нагрузка двигателей, величина петель, натяжение проката, частоты вращения двигателей, скорости прокатки, длины концевой обрезки полосы и другие производственные параметры;

- диалог между обслуживающим персоналом и системой управления (СУ), а также дисплейное обслуживание и управление ЭП прокатного стана и протоколирование основных данных процесса;

- использование результатов мониторинга для подтверждения адекватности созданных имитационных моделей СХП, которые будут в дальнейшем использованы при создании нового и реконструкции существующего прокатного оборудования.

В соответствии с идеологией блочно-модульного исполнения комплектных электроприводов, как правило, предусматривается возможность широкого варьирования силовых модулей и модулей управления, входящих в состав силовых блоков и блоков управления комплектного электропривода, с целью их адаптации к режимам и условиям работы технологического оборудования [8].

В этих условиях могут быть рассмотрены несколько шагов модернизации САУ СХП [14] - замена аналоговых и релейно-контактных систем управления на цифровые с использованием промышленных компьютеров, технологических контроллеров, логических контроллеров, интеллектуальных модулей периферии и прочего, соответствующих верхнему и среднему уровню автоматизации. Следующий шаг –

дополнение перечисленных выше замен аналоговых блоков управления комплектных ЭП постоянного тока цифровыми с использованием контроллеров привода. Это целесообразно, если силовое выпрямительное оборудование ныне действующих комплектных электроприводов в хорошем, работоспособном состоянии. При этом привод постоянного тока представляется как новый современный цифровой комплектный электропривод, сохранивший старые тиристорные секции, которые являются наиболее дорогостоящими [14]. После модернизации создаются благоприятные условия для организации многоуровневой автоматической системы управления технологическим процессом (АСУТП), так как главные приводы могут быть легко сопряжены с уровнем управления и организацией производства [15]. Следующий шаг модернизации - дополнение и замена силовых блоков комплектных электроприводов. Электродвигатели и сети электропитания остаются неизменными. Завершающий шаг - полная модернизация автоматизированных электроприводов путем замены электроприводов постоянного тока на электроприводы переменного тока с заменой приводных двигателей. При новом оборудовании следует начинать сразу с последних пунктов.

Современный подход в области модернизации прокатного производства - замена двигателей постоянного тока на двигатели переменного тока, однако по-прежнему остается актуальным и востребованным проведение модернизации на существующем оборудовании, а именно, разумное сочетание замены изношенного, морально и физически устаревшего электрооборудования новым, имеющим высокие показатели надежности и качества, с обоснованным максимально возможным сохранением действующего оборудования, которое по своим техническим характеристикам допускает длительную дальнейшую эксплуатацию [8]. Чтобы подтвердить правильность принятия решения о такого рода модернизации, достаточно важной является возможность проведения математического эксперимента с помощью имитационного моделирования [1, 4, 8, 16]. Этот метод позволяет повысить эффективность реконструкции, сократить время и затраты на проведение натурного эксперимента, а также на введение нового оборудования в промышленную эксплуатацию [17].

Известно, что нормальное функционирование новых, высокопроизводительных цехов холодной прокатки невозможно без использования АСУТП. Их применение дает положительные результаты, но особенно необходимо оно на основном технологическом агрегате - прокатном стане, где в настоящее время автоматизированы такие операции: подача и уборка рулонов, задание полосы в клеть, установка валков в рабочее положение, перевалка рабочих валков и так далее [1, 18]. Качество выпускаемой продукции в решающей степени зависит от работы

автоматических систем, управляющих самим процессом прокатки. К их числу относятся системы:

- автоматического регулирования толщины полосы (САРТ).
- автоматического регулирования натяжения (САРН).
- автоматического регулирования профиля и формы полосы (САРПФ).
- автоматической подачи смазочно-охлаждающей жидкости (САПОЖ).

Анализ публикаций по моделированию и управлению многомассовыми электромеханическими системами с упругими звеньями, переменными моментами нагрузки и инерции, широким диапазоном изменения рабочих скоростей показал, что перспективной является разработка систем управления, устойчивых при неограниченном увеличении коэффициента усиления и гарантирующих апериодический переходной процесс с минимальным перерегулированием и нулевой статической ошибкой.

В связи с этим актуальной является задача разработки системы управления с использованием комплекса взаимосвязанных многомерных моделей электромеханического оборудования станов холодной прокатки, удовлетворяющей таким требованиям: возможность отдельного управления двигателями клетки и намоточно-размоточных механизмов; поддержание требуемого технологией темпа разгона и торможения; возможность быстрой остановки стана в целом и отдельных агрегатов; обеспечение поддержания необходимой скорости клетки, натяжения полосы, минимизация перерегулирования в переходных режимах.

1.4. Задачи управления электроприводами станов холодной прокатки

При обработке стальной полосы на прокатных станах секции агрегатов связаны единым технологическим процессом. При этом валы приводных двигателей соединены с механизмами шпинделем, который можно представить в виде упругих механических передач (упругие связи первого рода), а сами секции связаны через обрабатываемый материал, образующий в первом приближении упругие связи второго рода [4].

При рассмотрении такой сложной динамической системы возникают следующие задачи [19]:

- оценка влияния упругих связей первого и второго рода на динамику систем электроприводов (СЭП);
- выбор способов оптимизации динамики взаимосвязанных СЭП.

Система управления технологическими агрегатами, связанными через обрабатываемый материал является многомерной многосвязной системой, в общем случае с переменными параметрами, в которой

электрические, механические и технологические факторы взаимосвязаны определенным образом. В этом случае каждый агрегат имеет свою систему управления, но поскольку агрегаты связаны единым технологическим процессом, то и сигнал управления должен формироваться с учетом необходимости координации отдельных агрегатов.

Одним из основных требований, которые предъявляются к системе многодвигательного ЭП прокатного стана, является обеспечение транспортировки полосы с заданной скоростью и поддержанием заданного натяжения во всех режимах работы на всех участках агрегата или какой-либо его части [8]. Это является необходимым условием обеспечения качественного ведения технологического процесса прокатки, поддержания качества и толщины транспортируемого материала, качества смотки рулона, снижения количества обрывов полосы. Для выполнения заданного требования один из механизмов агрегата или его отдельной части определяется как ведущий. Его скорость определяет скорость движения полосы, а, следовательно, и производительность агрегата. ЭП этого механизма выполняется с САУ скорости электродвигателя. Остальные механизмы, соответственно, становятся ведомыми, определяющими величину натяжения полосы на соответствующих участках агрегата. ЭП этих механизмов выполняются с САУ натяжения. Для управления ЭП соответствующих механизмов в этом случае могут быть применены системы прямого и косвенного регулирования натяжения.

Достаточно важным условием осуществления нормального процесса прокатки является поддержание заданного постоянного или переменного соотношения скоростей вращения прокатных двигателей и двигателей моталок как в установившемся режиме скорости движения металла, так и в периоды разгона и торможения стана [20]. Уже сам выбор способа питания прокатных двигателей производится с учетом соображений о возможности получения гибкого управления частотой вращения прокатных двигателей и двигателей намоточно-размоточных устройств. Для современных мощных непрерывных и реверсивных станов питание прокатных двигателей каждой из клеток, а также двигателей разматывателей и моталок осуществляют от отдельных тиристорных преобразователей [2].

Системы управления двигателями постоянного тока ЭП СХП, построенные по принципу подчиненного регулирования и настроенные на модульный или симметричный оптимумы, позволяют легко синтезировать СУ с требуемыми показателями качества переходных процессов. Для того, чтобы сделать систему подчиненного регулирования скорости астатической по нагрузке, обычно заменяют пропорциональный регулятор скорости пропорционально-интегральным. Более высокого качества

переходных процессов в однозонных системах ЭП постоянного тока при обработке как управляющего так и возмущающего воздействием можно добиться вводом дополнительной положительной обратной связи по статическому току или заменой обратной связи по полному току якорной цепи обратной связью по его динамической составляющей при сохранении регулятором скорости П-структуры. Для улучшения динамики астатических систем подчиненного регулирования скорости можно также замыкать контур тока по идентифицированному при помощи наблюдателя состояния динамическому току или дополнять систему каналом компенсации влияния нагрузки на статические свойства привода, используя для этого идентифицированный момент статического сопротивления [9].

1.5. Средства управления электромеханическим комплексом холодной прокатки

Современные средства автоматизации технологического процесса прокатки включают в свой состав вычислительные средства (ВС) различного типа, к которым относятся: промышленные компьютеры, специализированные контроллеры, однокристалльные микросхемы, встраиваемые одноплатные компьютеры, управляющие вычислительные комплексы. Как правило, в системах автоматизации технологических объектов ВС выполняют организационные и прикладные функции.

Организационные функции обеспечивают осуществление управления в самом ВС и служат для поддержания структуры системы в требуемом состоянии и для управления конфигурациями устройств.

Прикладные функции определяются конкретными задачами контроля технологического объекта и управления им. К ним относятся: сбор и первичная обработка данных; контроль процесса; управление процессом, его стабилизация и оптимизация; вспомогательные функции [21].

Сбор, первичная обработка данных и контроль процесса прокатки соответствуют группе информационных функций ВС. Более детально эти функции можно представить в следующем виде: сбор и хранение информации о состоянии технологического процесса и устройств системы управления; непрерывный контроль соответствия параметров прокатки и системы управления допустимым значениям; выдача информации оператору о несоответствии параметров допустимым значениям; непрерывная или периодическая регистрация значений контролируемых параметров; сигнализация в случае приближения к аварийному состоянию; оперативная связь с ВС других уровней и ряд других функций. Управление, стабилизация и оптимизация соответствуют группе управляющих функций ВС. Эти функции заключаются в следующем:

пуске и останове прокатного комплекса или его участков; формирование управляющих воздействий обеспечивающих ведение заданного режима прокатки; выполнение расчетов для определения ряда технологических параметров (решение задач параметрической идентификации); автоматической оптимизации процесса в соответствии с принятым критерием качества.

В связи с этим выдвигаются требования, во-первых, к выбору вычислительного устройства и программному обеспечению, а во-вторых, к численным методам и алгоритмам, реализующим ту или иную задачу. Не всегда, но в основном эти требования взаимосвязаны.

Программируемые контроллеры и информационно-управляющие комплексы с широкой номенклатурой интеллектуальных модулей нашли широкое применение в современных автоматизированных системах управления технологическим процессом прокатки [22]. Названные ВС строятся на базе микропроцессорной техники. Современные микропроцессоры (МП) характеризуются: развитой регистровой структурой; конвейерным принципом выполнения команды с предварительной выборкой, увеличивающей пропускную способность канала; распределенным аппаратно-микропрограммным устройством управления, обеспечивающим повышение быстродействия МП; мультиплексируемым обобщенным каналом адрес/данные с возможностью расширения адресного пространства; развитыми средствами построения мультипроцессорных систем; многофункциональностью использования выводов большой интегральной схемы, позволяющей адаптировать МП к уровню сложности разрабатываемой системы [21, 23]. Именно эти структурные решения определяют основные технические параметры и функциональные возможности современных МП.

Программируемый контроллер имеет большой набор функциональных модулей, сетевые средства, средства отображения данных о технологическом процессе, средства программирования и дистанционного управления (переносные пульты). Модули ввода/вывода аналоговой и дискретной информации содержат узлы гальванического разделения сигналов, узел мультиплексирования аналоговых входных сигналов, а также преобразователи: аналого-цифровой (АЦП); цифро-аналоговый (ЦАП), дискретно-цифровой (ДЦП) и цифро-дискретный (ЦДП).

Конфигурация контроллера определяет систему связи каналов с входами и выходами контроллера, а также варианты взаимодействия каналов. В общем случае входы каналов соединены не только с входами контроллера, но и с выходами других каналов. Подобная возможность позволяет реализовать многосвязную (взаимосвязанную) структуру, в которой формируются сигналы коррекции, организуются каскадные

схемы, выполняются логические переключения, ведется программное управление.

В настоящее время промышленные компьютеры имеют схожую архитектуру, что и персональные компьютеры (ПК). Кроме того, промышленные компьютеры имеют большую номенклатуру цифровых и аналоговых модулей ввода/вывода, коммуникационных плат, плат расширения и комплектующих [22]. Высокая производительность ПК, большая номенклатура модулей и эффективные программные средства позволяют решать широкий спектр задач автоматизации.

1.6. Методы оптимизации систем управления электрическими приводами станов холодной прокатки

Основными возмущающими воздействиями на стане являются дестабилизирующие сигналы со стороны прокатываемого металла (изменение температуры, переднего и заднего натяжений, химического состава, толщины проката, ширины, скорости прокатки и прочее) и со стороны клетей (нагрев валков, износ валков, изменение модуля упругости валковой системы, изменение трения в подшипниках при изменении скорости прокатки, эксцентриситет и овальность валков). Для технологических процессов прокатных цехов характерны частые изменения параметров, появление случайных факторов, разного рода нелинейностей, шумов и помех, множество обратных связей и других факторов, затрудняющих реализацию стратегий управления, базирующихся на идее линеаризации и стационарности систем.

В связи с этим актуальной является разработка комплекса взаимосвязанных математических и компьютерных моделей электромеханического оборудования станов холодной прокатки, которые учитывают упругие связи между двигателем и исполнительным механизмом, упругую связь механизмов через прокатываемую полосу металла, возможность изменения толщины, а также эффект обрыва и реверсирования прокатываемой полосы. Использование этого математического описания процесса прокатки при синтезе систем управления скоростью и натяжением полосы позволяет обеспечить поддержание необходимой скорости клетки, натяжения полосы, минимизацию перерегулирования в переходных режимах с нулевой статической ошибкой.

Разработку алгоритмов управления электроприводами технологических объектов разного производственного назначения выполняют, как правило, с учетом двух важнейших оценок качества – быстродействия (с учетом ограничений на потребляемую мощность) и связанной с ним производительностью и интегральной квадратичной оценкой ошибок управления и связанным с ней качеством

технологического процесса. Достижение положительных результатов по второй оценке предопределяет (с учетом энергетических ресурсов) положительный результат по первой оценке.

В теории и практике управления взаимосвязанными электромеханическими системами стремятся получить нормированные динамические процессы на основе типовых алгоритмов управления при малых и больших изменениях переменных, учитывая всю совокупность физических особенностей технических средств, на базе которых реализуется электромеханическая система. Для автономных систем при малых изменениях переменных – это широко известные в методах каскадного (подчиненного) управления настройки контуров регулирования на «оптимум по модулю» (ОМ) и «симметричный оптимум» (СО), а в методах модального управления – стандартные распределения корней характеристических полиномов [16].

С единых позиций синтезируются алгоритмы управления локальными и взаимосвязанными объектами в режимах малых и больших отклонений переменных. На основе процедур агрегирования (получение из исходной модели эквивалентной ей модели с меньшим количеством переменных) и аттракции (организации притягивающих множеств в фазовом пространстве) синтезируются алгоритмы управления и обеспечивающие оптимальность по быстродействию и точности.

В современных технологиях синтеза нашли широкое применение компьютерные программы, реализующие все вышеперечисленные методы. Эти программы поддерживают высокую быстроту вычислительных процедур, что обеспечивается применением эффективных численных алгоритмов решения систем уравнений, поиска корней полиномов и собственных значений матриц, условных экстремумов функций и прочее [24]. Важнейшим требованием к программно-методическому обеспечению является избавление проектировщика от вспомогательных действий, отвлекающих от решения основных задач. При синтезе основной задачей является выбор элементов и структуры системы для удовлетворения требований к её поведению. Компьютерные методы синтеза поддерживаются программными средствами максимально удобными для проектировщика. В соответствии с технологическими условиями процесса прокатки для конкретного сортамента проката устанавливаются оптимальные технологические параметры. По ходу технологического процесса возможны коррективы отдельных параметров (по реальным данным процесса), направленные на улучшение показателей прокатки. Одним из таких показателей является разделение удельной энергии в клетки, группе клеток и в прокатном стане в целом. В частности, при смене сортамента или отклонении температуры и физико-механических свойств заготовки от значений, предусмотренных технологическими инструкциями, возможна коррекция скорости прокатки

с целью минимизации удельной энергии. Эта коррекция может быть выполнена системой автоматической оптимизации, реализуемой на технологических контроллерах и являющейся вторичной системой по отношению к системам управления скоростями, соотношением скоростей клетей, натяжением, петлей и прогибом проката. Системами автоматической оптимизации возможна также коррекция алгоритмов управления переменными с целью минимизации динамических ошибок. В частности, при управлении натяжениями проката близкими к нулевым значениям (приближение к свободной прокатке) динамические отклонения переднего и заднего натяжений в межклетевых промежутках должны быть сведены к минимальным значениям [23]. Это можно выполнить в автоматическом режиме, путем оценки регуляторов натяжения, приводимых к минимизации этих оценок.

1.7. Актуальность применения математического моделирования при совершенствовании и оптимизации систем управления электроприводами

При создании систем автоматизации с применением вычислительной и микропроцессорной техники для прогнозирования, проектирования и оптимизации параметров оборудования и технологии холодной прокатки возрастает роль математического моделирования [3]. Разработка методов и универсальных математических моделей для исследования динамических режимов работы электромеханических систем является весьма актуальной задачей, что обуславливается стремлением исследователей наиболее полно отразить в модели особенности объекта (усложнить модель), с одной стороны, и представить его как элемент системы (по возможности упростить модель), с другой [2]. Одним из наиболее распространенных предназначений моделей является их применение при изучении и прогнозировании поведения сложных процессов и явлений. Другое, не менее важное, предназначение моделей состоит в выявлении ими наиболее существенных факторов, формирующих определенные свойства объекта, учет которых необходим при исследовании различных процессов или явлений [4].

Одним из важных этапов математического моделирования является переход от технической и концептуальной постановки задачи к математической, то есть описание исследуемого объекта на языке математических формул и уравнений. Поэтому часто возникает необходимость «разбить» поставленную задачу на несколько более простых подзадач, которые имеют или известные решения, или которые можно решить с помощью апробированных методов. Для этой цели удобно использовать методы структурного моделирования, позволяющие ещё на стадии постановки упростить решаемую задачу путем

исследования внутренней структуры рассматриваемого объекта, изучения свойств отдельных элементов объекта и связей между ними. При этом структурные схемы, связи подсистем и их элементов проще изобразить графически, что упрощает анализ объектов исследования [4].

В мире накоплен положительный опыт по созданию математических моделей процесса холодной прокатки или отдельных его координат, однако многие из этих моделей имеют ограниченную область применения, недостаточно полно освещены вопросы моделирования названных систем с учетом переменных параметров многомассовых одновременно взаимосвязанных через обрабатываемый металл и «длинный вал» электромеханических систем (ЭМС) станов холодной прокатки (СХП). Вызывает трудности изменение структуры исследуемых ЭМС как в электрической, так и в механической частях, что не позволяет создать различные по конструкции модели агрегатов прокатного производства для проведения предварительных экспериментов на стадии проектирования новых систем управления.

Поскольку математическое моделирование является наиболее совершенным и эффективным методом моделирования, который при исследовании и оптимизации основывается на современных методах математического анализа, вычислительной математики и программирования, то исследования электромеханических комплексов целесообразно проводить на математических моделях. Однако, модели большинства ЭМС не всегда адекватны своим оригиналам из-за сложности учета в математическом описании всех обстоятельств и особенностей реальных процессов.

Благодаря высокому уровню современного программирования существует возможность при выборе программного продукта учесть совокупность факторов идентификации ЭМС, таких как вид математического описания исследуемой ЭМС; особенности представления данных; вид представления результатов расчета; возможность гибкого изменения или редактирования математической модели, алгоритмов, точности, выбора и автоматизации применения численных методов при расчете систем дифференциальных уравнений, возможность автоматизации процесса вычисления [5]. Для решения задач исследования систем автоматизированных ЭП используют такие программные средства: MATLAB, MATHCAD, LABVIEW, MATHEMATICA и другие.

Достаточно удобно рассматривать ЭМС в виде набора структурных схем, особенно, когда необходимо синтезировать структуру и параметры систем управления. Условно можно выделить агрегаты СХП, которые универсальны для большинства станов: наматывающее и разматывающее устройства, прокатная клеть, правильная машина, режущие прокатанный металл ножницы. Кроме того, все названные агрегаты связаны между

собой: разматывающее устройство подает прокатываемую полосу в валки прокатной клетки, из клетки полоса поступает или в последующие клетки (если стан многоклетевой), или в правильную машину, из которой выходит полоса, которая подается или на наматывающее устройство, или на ножницы поперечной или продольной резки для последующего формирования листов необходимого формата. Каждый из этих агрегатов приводится в движение электрическим двигателем, который упруго связан с исполнительным механизмом через длинный вал. Следовательно, в указанный выше набор основных элементов СХП необходимо добавить такие структурные единицы как «длинный вал» и «прокатываемая полоса», которые представляют собой упругие связи первого и второго родов. Структурная схема СХП показана на рисунке 1.1.

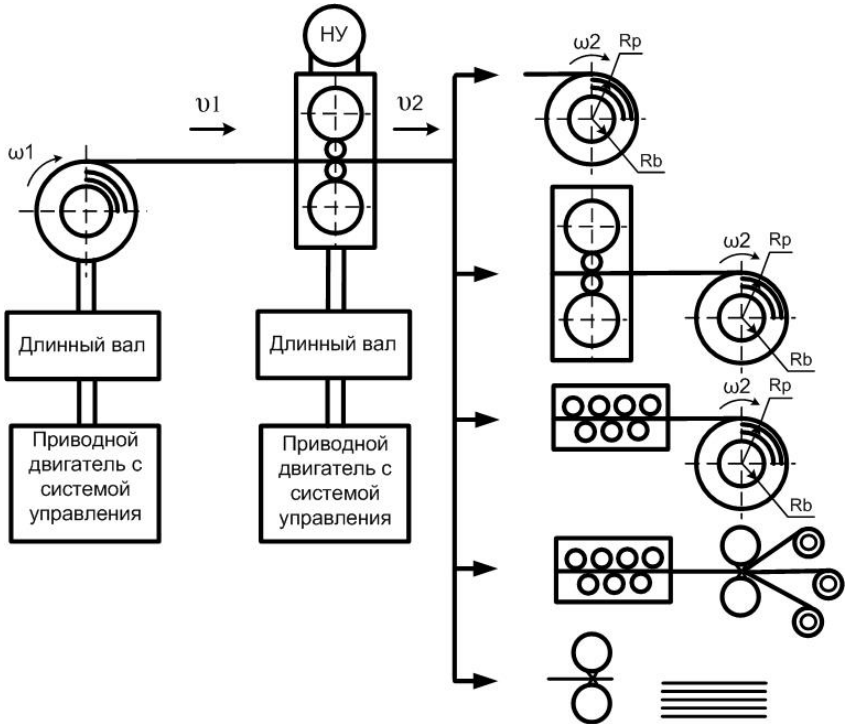


Рисунок 1.1 – Структурная схема стана холодной прокатки

В настоящее время в инженерной практике для решения задач исследования и оптимизации используются различные программные продукты: специализированные пакеты; библиотеки программ; математические системы программирования.

Хорошо разработаны методики и алгоритмы, позволяющие исследовать режимы работы сложных электромеханических комплексов; анализировать их качество, рассчитывать частотные характеристики и импульсные переходные функции; исследовать динамику сложных систем, содержащих элементы с нелинейными характеристиками; рассчитывать оптимальные процессы при наличии ограничений. Поэтому при выборе того или иного программного продукта необходимо учитывать вид математического описания исследуемой электромеханической системы, особенности представления данных модели, каким порядком дифференциальных уравнений или каким порядком и видом матрицы (симметричная, вырожденная и так далее), или каким количеством структурных элементов графа описывается электромеханическая система, вид представления результатов расчета, количество и вид нелинейных характеристик, описывающих управляющие и возмущающие воздействия, возможность гибкого изменения математической модели.

Выбор наиболее подходящей методики при решении практических задач прокатки зачастую является довольно сложной задачей, решение которой при создании модели конкретного производственного оборудования, а именно СХП, потребует значительных временных затрат. Поэтому актуальной является идея создания библиотеки блоков для конструирования необходимых СХП.

Глава 2.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ В ОСНОВНЫХ МЕХАНИЗМАХ СТАНОВ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ

Существует достаточно большое количество различных видов конструкций станов холодной прокатки в зависимости от требований, предъявляемых к выпускаемой продукции. На дрессировочных и непрерывных станах производят прокатку в одном направлении, в соответствии с технологическими особенностями производства, соответственно, такие станы могут быть оснащены одной или несколькими прокатными клетями. На реверсивных станах производят прокатку в обоих направлениях, поэтому они оборудованы двумя моталками, одна из которых установлена перед рабочей клетью, а вторая – за клетью. Одноклетевые реверсивные станы применяют при прокатке листов небольших партий при широком сортаменте по типоразмерам, а также при прокатке легированной листовой стали. Они требуют индивидуального подхода к выбору скоростей, обжатий и других параметров прокатки [13].

Изменение параметров прокатки и настроек контуров регулирования ЭП на действующем стане без его остановки практически невозможно. Поэтому в качестве самого экономичного метода исследований принято математическое моделирование с проверкой полученных результатов экспериментальным путем.

К достоинствам математического моделирования следует отнести возможность выделения для исследования наиболее важных свойств объекта, абстрагируясь от несущественных его характеристик. Моделирование позволяет сформулировать новые гипотезы и получить новые знания об объекте, которые при его исследовании были недоступны. Построение модели и формализация связей между её элементами позволяет устранить пробелы в знаниях об объекте и выявить новые качественные проблемы, которые изначально не могли быть предусмотрены. Моделирование сложных взаимосвязанных объектов, таких как станы холодной прокатки, дает возможность избежать слишком больших затрат, необходимых для их непосредственного исследования.

2.1. Намоточно-размоточное устройство

Автоматизированный электропривод моталок и разматывателей станов холодной прокатки относится к числу наиболее сложных промышленных электроприводов. Сложность и характерные отличия обусловлены основной функцией этих приводов – регулировать с высокой

точностью в процессе прокатки натяжение наматываемой полосы при переменном диаметре рулона, нагрузке, моменте инерции и поддержание необходимой по технологии различной линейной скорости движения полосы.

Основной задачей развития теории и практики применения ЭП намотно-размоточных механизмов является повышение точности регулирования натяжения, минимизация динамической и статической ошибок.

Особенности ЭП моталок и разматывателей СХП, связанные с необходимостью учета переменных параметров процесса прокатки, с наличием разного рода упругих связей, вносят определенные усложнения, как в математическое описание, расчеты, так и в структуру привода, его систему управления [25]. Согласно технологическим требованиям, ЭП моталки должны осуществить такую смотку полосы, при которой рулоны имеют правильную цилиндрическую форму с ровной боковой поверхностью. Для прокатных станов необходимым требованием также является поддержание неизменной толщины полосы в течении одного прохода. На соблюдение этих требований, помимо ряда технологических факторов существенное влияние оказывают величина и характер натяжения полосы. Поэтому основным требованием технологии для подобных систем является обеспечение неизменного натяжения, как при установившейся скорости, так и в переходных режимах.

При смотке полоса находится в упруго-напряженном состоянии. Заданное натяжение должно поддерживаться во всех режимах работы стана: на нулевой скорости (режим покоя), при разгоне и замедлении, при прокатке на установившейся скорости. Требуемая точность регулирования натяжения обуславливается влиянием его на качество продукции и прежде всего на продольную разнотолщинность полосы [11, 25]. Поддержание заданного натяжения требуется также для получения необходимой плоскостности полосы (отсутствие волны, коробоватости, рифления) и обеспечения плотности намотки рулона.

Натяжение полосы создается при помощи электроприводов намоточных устройств: моталки и разматывателя. На реверсивных одноклетевых станах холодной прокатки моталка и разматыватель установлены по разные стороны рабочей клетки, и после реверса направления прокатки металла моталка и разматыватель меняются между собой местами [5, 13]. Электропривод наматывающей моталки работает в двигательном режиме, обеспечивая выходное натяжение полосы. Двигатель разматывателя работает в генераторном режиме. Ведущим двигателем в этом случае является прокатный двигатель клетки.

В процессе прокатки полоса разматывается с одной моталки и наматывается на другую, при этом диаметры рулонов непрерывно изменяются (рисунок 2.1). Чтобы поддерживать постоянной линейную

скорость прокатки, необходимо скорость двигателя разматывающего механизма уменьшать или увеличивать в зависимости от режима работы стана. Изменение диаметров рулонов в течение всего цикла прокатки должно учитываться для поддержания постоянства натяжения полосы прокатываемого металла [2, 3, 26].

Угловая скорость двигателя определяется с учетом линейной скорости движения полосы v и текущего значения радиуса рулона R_p из соотношения:

$$\omega = v \cdot i / R_p, \quad (2.1)$$

где v – линейная скорость движения полосы ($v = \text{Const}$),
 i – передаточный коэффициент редуктора.

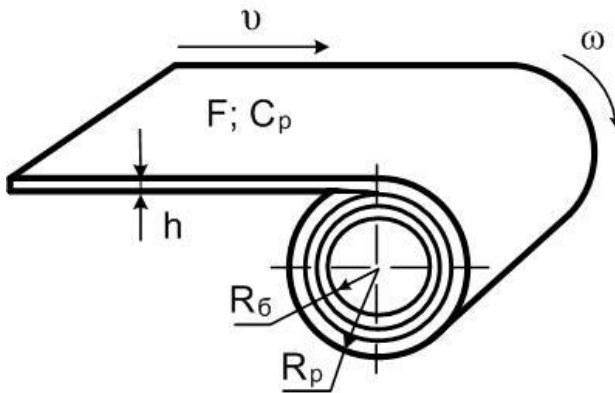


Рисунок 2.1 – Схема намотки полосы в рулон

Момент сопротивления на валу намоточно-размоточного устройства находится через его составляющие [13]:

$$M = M_{пол} + M_{пот} + M_{деф} + M_{дин}, \quad (2.2)$$

где $M_{пол}$ – полезный момент, необходимый для создания заданного натяжения F ;

$M_{пот}$ – момент, необходимый для преодоления механических потерь в системе «двигатель – механизм»;

$M_{деф}$ – момент, затрачиваемый на деформацию изгиба полосы при намотке рулона;

$M_{дин}$ – динамический момент, обеспечивающий ускорение намоточного устройства при разгоне и торможении, а также при изменении радиуса рулона.

В зависимости от режима работы стана (прокатка в прямом или в обратном направлении) соотношение между упомянутыми составляющими моментов может быть различным. Полезный момент $M_{пол}$ определяется значением усилия F и в ряде случаев значительно превышает значение момента потерь $M_{пот}$, что позволяет пренебречь влиянием последнего на работу стана [26]. Значение момента $M_{деф}$ тем меньше, чем тоньше перематываемая полоса металла.

В процессе намотки с постоянным натяжением полезный момент прямо пропорционален радиусу рулона:

$$M_{пол} = FR_p. \quad (2.3)$$

При постоянном натяжении полосы (независимо от радиуса) полезная мощность пропорциональна скорости полосы и находится из соотношения:

$$P_{пол} = Fv. \quad (2.4)$$

Выражения (2.3) и (2.4) могут служить для построения системы автоматического управления с косвенным измерением натяжения. Если пренебречь разницей между моментом на валу двигателя и полезным моментом (считая, что влияние трех последних слагаемых в выражении (2.2) мало, либо будет скомпенсировано), а также пренебречь механическими потерями электродвигателя, то можно полагать, что электромагнитный момент $M_{эм}$ двигателя следует изменять по закону [23]:

$$M_{эм} = FR_p/i. \quad (2.5)$$

С другой стороны, момент двигателя постоянного тока независимого возбуждения равен:

$$M_{эм} = C_d \Phi I_a, \quad (2.6)$$

где Φ и $I_{\text{я}}$ – магнитный поток и якорный ток двигателя соответственно; C_d – конструктивная постоянная двигателя.

В результате сравнения двух последних выражений может быть сформулирован наиболее распространенный закон косвенного регулирования натяжения полосы: при заданном постоянном натяжении F необходимо поддерживать постоянным якорный ток $I_{\text{я}}$, изменяя поток возбуждения Φ двигателя пропорционально радиусу R_p рулона.

Из обобщенного уравнения Лагранжа момент динамический определяется таким уравнением:

$$M_{\text{дин}} = J_{\Sigma}(t) \frac{d\omega(t)}{dt} + \frac{\omega(t)}{2} \cdot \frac{dJ_{\Sigma}(t)}{dt} = J_{\Sigma}(\alpha) \frac{d\omega(t)}{dt} + \frac{\omega^2(t)}{2} \cdot \frac{dJ_{\Sigma}(\alpha)}{d\alpha},$$

однако, одной из составляющей момента динамического можно пренебречь при медленном изменении момента инерции, тогда динамический момент на валу двигателя равен:

$$M_{\text{дин}} = J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt}, \quad (2.7)$$

где J_{Σ} – суммарный момент инерции вращающихся частей наматывающего устройства вместе с рулоном, приведенный к валу двигателя.

Исходя из (2.1), определим производную угловой скорости:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{i}{R_p} \frac{dv}{dt} - \frac{v i}{R_p^2} \frac{dR_p}{dt}. \quad (2.8)$$

При этом динамический момент $M_{\text{дин}}$ двигателя можно представить в виде двух составляющих [5]:

$$M_{\text{дин}} = M_{\text{дин1}} + M_{\text{дин2}}. \quad (2.9)$$

Составляющая $M_{\text{дин1}}$ требуется для создания ускорения dv/dt при данном радиусе рулона R_p и равна:

$$M_{\text{дин1}} = \frac{J_{\Sigma} i}{R_p} \frac{d\nu}{dt}. \quad (2.10)$$

Составляющая $M_{\text{дин2}}$ учитывает изменение радиуса рулона R_p и рассчитывается в виде:

$$M_{\text{дин2}} = -\frac{J_{\Sigma} \nu i}{R_p^2} \frac{dR_p}{dt}. \quad (2.11)$$

Момент инерции J рулона состоит из двух частей: неизменного момента инерции J' (вращающихся частей механизма и собственного момента двигателя) и меняющегося с изменением радиуса рулона момента инерции наматываемого (разматываемого) рулона металла [13]:

$$J'' = m(R_p - R_0)^2 / i^2. \quad (2.12)$$

В последнем выражении параметр m рассчитывается в виде:

$$m = \rho \cdot 10^3 \pi (R_p^2 - R_0^2) b \quad (2.13)$$

и представляет собой массу материала в рулоне с удельной плотностью ρ [$\text{кг}/\text{м}^3$], при текущем радиусе R_p , радиусе барабана (на который наматывается материал, R_0) и ширине материала b .

С учетом последнего получим:

$$J = J' + J'' = \frac{\rho \cdot 10^3 \pi b}{2 \cdot i^2} R_p^4 + J_0, \quad (2.14)$$

где

$$J_0 = J' - \rho \cdot 10^3 \pi b R_0^2 / 2i^2. \quad (2.15)$$

Подставив их в (2.10) и (2.11) получим:

$$\left. \begin{aligned} M_{\text{дин1}} &= \left(\frac{\rho \cdot 10^3 \pi b}{2i} R_p^3 + \frac{J_0 i}{R_p} \right) \frac{dv}{dt}, \\ M_{\text{дин2}} &= \left(\frac{\rho \cdot 10^3 \pi b}{2i} R_p^2 v + \frac{J_0 v i}{R_p^2} \right) \frac{dR_p}{dt}. \end{aligned} \right\} \quad (2.16)$$

Связь между радиусом рулона и скоростью перемотки может быть установлена, если записать выражения для изменения объема рулона ΔV_p за время t , в течение которого радиус рулона меняется от $R_{\bar{\sigma}}$ до R_p :

$$\Delta V_p = \pi (R_p^2 - R_{\bar{\sigma}}^2) b. \quad (2.17)$$

С другой стороны, величину объема рулона ΔV_p можно вычислить через длину l_p перемотанной полосы за время t (при известной ее толщине h и ширине b) из следующих зависимостей [3]:

$$\left. \begin{aligned} l_p &= \int_0^t v dt, \\ \Delta V_p &= b h_{\text{var}} \int_0^t v dt. \end{aligned} \right\}, \quad (2.18)$$

где $h_{\text{var}} = h_{\text{const}} \pm \sigma$ – переменная толщина полосы, σ – отклонение толщины.

Из выражений (2.17) и (2.18) текущее значение радиуса рулона определяется из соотношения:

$$R_p = \sqrt{R_{\bar{\sigma}}^2 + \frac{h_{\text{var}}}{\pi} \int_0^t v dt}, \quad (2.19)$$

а его производная находится в виде:

$$\frac{dR_p}{dt} = \frac{h_{\text{var}} v}{2\pi \sqrt{R_{\bar{\sigma}}^2 + \frac{h_{\text{var}}}{\pi} \int_0^t v dt}} = \frac{h_{\text{var}} v}{2\pi R_p}. \quad (2.20)$$

После подстановки (2.19), (2.20) в выражение (2.16) для $M_{дин2}$, получим:

$$M_{дин2} = - \left(\frac{\rho \cdot 10^3 \pi b}{2i} R_p + \frac{J_0 i}{R_p^3} \right) \frac{h_{var}}{2\pi} v^2. \quad (2.21)$$

При размотке, когда знак dR_p/dt будет отрицательным, знак $M_{дин2}$ поменяется на обратный. Выражения (2.14) - (2.21) позволяют при известных параметрах R_0 , h_{var} , J_0 , ρ , b и заданном характере изменения скорости во времени рассчитать зависимости изменения радиуса рулона, момента инерции и динамических моментов от времени.

К системам управления приводами намоточно-размоточных и натяжных механизмов предъявляются такие требования: они должны обеспечивать два режима работы: регулирование частоты вращения двигателя и регулирование натяжение полосы [1]. Первый режим является вспомогательным и не имеет жестких требований к качеству регулирования. Этот режим служит для заправки полосы, её транспортировки без натяжения, ограничения частоты вращения двигателя при обрыве полосы.

В режиме регулирования частоты необходимо обеспечить:

- толчковый режим в обе стороны с заданным темпом изменения и уровнем скорости;
- точность поддержания скорости около 5-10 %;
- время нарастания скорости во время толчка без выхода на токоограничение 0,1 ... 0,2 с.

В режиме регулирования натяжения:

- синхронизация по скорости привода намоточно-размоточных механизмов и привода валков клетки стана;
- диапазон регулирования скорости в режиме поддержания натяжения не более 1:50 (определяется произведением кратности скорости прокатки 10...20 на кратность изменения диаметра рулона 1,5...4,0);
- диапазон регулирования натяжения для разных станов 1:5...1:20, в некоторых случаях 1:50;
- точность поддержания постоянства натяжения в установившемся режиме 3...12%;
- точность поддержания постоянства натяжения в динамическом режиме 3...8%;
- время отработки ступенчатого задания натяжения не более 2 с, перерегулирование не более 10%;

- ограничение превышения скорости барабана при обрыве полосы на максимальной скорости 5%, на заправочной скорости – 15%, с последующей остановкой привода.

Системы управления моталками и разматывателями строятся по одному принципу, поскольку эти механизмы характеризуются близкой кинематической схемой; процессы намотки определяются одинаковыми соотношениями основных величин, и к ним предъявляются качественно одинаковые требования.

В зависимости от замера регулируемой величины известны два способа регулирования натяжения: прямой и косвенный. Первый предполагает наличие САУ натяжения, замкнутой по отклонению, с сигналом обратной связи от измерителя натяжения. Для таких систем регулирования натяжения используется в качестве обратной связи сигнал пропорциональный натяжению, который вычисляется по сигналу с выхода датчиков нагрузки (тордукторов, торсионов) с учетом коррекции силы тяжести полосы, силы тяжести петледержателя и сил инерции. Если же установка датчиков затруднительна, то применяется второй метод – косвенного регулирования – по току, ЭДС двигателя моталки, момента, развиваемому двигателем петледержателя [27]. При использовании этого метода большинство входящих в него параметров определяются расчетным путем, что приводит к существенным погрешностям в определении натяжения. Однако с использованием микропроцессорной техники погрешность значительно уменьшается.

В настоящее время достаточно часто применяемой на производстве САУ натяжения является двухзонная, в которой поток соответствует скорости вращения барабана моталки. Разгон до основной скорости происходит с полным потоком двигателя, соответственно ЭДС изменяется пропорционально скорости вращения; выше основной скорости поток снижается по мере роста скорости вращения при номинальном значении ЭДС. Тем самым в пуско-тормозных режимах обеспечивается более полное использование мощности двигателя моталки.

Применение САУ с зависимым управлением потоком обеспечивает улучшение технико-экономических показателей ЭП моталки: существенно снижает ток якоря в начале намотки рулона; позволяет выбрать двигатель по фактически требуемой максимальной скорости вращения с учетом намотки части рулона за время разгона; позволяет снизить номинальную мощность двигателя и источника питания, если максимальное натяжение полосы требуется обеспечить при скорости прокатки ниже максимальной; уменьшает потребление реактивной энергии.

2.2. Прокатная клеть

Известно, что клеть является основным технологическим оборудованием прокатного стана, осуществляющим деформацию металла за счет вращения валков рабочих клетей. Прокатка может проходить в одном из режимов: нереверсивном (проход металла производится только в одном направлении) или реверсивном (прокатываемый металл проходит между валками несколько раз).

Клети классифицируют по количеству и расположению валков, по режиму работы. По количеству валков клети прокатных станов разделяются на двухвалковые, трехвалковые, четырехвалковые и многовалковые [8]. Приводными являются, как правило, рабочие валки, в которых происходит обжатие металла. Двухвалковые и трехвалковые клети применяются в тех случаях, когда отношение диаметра рабочего валка к его длине $D_B/l_B > 0,4$, что обеспечивает достаточную жесткость валка на изгиб. Такие клети устанавливают на обжимных, заготовочных, сортовых и трубных станах. Трехвалковая клеть имеет один двигатель, двухвалковая клеть может иметь один или два двигателя с индивидуальным или групповым приводом рабочих валков. Четырехвалковые клети, кроме двух рабочих, выполняющие обжатие металла валков, имеют два опорных валка, что позволяет повысить жесткость рабочих валков. Приводными являются рабочие валки при индивидуальном питании через шестеренные клети. В зависимости от мощности привода используют один или два двигателя, соединенных механически на одном валу.

Групповой электропривод клети состоит из двигателя 1, муфт 2, шестереночной клети 3, шпинделей 4, нажимного устройства, двух рабочих валков 5 (рисунок 2.2).

Нажимное устройство (нажимные винты) предназначены для перемещения верхнего рабочего валка в вертикальном направлении для обеспечения необходимой величины обжатия металла. Шестереночная клеть предназначена для передачи от одного двигателя вращения двум или трем валкам. Она представляет собой зубчатую передачу, которая состоит из двух или трех шестерней одинакового диаметра, размещенных в закрытой коробке. Шпиндели служат для передачи вращения валкам от шестереночной клети. Каждый такой шпиндель имеет на своих концах шарниры. Муфты выполняются для соединения двигателя и шестереночной клети.

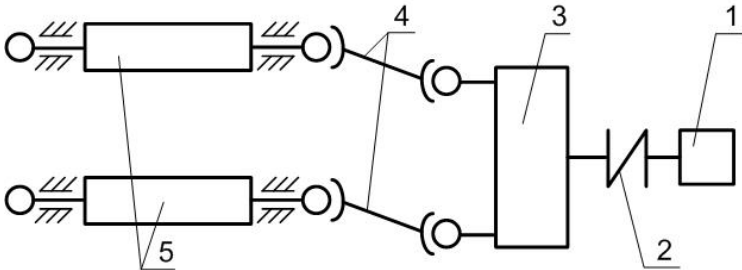


Рисунок 2.2 – Кинематическая схема электропривода клетки прокатного стана

Рассмотрим процесс простой прокатки [1], который приведен на рисунке 2.3), где $b_1, b_2; h_1, h_2; l_1, l_2, v_1, v_2, F_1, F_2$ – ширина, толщина, длина полосы, линейная скорость движения, сила натяжения до и после прокатки в клетке; ω_d – угловая скорость валков клетки.

Простой прокатке присущи такие допущения:

- металл однородный;
- валки имеют одинаковый диаметр и одинаковую окружную скорость;
- металл деформируется каждым валком одинаково.

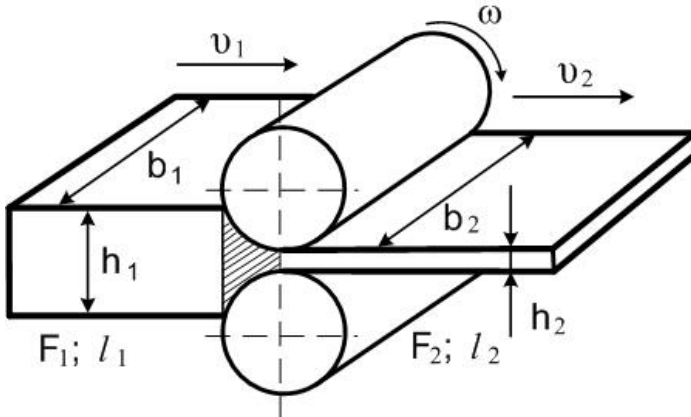


Рисунок 2.3 – Простая прокатка металла в клетке

Прокатка металла может выполняться в несколько пропусков, то есть несколько однократных проходов металла через валки при их вращении. В процессе прокатки осуществляется удлинение заготовки за счет обжатия металла валками и соответственного уменьшения его

поперечного сечения из-за того, что ширина металла в результате прокатки увеличивается незначительно. Абсолютное значение удлинения:

$$\Delta l = l_2 - l_1, \quad (2.22)$$

а также коэффициентом вытяжки, который представляется отношением длины металла после прокатки к длине металла до прокатки.

Расширение металла при холодной прокатке незначительно, поэтому им можно пренебречь [13]. Тогда будем иметь такое выражение:

$$\lambda = l_2/l_1 = F_1/F_2 = h_1/h_2. \quad (2.23)$$

Для определения нагрузки прокатного двигателя необходимо знать энергию, которая идет на изменение формы заготовки, т. е. определить усилия давления или момент прокатки, создаваемые в процессе обработки металла. Существуют два способа определения момента прокатки: аналитический по эмпирическим формулам и с использованием кривых удельного расхода энергии на тонну проката [23].

Воспользуемся аналитическим методом, согласно которому момент на валу двигателя клетки равен:

$$M = M_{np} + M_{тр} + M_{нх} + M_{дин}, \quad (2.24)$$

где M_{np} – момент прокатки, который необходим для выполнения работы деформации металла и преодоления сил трения между металлом и валками в зоне деформации;

$M_{тр}$ – момент добавочных сил трения в подшипниках валков и передаточных механизмах (редуктор, шестереночная клеть, шпиндели) при прокатке металла без учета сил трения, которые действуют при нерабочем ходе клетки;

$M_{нх}$ – момент нерабочего хода, то есть сил трения, которые возникают в подшипниках валков и передаточных механизмах (редуктор, шестереночная клеть, шпиндели) при отсутствии прокатки в клетке – свободная прокатка;

$M_{дин}$ – динамический момент, необходимый для преодоления сил инерции в переходных электромеханических процессах при изменении скорости.

Рассмотрим отдельно сами клетки прокатного стана. Оставаясь в рамках линейной теории, будем полагать, что момент сопротивления

состоит как минимум из двух составляющих: момента трения M_{mp} и момента прокатки M_{np} , которые пропорциональны скорости вращения валков клетки, а последний – еще и зависит от коэффициента пропорциональности силы нажима F_N со стороны нажимных винтов.

При принятых допущениях для данных моментов можно записать следующие уравнения [26]:

$$\left. \begin{aligned} M_{mp} &= K_{MT} K_h \omega; \\ M_{np} &= K_{МП} \omega F_N. \end{aligned} \right\}, \quad (2.25)$$

где K_{MT} , $K_{МП}$ – коэффициенты пропорциональности трения и прокатки соответственно;

K_h – коэффициент варьируемой толщины полосы, $K_h = h_{var} / h$.

Как уже указывалось, одна из основных операций стану холодной прокатки производится с помощью вращающихся валков, расположенных в рабочей клетки. Поэтому при проектировании и модернизации главных электроприводов клеток станов важно учитывать предъявляемые к ним требования [1]. А именно:

- плавный пуск и торможение за минимальное время;
- плавная регулировка скорости от заправочной 0,5 ... 1 м/с до максимальной рабочей 30 м / с в диапазоне 30:1 ... 50:1;
- рекуперативное торможения с помощью реверсивной группы вентилях (50% мощности);
- согласование скоростей прокатки между клетями и намоточными устройствами с точностью до 1%;
- обеспечение необходимых величин натяжения полосы во всех режимах работы стана с точностью 3 ... 5%;
- возможность совместного и раздельного управления двигателями клеток и моталок;
- возможность изменения скоростей двигателей каждой клетки при сохранении неизменным заданных темпов ускорения и замедления;
- создание натяжения покоя;
- возможность толчковой работы;
- возможность изменения степени жесткости механических характеристик двигателей главного привода;
- автоматическое замедление стана при подходе сварных швов при окончании прокатки;
- аварийное торможение при обрыве полосы.

Математическая модель прокатной клетки как объекта многосвязного регулирования должна описывать связь основных

управляющих и возмущающих воздействий с регулируемыми и измеряемыми параметрами [17]. Существует достаточно много моделей, которые описывают совокупность параметров, воздействующих на прокатную клетку, однако при представлении модели клетки как многомерного и взаимосвязанного объекта необходимо учитывать такие параметры, как натяжение покатываемой полосы, скорость прокатки. Через эти параметры клетка связана как с последующими, так и с предыдущими механизмами: клетками и моталками. Взаимосвязи через переднее натяжение и толщину полосы влияют же переменные во всех последующих межклетевых промежутках, а скорость входа полосы, определяющая совместно со скоростью предыдущей клетки заднее натяжение, передает влияние управляющих воздействий данной клетки в предыдущие межклетевые промежутки. К каждой клетке, кроме того, могут быть приложены контролируемые и неконтролируемые возмущения – к первым из них относятся колебания входной толщины и заднего натяжения полосы, ко вторым – изменение коэффициента трения в валковом зазоре, механических свойств полосы и прочие [28]. На основании моделей разрабатываются системы автоматического регулирования натяжения, которые позволяют стабилизировать процесс прокатки и улучшить качество продукции. На действующих СХП локальные САУ выполнены преимущественно в виде систем с обратной связью, воздействующих на управляющие переменные одной или нескольких клеток в функции отклонения регулируемой величины. Наличие прямых и обратных связей между отдельными клетками отрицательно сказываются на работе таких систем вследствие взаимовлияния отдельных контуров регулирования. Исключение этих взаимосвязей требует введения сложных перекрестных связей между отдельными регуляторами.

Анализ динамики систем регулирования относительно скорости электродвигателя [19], при применении П-регулятора скорости показал, что САУ ведет себя устойчиво только при невысоких значениях коэффициента усиления регулятора, при которых ЭП валков клетки не обеспечивает требуемой статической точности поддержания скорости валков, необходимой для нормальной работы СХП [7].

Требования, предъявляемые к САУ ЭП клетки СХП [3]:

- точное рассогласование скоростей прокатки между клетками и намоточными устройствами в полном соответствии с величиной фактической вытяжки при всех режимах работы стана;

- обеспечение технологически необходимых величин натяжения полосы между клетками и моталкой как при установившемся режиме прокатки, так и при ускорениях и замедлениях стана, а также во время остановки.

- регулирование скорости от заправочной до максимальной рабочей при двухзонном управлении должно быть плавное и изменяться в широких пределах;
- возможность осуществления раздельного и одновременного регулирования скорости вращения двигателей клеток стана при наличии и в отсутствии металла в клетях стана.

2.3. Правильная машина

Правильные машины предназначены для придания прокату ровной и гладкой поверхности (для листов) или правильной геометрической формы по длине (для сортовых профилей). В соответствии с этим правильные машины разделяют на две группы: листоправильные и сортоправильные.

Наибольшее распространение для правки листов в ЦХП получили многороликовые листоправильные машины с параллельным (рисунок 2.4) или наклонным (рисунок 2.5) расположением роликов. На первом правят толстые (свыше 12 мм) листы, а на втором – тонкие.

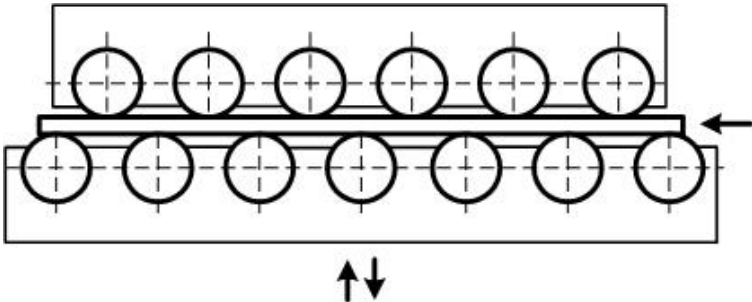


Рисунок 2.4 – Листоправильная машина с параллельным расположением роликов

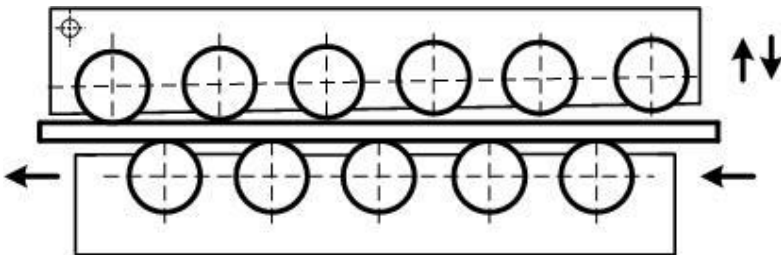


Рисунок 2.5 – Листоправильная машина с наклонным расположением роликов

Если ролики расположены параллельно, то лист одинаково прогибается на всем пути своего движения; если наклонно, то наибольший изгиб имеет место под первыми роликами; по мере продвижения листа прогиб его уменьшается, а у последних роликов кривизна полностью устраняется, что является преимуществом машин с наклонным расположением роликов.

Основные параметры многороликовых листопрямительных машин: шаг роликов, диаметр, длина бочки роликов и толщина листов, подвергаемых правке на данной машине. Шаг роликов определяет качество правки и величину давления на ролики правильной машины. Точность правки повышается с уменьшением шага роликов. Однако при этом одновременно повышается давление на ролики, что заставляет усложнять конструкцию машины. Скорость правки выбирается в зависимости от требуемой производительности машин и линии в целом.

Электропривод роликов правильных машин работает в длительном режиме с постоянной нагрузкой. Темп подачи металла в правильную машину обычно весьма высок, и паузы в работе главного привода незначительны. Режим работы правильных машин нереверсивный, однако, в схемах управления электроприводом роликов предусматривается возможность реверса, что необходимо при ревизиях машин или при ликвидации аварий.

Большинство роликовых правильных машин требует регулирования скорости правки с целью получения оптимального режима для различных сортов и сечений прокатываемого металла. Диапазон регулирования определяется в каждом отдельном случае конкретными условиями работы правильной машины.

Для главного ЭП правильных машин, как правило, используются электродвигатели постоянного тока независимого возбуждения с диапазоном регулирования скорости в пределах до 3:1 за счет ослабления магнитного потока.

Если принять, что правильная машина представляет собой аналогичный клетки механизм с верхними и нижними валками без нажимных винтов, то математическое описание правильной машины примет вид [5]:

$$M = M_{np} + M_{mp} + M_{nx} + M_{дин}, \quad (2.26)$$

где M_{np} – момент правки, который необходим для выполнения работы деформации металла и преодоления сил трения между металлом и валками правильной машины в зоне деформации;

$M_{тр}$ – момент добавочных сил трения в подшипниках валков и передаточных механизмах (редуктор, шестереночная клеть, шпиндели) при правке металла без учета сил трения, которые действуют при нерабочем ходе правильной машины;

$M_{нх}$ – момент нерабочего хода, то есть сил трения, которые возникают в подшипниках валков и передаточных механизмах (редуктор, шестереночная клеть, шпиндели) при отсутствии правки в правильной машине;

$M_{дин}$ – динамический момент, необходимый для преодоления сил инерции в переходных электромеханических процессах.

2.4. Приводные двигатели постоянного тока механизмов прокатного производства

Технологические требования по глубине и плавности регулирования скорости, а также по качеству регулирования натяжения обуславливают достаточно широкое применение в прокатном производстве двигателей постоянного тока для ЭП клетей, моталок и разматывателей СХП.

Режим работы двигателя моталки циклический (разгон, работа на пониженной скорости, работа при прокатке на установившейся скорости, торможение, пауза), однако длительность пауз и переходных режимов относительно невелика, поэтому расчет двигателя необходимо производить на длительный установившийся режим. Основными параметрами такого установившегося режима являются натяжение полосы и скорость прокатки. Ток якоря двигателя моталки в общем случае меняется в процессе намотки в функции радиуса и скорости прокатки в зависимости от применяемой САУ натяжения. Уменьшение времени разгона и торможения прокатного стана способствует росту его производительности и, что особенно существенно, повышает выход годного металла. Если увеличить темп разгона стана невозможно или нецелесообразно по другим соображениям, то при менее динамичном приводе моталки уменьшается погрешность регулирования натяжения полосы в переходных режимах [25].

Наиболее сложные требования к электрическим машинам постоянного тока предъявляются в электроприводах крупных прокатных станов, где используются машины, наибольшие по мощности.

При расчете и проектировании главных приводов реверсивных станов следует знать перегрузочную способность прокатного двигателя при разной скорости вращения, т. е. иметь в своем распоряжении так называемые эксплуатационные характеристики двигателя. Последние

определяют собой зависимость максимально допустимых значений мощности, тока и момента двигателя от скорости вращения.

Для привода рабочих валков СХП применяются двигатели постоянного тока с невысокой номинальной скоростью вращения ($40 \div 70$ об / мин).

Небольшое значение частоты вращения прокатных двигателей СХП старого выпуска (50 об/мин) привело к ограничению производительности станов. Указанное объясняется тем, что из-за наличия низкой угловой скорости возникает необходимость в ослабление потока двигателя уже в первых пропусках, что приводит к увеличению его тока при заданных величинах нагрузочного момента, т. е. к перегреву двигателя.

Существует точка зрения [13], которая основывается на том, что интенсификация режима работы обжимного стана должна быть получена не за счет увеличения скорости прокатки, а за счет применения повышенных обжатиий и сокращения тем самым количества пропусков. Увеличение же обжатиий вызывает применение двигателей с повышенным номинальным моментом, что может быть осуществлено путем увеличения мощности двигателей или при сохранении прежней мощности путем снижения величины номинальной скорости вращения.

В последних пропусках, когда длина металла уже становится значительной, с целью уменьшения времени прокатки необходимо повышать скорость прокатки, что производится путем ослабления поля двигателя. Прокатка металла с ослабленным полем осуществляется при сниженных значениях момента, так как перегрузочная способность двигателя уменьшается с увеличением скорости и обратно пропорциональна ослаблению поля. Необходимая степень ослабления поля двигателя обычно не превышает 0,5 от номинального.

Двигатель с независимым возбуждением представляет собой наиболее распространенный тип двигателя постоянного тока. При рассмотрении его математического описания будем считать, что размагничивающее действие реакции якоря скомпенсировано, а индуктивность якорной цепи постоянна.

Нормальная схема включения ДПТ независимого возбуждения (НВ) представлена на рисунке 2.6, где приняты такие обозначения: I_A , I_B – токи в цепях обмоток якоря и возбуждения (А); E_A – ЭДС якоря (В); ω и M – угловая скорость (рад/с) и момент (Н·м) двигателя.

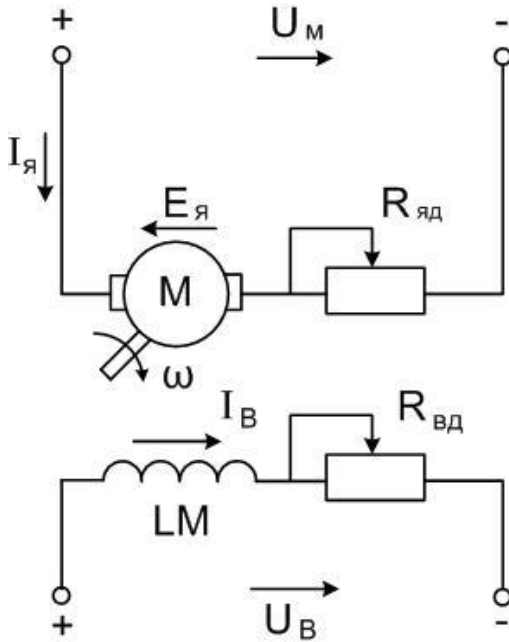


Рисунок 2.6 – Нормальная схема включения ДПТ НВ

При установившемся движении приложенное к двигателю напряжение сети уравнивается падением напряжения якорной цепи $I_{я} \cdot R_{я}$ и наведенной в якоре ЭДС $E_{я}$, уравнение равновесия напряжения, записанное для якорной цепи будет иметь вид:

$$U_{м} = I_{я} \cdot R_{я} + E_{я}, \quad (2.27)$$

где $R_{я} = R_{яв} + R_{яд}$ - суммарное активное сопротивление якорной цепи, которое состоит из внутреннего сопротивления якоря $R_{яв}$ и сопротивления добавочного резистора $R_{яд}$ для регулирования тока якоря $I_{я}$.

В состав $R_{яв}$ входит сопротивление обмотки якоря, сопротивление обмотки добавочных полюсов и сопротивление компенсационной обмотки (если эти обмотки ДПТ имеет).

Наведенная в якоре двигателя ЭДС, как известно, определяется по формуле:

$$E_{я} = C_m \cdot \Phi \cdot \omega, \quad (2.28)$$

где $C_m = \frac{p \cdot N}{2 \cdot \pi \cdot a}$ - конструктивная электромашинная постоянная двигателя (p - число пар полюсов, N - число активных проводников обмотки якоря, a - число пар параллельных веток (обмотки якоря) поданная в системе единиц СИ, а в практической системе электромашинная постоянная двигателя $C_e = \frac{p \cdot N}{60 \cdot a}$; между C_m и C_e связь такая же как и между ω и n - угловой скоростью и частотой вращения, а именно:

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi}{60} n, \quad (2.29)$$

где Φ - магнитный поток двигателя, если двигатель скомпенсированный и реакция якоря не проявляется, то это основной поток, поток созданный током возбуждения – МДС обмотки возбуждения.

Так как для ДПТ с независимым возбуждением $\Phi = const$, то из выражения $M = C_m \cdot \Phi \cdot I_{я}$ видно, что $M = \kappa \cdot I_{я}$, то есть $M \equiv I_{я}$.

Способы регулирования скорости путем влияния на электродвигатель можно разделить на две основные группы:

- способы, которые обеспечивают регулирование скорости электродвигателя за счет изменения или регулирования параметров питающей сети двигателя, а именно, напряжение сети и частота сети;
- способы, которые обеспечивают регулирование скорости электродвигателя за счет изменения параметров непосредственно электродвигателя (активного или индуктивного сопротивления обмоток двигателя, числа витков обмоток, числа пар полюсов и так далее);

Для рассматриваемых электродвигателей в соответствии с их электромеханической характеристикой

$$\omega = \frac{U_m - I_{я} R_{я}}{C_m \Phi}. \quad (2.30)$$

Возможны три способа регулирования скорости:

- путем изменения величины напряжения питающей сети (U_m);
- путем изменения сопротивления якорной цепи ($R_{я}$);
- путем изменения величины основного магнитного потока двигателя (Φ).

Изменение магнитного потока используется преимущественно для регулирования скорости. Этот способ находит широкое применение в ЭП вследствие простоты его реализации и экономичности, так как регулирование осуществляется в относительно маломощной цепи возбуждения двигателя и не сопровождается большими потерями мощности.

Регулирование магнитного потока с использованием этого способа осуществляется только в сторону его уменьшения (ослабления) по сравнению с номинальным. Увеличение магнитного потока должно вызываться увеличением тока возбуждения, но так как номинальный магнитный поток создается номинальным током возбуждения, то увеличение тока возбуждения выше номинального вызывает дополнительный недопустимый нагрев двигателя. Двигатель рассчитан и построен таким образом, что его магнитная система близка к насыщению ещё при работе двигателя в режиме нерабочего хода. То есть рабочая точка двигателя расположена на кривой намагничивания в рамках насыщения, поэтому последующее увеличение тока возбуждения не может вызвать увеличение магнитного потока.

Магнитный поток может быть измерен при помощи датчиков Холла, но в большинстве случаев он задается кривой намагничивания двигателя.

2.5. Взаимосвязь исполнительного механизма и двигателя через длинный вал

Как правило, при рассмотрении динамических нагрузок механические связи между движущимися массами системы предполагались абсолютно жесткими. Известно, что представление механической части электропривода приведенным звеном отражает действительный характер движения масс в системе только в среднем, так как не учитывает влияния упругости реальных механических связей. Из-за конечной жесткости этих связей механическая часть электропривода представляет собой упругую систему, приложение к которой управляющего (момент двигателя) или возмущающих (нагрузки) воздействий вызывает колебания связанных масс, увеличивающие максимальные нагрузки связей и осложняющие точность отработки требуемых траекторий движения рабочего органа машины [4, 19].

Возможность пренебрежения явлением упругости часто связано с тем, что собственная частота упругих колебаний системы двигатель – исполнительный механизм (Д – ИМ) оказывается значительно большей частот, существующих автоматических систем управления электроприводами. Однако повышенное быстродействие автоматической системы, обусловленное применением тиристорных преобразователей и

высококачественных элементов системы регулирования, часто не удается реализовать из-за влияния упругих механических связей.

Рассмотрим систему Д – ИМ, в которой сосредоточенные вращающиеся массы двигателя и механизма связаны между собой через редуктор и длинный вал. Двухмассовые электромеханические системы, в которых упругим звеном является кинематическая передача, связывающая двигатель с исполнительным органом, принято называть системами с упругостями первого рода. При анализе таких систем пользуются следующими допущениями [4]:

- элементы массы, к которым приложены действующие в системе силы и моменты, остаются не деформированными;
- массой упругих звеньев можно пренебречь или отнести к приведенным массам;
- коэффициент пропорциональности между моментом (силой) и деформацией остается постоянным, т.е. упругое звено обладает постоянной жесткостью;
- деформация упругих звеньев происходит в соответствии с законом Гука и является линейной;
- волновыми процессами при деформации можно пренебречь.

С учетом сказанного выше, при оценке динамических свойств прокатного стана как объекта управления применим математический аппарат теории автоматического управления с соответствующими передаточными функциями и частотными характеристиками.

При рассмотрении двухмассовой системы электропривода клетки (рисунки 2.7 и 2.8) двигатель MI приводит во вращение валки клетки; ω_{d1} – угловая скорость двигателя MI ; J_{d1} – момент инерции двигателя и редуктора, J_{kl} – приведенный момент инерции валков прокатной клетки; M_{f1} , M_{f3} – моменты внешнего трения; C_1 – жесткость упругого соединения – длинный вал; b_1 – коэффициент внутреннего демпфирования, пропорциональный рассогласованию угловых скоростей двух смежных масс; M_{13} – упругий момент; ω_{d1} , ω_{13} – угловые скорости торцов шпинделя; φ_1 и φ_3 – углы поворота длинного вала.

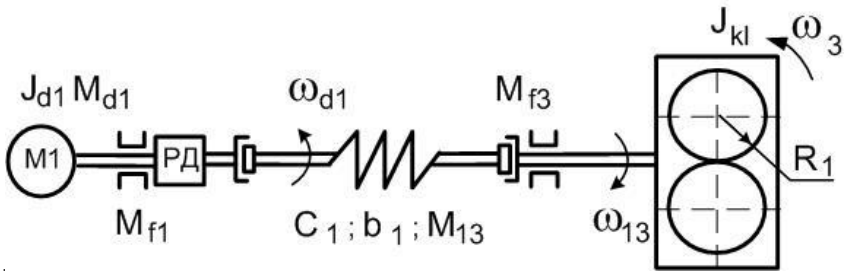


Рисунок 2.7 – Двухмассовая электромеханическая система прокатного механизма с упругостями первого рода

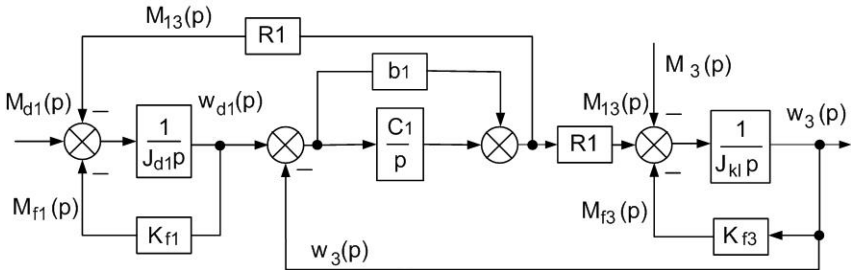


Рисунок 2.8 – Структурная схема механической части одной клетки в виде двухмассовой электромеханической системы с упругостями первого рода

В рассматриваемом случае жесткость вала [26]:

$$C_1 = \frac{c'_B \cdot c'_{ред}}{c'_B + c'_{ред}}, \quad (2.31)$$

где c'_B – жесткость вала; $c'_{ред}$ – жесткость редуктора и муфт.

Моменты внешнего вязкого трения двигателя и клетки:

$$\begin{cases} M_{f1}(p) = k_{f1} \cdot \omega_1(p); \\ M_{f3}(p) = k_{f3} \cdot \omega_3(p), \end{cases} \quad (2.32)$$

где k_{f1} , k_{f3} – коэффициенты вязкого трения.

Запишем уравнения в операторной форме (штрихами обозначим величины, не приведенные к валу двигателя). Приведение должно быть произведено в соответствии с выражениями:

$$M(p) = \frac{M'(p)}{i}; \quad \omega_3 = i \cdot \omega'_3(p); \quad J_{kl} = \frac{J'_{kl}}{i^2};$$

$$k_{f3} = \frac{k'_{f3}}{i^2}; \quad C_1 = \frac{C'_1}{i^2}; \quad b_1 = \frac{b'_1}{i^2}.$$

Тогда система дифференциальных уравнений преобразуется к виду

$$\left. \begin{aligned} M_{d1}(p) - \frac{1}{i} \{M'_{13}(p) - b'_1 [\omega_{d1}(p) - \omega'_3(p)]\} - \\ - k_{f1} \omega_{d1}(p) = J_{d1} p \omega_{d1}(p); \\ M'_{13}(p) + M'_3(p) - b'_1 [\omega_{d1}(p) - \omega'_3(p)] - k'_{f3} \omega'_3(p) = J'_{kl} p \omega'_3(p); \\ M'_{13}(p) = \frac{C_1}{p} [\omega_{d1}(p) - \omega'_3(p)]; \\ \varphi_1(p) = \frac{\omega_{d1}(p)}{p}; \\ \varphi_3(p) = \frac{\omega'_3(p)}{p}. \end{aligned} \right\} \quad (2.33)$$

После приведения названных величин к валу двигателя с учетом коэффициента передачи редуктора получим:

$$\left. \begin{aligned} J_{d1} p \omega_1(p) = M_{d1}(p) - M_{13}(p) - \\ - b_1 [\omega_{d1}(p) - \omega_3(p)] - k_{f1} \omega_{d1}(p); \\ J_{kl} p \omega_3(p) = M_3(p) + M_{13}(p) + \\ + b_1 [\omega_{d1}(p) - \omega_3(p)] - k_{f3} \omega_3(p); \\ M_{13}(p) = \frac{C_1}{p} [\omega_{d1}(p) - \omega_3(p)]; \\ \varphi_1(p) = \frac{\omega_{d1}(p)}{p}; \quad \varphi_3(p) = \frac{\omega_3(p)}{p}. \end{aligned} \right\} \quad (2.34)$$

2.6. Математическое описание состояния металлической полосы в межклетевом промежутке

Рассмотрим промежуток металла между соседними агрегатами (рисунок 2.9), где, v_{kl2} – линейные скорости движения материала через валки первой и второй клеток; l – расстояние между осями смежных клеток; C_p – жесткость упругого соединения (транспортируемый материал); F_C - сила натяжения полосы.

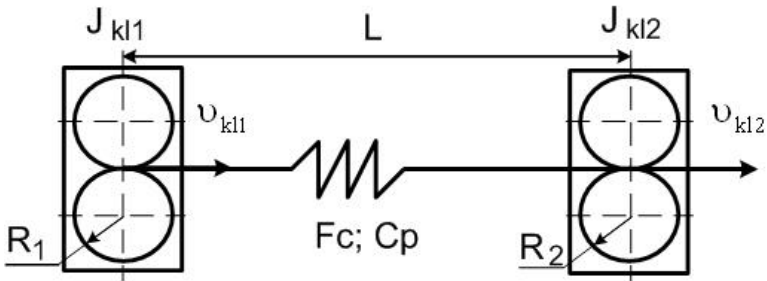


Рисунок 2.9 - Двухмассовая электромеханическая система прокатного механизма с упругостями второго рода

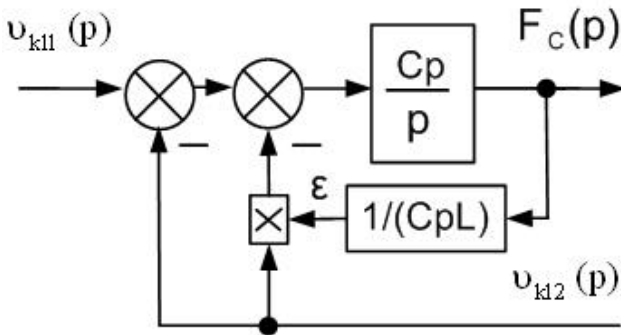


Рисунок 2.10 - Структурная схема упругого соединения второго рода представленного прокатываемой полосой металла

Согласно рисункам 2.3, 2.9 и 2.10, а также формулам (2.22), (2.23) деформация материала на участке растяжения длиной l описывается дифференциальным уравнением [3]:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{v_{kl1}}{l} - (1 + \varepsilon) \frac{v_{kl2}}{l}, \quad (2.35)$$

где ε – относительное удлинение; v_1 и v_2 – линейные скорости материала на выходе из первого и второго агрегата по ходу прокатки.

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} \quad (2.36)$$

Натяжение, возникающее в материале, связано с абсолютным значением растяжения Δl соотношением:

$$F_C = C_p \Delta l = C_p l \varepsilon. \quad (2.37)$$

Подставив в (2.32) значение ε из (2.30), получим в операторной форме уравнения, характеризующие рассматриваемую систему [13, 19]:

$$\left. \begin{aligned} F_C(p) &= \frac{C_p}{p} \{v_{kl1}(p) - [1 + \varepsilon(p)]v_{kl2}(p)\}; \\ \varepsilon(p) &= \frac{1}{C_p l} F_C(p); \\ v_{kl1}(p) &= R_1 \omega_1(p); \quad v_{kl2}(p) = R_2 \omega_2(p), \end{aligned} \right\} \quad (2.38)$$

где R_1 , R_2 и ω_1 , ω_2 – соответственно радиусы и угловые скорости первой и второй клетей.

Используя (2.30), математическое описание состояния металла между клетью и намоточно-размоточным механизмом было дополнено способностью реверсирования

$$F'_C = \begin{cases} \frac{C_p}{p} \{v_{kl1}(p) - (1 + \varepsilon(p))v_{kl2}(p)\}, & \text{при } v_{kl1} - v_{kl2} > 0 \text{ – намотка;} \\ \frac{C_p}{p} \{v_{kl2}(p) - (1 + \varepsilon(p))v_{kl1}(p)\}, & \text{при } v_{kl1} - v_{kl2} < 0 \text{ – размотка;} \\ 0, & \text{при } v_{kl1} - v_{kl2} = 0 \text{ – отсутствие натяжения} \\ & \text{при технологической паузе} \end{cases} \quad (2.39)$$

В процессе прокатки полоса по всей длине имеет различную толщину, которая, тем не менее, входит в пределы допусков по отклонению. Изменение значения h влияет на натяжение полосы F_C , а также на её упругие свойства. Разнотолщинность также следует учитывать при вычислении текущего значения радиуса рулона (2.19), массы (2.13), момента инерции рулона (2.12).

Известное математическое описание упругостей второго рода [4] дополним учетом переменной толщины полосы, а также следующим условием, при котором имитируется эффект обрыва полосы, то есть, когда текущее значение силы натяжения в полосе F_C достигает критического F'_{Cmax} , происходит обрыв полосы металла, а в математическом описании выходное значение силы натяжения F'_C обнуляется:

$$F'_C = \begin{cases} F_C, & \text{при } F_C < F'_{Cmax}; \\ 0, & \text{при } F_C \geq F'_{Cmax}, \end{cases} \quad (2.40)$$

$$F'_{Cmax} = K_r \cdot F_{Crab}, \quad (2.41)$$

где K_r – коэффициент предела прочности материала (в модели принято $K_r=1,5$); F_{Crab} – сила натяжения металла при рабочих режимах прокатки.

Величины K_r , F_{Crab} определяются с учетом физико-механических свойств материала и геометрических размеров прокатываемой полосы.

По условиям технологии обработка металла в холодном состоянии относится к прокатке тонкого листа (толщиной менее 1 мм). Такой тонкий лист не может быть получен при горячей прокатке из-за образования на поверхности металла окалины, толщина которой соизмерима с малой толщиной листа. Практика показывает, что в процессе прокатки в холодном состоянии металл становится жестким и его сопротивление деформации увеличивается. Одновременно он становится хрупким, т.е. металл в процессе холодной прокатки теряет пластические свойства.

Кривая на диаграмме растяжения [3, 29] (рисунок 2.11) условно может быть разделена на следующие четыре зоны.

Зона ОА носит, название зоны упругости (предел пропорциональности). Здесь материал подчиняется закону Гука. Величина силы, для которой остаётся справедливым закон Гука, зависит от геометрических размеров и физических свойств материала.

Величина предела пропорциональности зависит от той степени точности, с которой начальный участок диаграммы можно рассматривать как прямую.

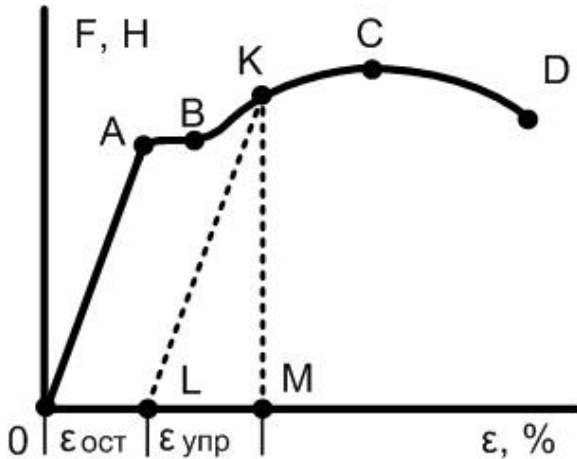


Рисунок 2.11 – Диаграмма растяжения прокатываемой полосы

Степень отклонения кривой $F = f(\varepsilon)$ от прямой $F = E\varepsilon$ определяют по величине угла, который составляет касательная к диаграмме с осью F , где E – модуль Юнга. В пределах закона Гука этот угол определяется величиной $\frac{1}{E}$. Обычно считают, что если величина $\frac{d\varepsilon}{dF}$ оказалась на 50% больше $\frac{1}{E}$, то предел пропорциональности достигнут.

Для того чтобы найти предел пропорциональности [29] (точка А, рисунок 2.11), необходимо, после каждой дополнительной нагрузки испытуемый образец полосы разгружать и следить, не образовалась ли остаточная деформация. Так как пластические деформации в отдельных кристаллах появляются уже в самой ранней стадии нагружения, ясно, что величина предела упругости, как и предела пропорциональности, зависит от требований точности, которые накладываются на производимые замеры. Обычно остаточную деформацию, соответствующую пределу упругости, принимают в пределах $\varepsilon_{ост} = (1-5) \cdot 10^{-5}$, то есть 0,001–0,005 %. Соответственно этому допуску предел упругости обозначается через $\sigma_{0,001}$, или $\sigma_{0,005}$.

Нужно сказать, что предел упругости и предел пропорциональности трудно поддаются определению и резко меняют

свою величину в зависимости от условно принятой нормы на угол наклона касательной и на остаточную деформацию.

Зона АВ называется зоной общей текучести, а участок АВ диаграммы – площадкой текучести. Здесь происходит существенное изменение длины образца без заметного увеличения нагрузки. Следующей, более определенной характеристикой является предел текучести. Под пределом текучести понимается то напряжение, при котором происходит рост деформации без заметного увеличения нагрузки. В тех случаях, когда на диаграмме отсутствует явно выраженная площадка текучести, за предел текучести принимается условно величина напряжения, при котором остаточная деформация $\varepsilon_{ocm} = 0,002$ или $0,2\%$ (рисунок 2.11). В некоторых случаях устанавливается предел $\varepsilon_{ocm} = 0,5\%$. Условный предел текучести обозначается через $\sigma_{0,2}$, и $\sigma_{0,5}$ в зависимости от принятой величины допуска на остаточную деформацию. Зона ВС называется зоной упрочнения. Здесь удлинение образца сопровождается возрастанием нагрузки, но неизмеримо более медленным, чем на упругом участке. Точка С – это отношение максимальной силы, которую способен выдержать образец, к его начальной площади поперечного сечения носит название предела прочности, или временного сопротивления. Участок кривой CD называется зоной местной текучести. Точка D соответствует разрушению образца. Если испытуемый образец, не доводя до разрушения, разгрузить (точка К, рисунок 2.11), то в процессе разгрузки зависимость между силой F и удлинением ε изобразится прямой KL. Опыт показывает, что эта прямая параллельна прямой OA. При разгрузке удлинение полностью не исчезает. Оно уменьшается на величину упругой части удлинения ε_{yup} (отрезок LM). Отрезок OL представляет собой остаточное удлинение ε_{ocm} . Его называют также пластическим удлинением, а соответствующую ему деформацию – пластической деформацией. Таким образом:

$$\varepsilon = \varepsilon_{yup} + \varepsilon_{ocm} \quad (2.42)$$

Если полоса была нагружена в пределах участка OA и затем разгружена, то удлинение будет чисто упругим, и $\varepsilon_{ocm} = 0$. При повторном нагружении полосы диаграмма растяжения принимает вид прямой LK и далее - кривой KCD (рисунок 2.11) так, как будто промежуточной разгрузки и не было. Отрезок МК соответствует силе предварительного нагружения [23]. Таким образом, вид диаграммы для одного и того же материала зависит от степени начального нагружения

(вытяжки), а само нагружение выступает теперь уже в роли некоторой предварительной технологической операции. Весьма существенным является то, что отрезок ЛК оказывается больше отрезка ОА. Следовательно, в результате предварительной вытяжки материал приобретает способность воспринимать без остаточных деформаций большие нагрузки. Отношение максимальной силы, которую способен выдержать образец, к его начальной площади поперечного сечения носит название предела прочности, или временного сопротивления, и обозначается через $\sigma_{\text{ср}}$ (на сжатие – $\sigma_{\text{сс}}$). Явление повышения упругих свойств материала в результате предварительного пластического деформирования носит название наклепа, или нагартовки. При испытании на растяжение определяется еще одна характеристика материала. Это – так называемое удлинение при разрыве δ %.

2.7. Математическое описание процесса прокатки с петлеобразованием

Конструкции петлевых ям встречаются разнообразные [23], в частном случае её условно можно представить как петлю, которая образовывается под воздействием силы тяжести в зависимости от соотношения скоростей v_1 и v_2 двух соседних агрегатов (рисунок 2.12), изменения длины и массы самой петли, что показано в выражениях (2.43 – 2.46). Однако на практике встречаются и другие конструкции петлевых ям, более сложные с точки зрения взаимосвязи сил, передающихся через металл, с дополнительными натяжными механизмами. Данное математическое описание может быть дополнено при условии изменения конструкции [30]. При этом, не смотря на простоту рассматриваемого случая петлевой ямы, системы управления всех механизмов в данной электромеханической системе ощущают значительное воздействие составляющей силы тяжести петли из-за непостоянства массы.

В нашем случае при выборе представления петли в петлевой яме принято, что она состоит из дуги и двух прямых. Тогда длина петли и дуги вычисляются согласно выражениям:

$$l_{\text{петли}} = l_{\text{дуги}} + 2h_x, \quad (2.43)$$

$$l_{\text{дуги}} = \pi \frac{l_2}{2} \quad (2.44)$$

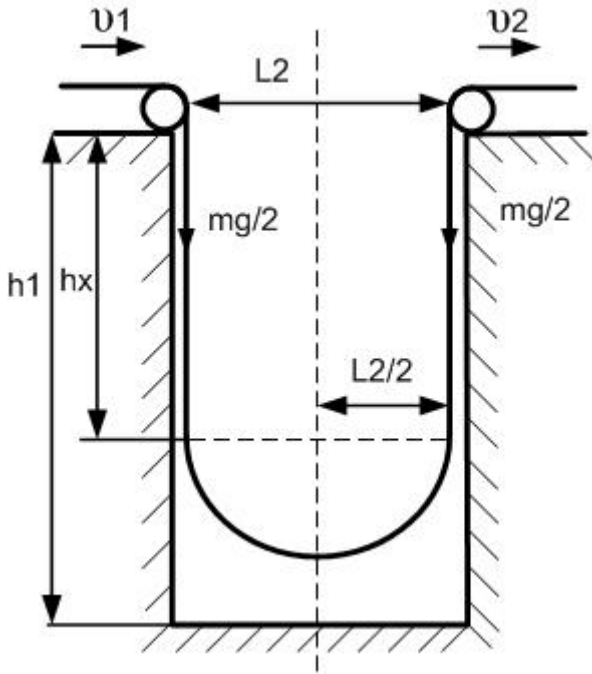


Рисунок 2.12 – Кинематическая схема петлевой ямы

Для определения величины возмущающего воздействия, создаваемого варьированием величины петли, определяется сила тяжести и масса петли:

$$F_{петли} = m_{петли}g ; \quad (2.45)$$

$$m_{петли} = \rho V_{петли}, \quad (2.46)$$

где b – ширина прокатываемой полосы, h – толщина полосы, $V_{петли}$ – объем петли $V_{петли} = l_{петли}bh$.

Силами трения в опорных роликах пренебрегаем или учитываем их как пропорциональные линейным скоростям и силам, действующим на них со стороны массы металла. Учитывая вес металла условно силы переднего и заднего натяжения в последующем и предыдущем механизмах пропорциональны величине петли.

2.8. Математическое описание четырехмассовых моделей взаимосвязанных механизмов прокатных станов

Во взаимосвязанном электроприводе двух соседних клеток (кинематическая и структурная схемы на рисунках 2.13 и 2.14 соответственно) двигатели $M1$ и $M2$ приводят во вращение валки первой и второй клеток соответственно; ω_{d1} и ω_{d2} – угловые скорости двигателей $M1$ и $M2$; J_{M1} , J_{M2} – моменты инерции двигателей $M1$ и $M2$ с редукторами, J_{kl1} , J_{kl2} – приведенные моменты инерции валков прокатных клеток; M_{f1} , M_{f2} , M_{f3} , M_{f4} – моменты внешнего трения; C_1, C_2 – жесткость упругого соединения – длинный вал; b_1, b_2 – коэффициенты внутреннего демпфирования, пропорциональные рассогласованию угловых скоростей двух смежных масс; M_{13} , M_{24} – моменты двигателей в упругих передачах; v_{kl1} , v_{kl2} – линейные скорости движения материала через валки первой и второй клеток; l – расстояние между осями смежных клеток; C_p – жесткость упругого соединения (транспортируемый материал); ω_3 , ω_4 – угловые скорости торцов шпинделя.

Для поддержания постоянного натяжения прокатываемой полосы необходимо обеспечивать постоянное значение силы упругости, действующей в металле. Сила упругости F_C действует только на промежуток полосы, находящийся между двумя клетями и равный по величине l – расстоянию между осями клеток. При этом на часть полосы длиной le сила упругости F_C не влияет, так как она находится за пределами межклетевого расстояния l .

Наличие упругой связи механизмов через полосу, как одного из факторов, оказывающих влияние на динамические характеристики электропривода, что требуется учитывать при разработке систем управления [4,19]. Это особенно актуально в связи с повышением скоростей агрегатов обработки металла и повышением требований к качеству обрабатываемой полосы [8].

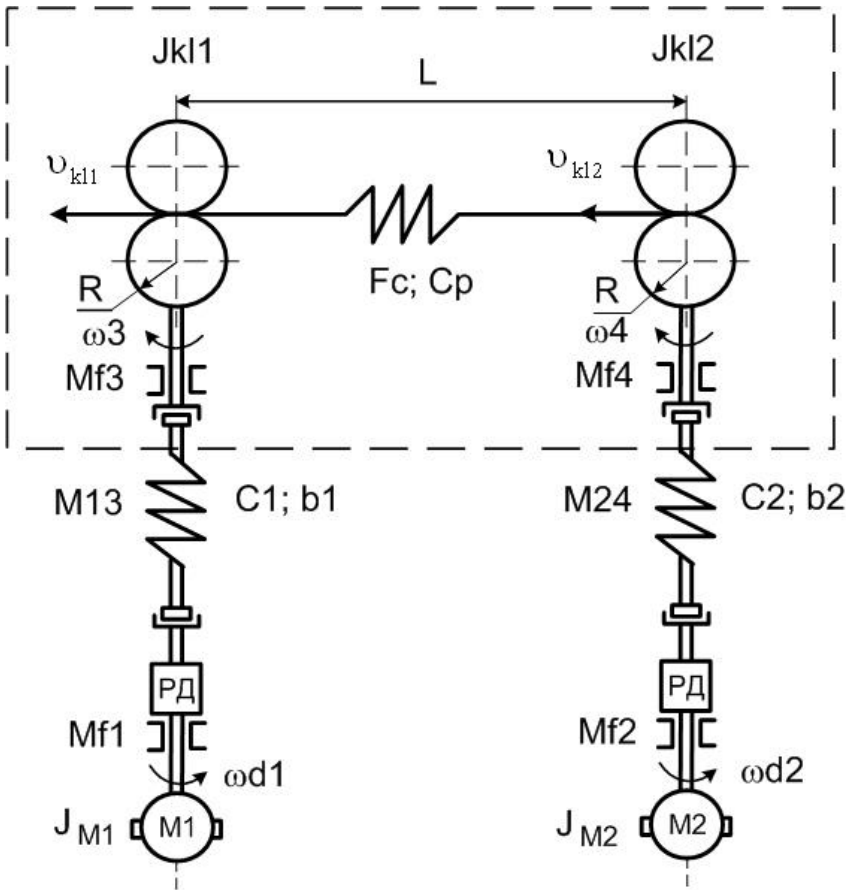


Рисунок 2.13 – Четырехмассовая электромеханическая система прокатного механизма с упругостями первого и второго рода

Рассмотрим двухмассовую систему, представляющую собой валки первой клетки, прокатываемую полосу и валки второй клетки (рисунок 2.14), которая обозначена пунктирной линией на рисунке 2.13.

Входным для рассматриваемой структурной схемы является момент, создаваемый упругой связью «длинный вал», которая рассмотрена ранее. Выходной координатой этой схемы является угловая скорость второй клетки. Первая и вторая клетки описываются аналогичными уравнениями с учетом отличия в индексах.

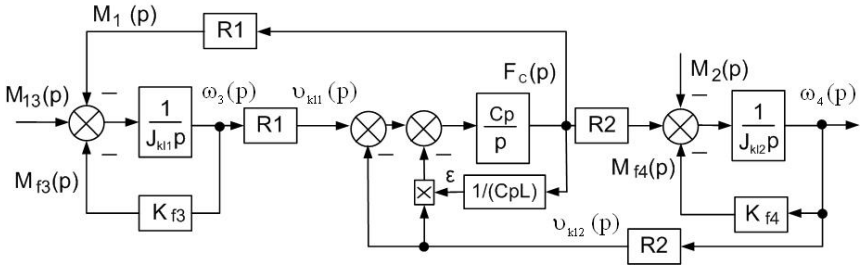


Рисунок 2.14 – Структурная схема двухмассовой электромеханической системы с упругостями второго рода

Система уравнений взаимосвязанного электропривода двух смежных клеток с учетом (2.22) – (2.28) в операторной форме:

$$\left. \begin{aligned}
 J_{kl1}p\omega_3(p) &= M_{d1}(p) - F_C(p)R_1 - k_{f3}\omega_3(p); \\
 J_{kl2}p\omega_4(p) &= M_{d2}(p) + F_C(p)R_2 - k_{f4}\omega_4(p); \\
 F_C(p) &= \frac{C_p}{p} \{v_{kl1}(p) - [I + \varepsilon(p)]v_{kl2}(p)\}; \\
 \varepsilon(p) &= \frac{1}{C_p L} F_C(p); \\
 M_{d1}(p) &= i_{d1}(p)C\Phi_1; \\
 M_{d2}(p) &= i_{d2}(p)C\Phi_2; \\
 i_{d1}(p) &= \frac{1}{R_{d1}(T_{d1}p + 1)} (U_{d1}(p) - C\Phi_1\omega_3(p)); \\
 i_{d2}(p) &= \frac{1}{R_{d2}(T_{d2}p + 1)} (U_{d2}(p) - C\Phi_2\omega_4(p)),
 \end{aligned} \right\} \quad (2.47)$$

где T_{d2} – электромагнитная постоянная времени электропривода;

R_{d2} – сопротивление якорной цепи;

C – конструктивный коэффициент электродвигателя;

U_{d1}, U_{d2} – напряжение на выходе тиристорного преобразователя.

Если считать, что R_1 и R_2 в процессе работы не меняются, для линеаризации уравнения необходимо рассмотреть в приращениях:

$$F_C(p) = \frac{C_p}{p} \left\{ (\Delta v_{kl1}(p) - (1 + \varepsilon_0) \Delta v_{kl2}(p)) - \frac{v_{20}}{C_p L} \right\}, \quad (2.48)$$

где v_{20} и ε_0 – начальные значения линейной скорости полотна в конце участка и относительного удлинения.

После получения уравнений в операторной форме можно описать систему в матричной форме.

$$\dot{x} = Ax + Bu. \quad (2.49)$$

Если при составлении вектора состояния учитывать все переменные, описывающие системы с упругостями первого и второго рода, получим громоздкую систему весьма сложную для осуществления поставленной задачи.

Поэтому совместной настройке предшествует настройка отдельных систем с упругостями первого и второго рода, а после этого совместим их работу.

В соответствии с полученной моделью вектор состояния объекта

$$x = \text{col}[i_{d1}, \omega_3, F_c, \omega_4, \varepsilon, i_{d2}]. \quad (2.50)$$

Вектор входных воздействий

$$u = \text{col}[U_{d1}, U_{d2}]. \quad (2.51)$$

Система нормированных уравнений

$$\left. \begin{aligned}
 \omega_3 &= \frac{1}{T_{kl1}p} [M_{d1} - F_C \cdot R_1 - k_{f3} \cdot \omega_3]; \\
 \omega_4 &= \frac{1}{T_{kl2}p} [M_{d2} + F_C \cdot R_2 - k_{f4} \cdot \omega_4]; \\
 F_C &= \frac{1}{T_{c_p}p} \left[(R_1 \omega_3(p) - (1 + \varepsilon_0) R_2 \omega_4(p)) - \frac{v_{20}}{C_p L} \right]; \\
 \varepsilon &= \frac{1}{C_p L} F_C; \\
 i_{d1} &= \frac{1}{R_{d1}(T_{d1}p + 1)} (U_{d1} - C \Phi_1 \omega_3); \\
 i_{d2} &= \frac{1}{R_{d2}(T_{d2}p + 1)} (U_{d2} - C \Phi_2 \omega_4).
 \end{aligned} \right\} (2.52)$$

Преобразуем систему нормированных уравнений к виду:

$$\left. \begin{aligned}
 \omega_3 &= \frac{1}{T_{kl1}p} i_{d1} - \frac{R_1}{T_{kl1}p} F_C - \frac{k_{f3}}{T_{kl1}p} \omega_3; \\
 \omega_4 &= \frac{1}{T_{kl2}p} i_{d2} + \frac{R_2}{T_{kl2}p} F_C - \frac{k_{f4}}{T_{kl2}p} \omega_4; \\
 F_C &= \frac{R_1}{T_{c_p}p} \omega_3 - \frac{R_2(1 + \varepsilon_0)}{T_{c_p}p} \omega_4 - \frac{v_{20}}{C_p L} e; \\
 \varepsilon &= \frac{1}{C_p L} F_C; \\
 i_{d1} &= -\frac{1}{T_{d1}p} i_{d1} + \frac{1}{R_{d1}T_{d1}p} U_{d1} - \frac{1}{R_{d1}T_{d1}p} \omega_3; \\
 i_{d2} &= -\frac{1}{T_{d2}p} i_{d2} + \frac{1}{R_{d2}T_{d2}p} U_{d2} - \frac{1}{R_{d2}T_{d2}p} \omega_4.
 \end{aligned} \right\} (2.53)$$

Матрица системы и матрица управления имеют вид:

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{k_{f\beta}}{T_{k11}} & 0 & -\frac{R_1}{T_{k11}} & 0 & \frac{l}{T_{k11}} & 0 \\ 0 & -\frac{k_{f4}}{T_{k12}} & \frac{R_2}{T_{k12}} & 0 & \frac{l}{T_{k12}} & 0 \\ \frac{R_1}{T_{c_f}} & -\frac{R_2(l+\varepsilon_0)}{T_{c_f}} & 0 & -\frac{\nu_{20}}{C_p l} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{l}{c_p l} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{l}{R_{d1} T_{d1}} & 0 & 0 & 0 & -\frac{l}{T_{d1}} & 0 \\ 0 & -\frac{l}{R_{d2} T_{d2}} & 0 & 0 & 0 & -\frac{l}{T_{d2}} \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{l}{R_{d1} T_{d1}} & 0 \\ 0 & \frac{l}{R_{d2} T_{d2}} \end{bmatrix}$$

Уравнение состояния в развернутом виде:

$$\begin{bmatrix} \omega_3(t) \\ \omega_4(t) \\ F_C(t) \\ \varepsilon(t) \\ i_{d1}(t) \\ i_{d2}(t) \end{bmatrix} \frac{d}{dt} = \begin{bmatrix} -\frac{k_{f\beta}}{T_{k11}} & 0 & -\frac{R_1}{T_{k11}} & 0 & \frac{l}{T_{k11}} & 0 \\ 0 & -\frac{k_{f4}}{T_{k12}} & \frac{R_2}{T_{k12}} & 0 & \frac{l}{T_{k12}} & 0 \\ \frac{R_1}{T_{c_f}} & -\frac{R_2(l+\varepsilon_0)}{T_{c_f}} & 0 & -\frac{\nu_{20}}{C_p l} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{l}{c_p l} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{l}{R_{d1} T_{d1}} & 0 & 0 & 0 & -\frac{l}{T_{d1}} & 0 \\ 0 & -\frac{l}{R_{d2} T_{d2}} & 0 & 0 & 0 & -\frac{l}{T_{d2}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \omega_3(t) \\ \omega_4(t) \\ F_C(t) \\ \varepsilon(t) \\ i_{d1}(t) \\ i_{d2}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{l}{R_{d1} T_{d1}} & 0 \\ 0 & \frac{l}{R_{d2} T_{d2}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_{d1}(t) \\ U_{d2}(t) \end{bmatrix}$$

Взаимосвязанный электропривод наматывающего механизма и смежной с ним клетки (кинематическая схема, рисунок 2.15) описывается аналогичными (2.47) выражениями, однако необходимо принять во внимание переменный радиус рулона. Изменение угловых скоростей вращения разматывателя и моталки происходит во времени не по линейному закону, так как эти изменения зависят от варьирования текущего радиуса рулона. Чем больше радиус рулона, тем меньше угловая скорость вращения барабана и наоборот.

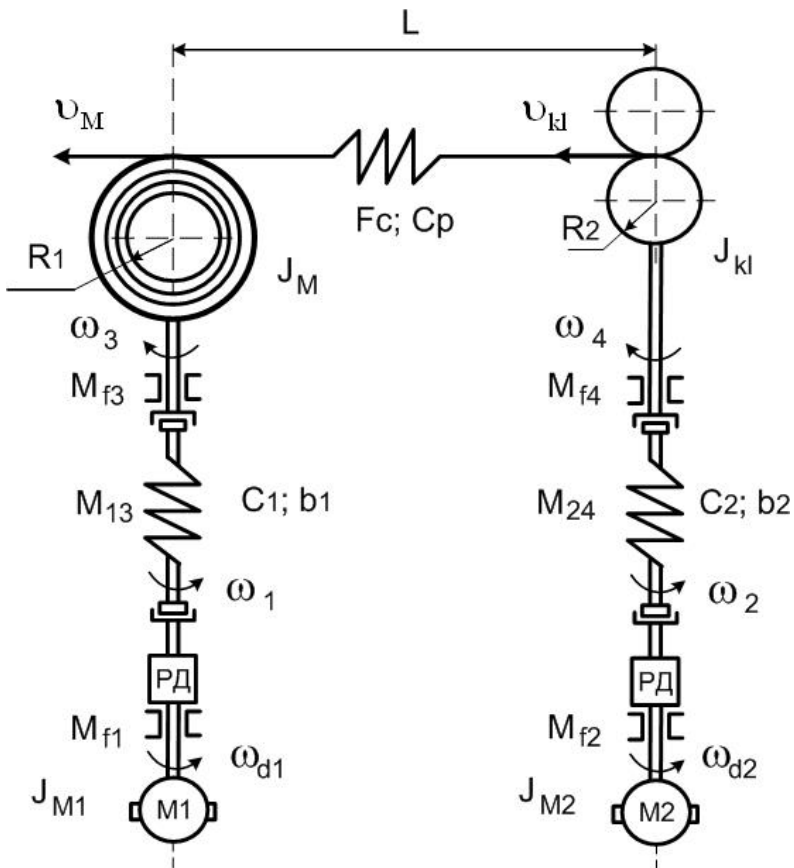


Рисунок 2.15 – Четырехмассовая электромеханическая система прокатного механизма с упругостями первого и второго рода

С учетом этого система (2.47) принимает вид:

$$\left. \begin{aligned}
 J_M p \omega_3(p) &= M_{d1}(p) - F_C(p) R_1(p) - k_{f3} \omega_3(p); \\
 J_{kl} p \omega_4(p) &= M_{d2}(p) + F_C(p) R_2 - k_{f4} \omega_4(p); \\
 F_C(p) &= \frac{C_p}{p} \{v_{kl}(p) - [I + \varepsilon(p)] v_M(p)\}; \\
 \varepsilon(p) &= \frac{I}{C_p L} F_C(p); \\
 R_1(p) &= \sqrt{R_0^2 + \frac{h}{\pi} v_M(p)}; \\
 M_{d1}(p) &= i_{d1}(p) C \Phi_1; \\
 M_{d2}(p) &= i_{d2}(p) C \Phi_2; \\
 i_{d1}(p) &= \frac{I}{R_{d1}(T_{d1} p + I)} (U_{d1}(p) - C \Phi_1 \omega_3(p)); \\
 i_{d2}(p) &= \frac{I}{R_{d2}(T_{d2} p + I)} (U_{d2}(p) - C \Phi_2 \omega_4(p)),
 \end{aligned} \right\} \quad (2.54)$$

где ω_1, ω_3 – угловые скорости торцов шпинделя; ω_4 – угловая скорость валков клетки; J_{d1} – момент инерции ротора двигателя М1 и редуктора, J_M – момент инерции моталки; M_{f1}, M_{f3} – моменты внешнего трения; M_{13} – упругий момент; C_1 – жесткость упругого элемента; C_p – жесткость транспортируемого материала; b_1 – коэффициент внутреннего демпфирования; F_C – сила натяжения прокатываемой полосы; L – расстояние между осями вращающихся механизмов; R_1 – радиус рулона; R_2 – радиус валка клетки; k_{f3}, k_{f4} – коэффициенты вязкого трения; T_{d2} – электромагнитная постоянная времени электропривода; R_{d2} – сопротивление якорной цепи; $C\Phi$ – конструктивный коэффициент электродвигателя; U_{d1}, U_{d2} – напряжение на выходе тиристорного преобразователя.

Таким образом, получили дальнейшее развитие математические модели намоточно-размоточного механизма и клетки с учетом переменного параметра, который учитывает толщину полосы металла, что позволило повысить степень адекватности модели. На основании полученных в результате теоретических исследований зависимостей силы растяжения, которая в свою очередь, зависит от геометрических размеров

полосы, марки стали, а следовательно, и от предела текучести материала, от удлинения полосы, разработана математическая модель прокатываемой полосы при её обрыве, что позволило сформулировать требования, предъявляемые к системе управления главными электроприводами в условиях указанной аварийной ситуации.

На основании анализа существующих конструкций станов холодной прокатки математическая модель электромеханической системы дополнена эффектом реверсирования и прокатки с петлеобразованием.

Дополнение математического описания прокатываемой полосы её переменной толщиной, влиянием эффекта обрыва полосы с учетом зависимости силы натяжения металла от относительного удлинения позволяет повысить адекватность и точность математической модели при построении системы оптимального управления взаимосвязанными электроприводами прокатного стана.

Глава 3. КОМПЛЕКС КОМПЬЮТЕРНЫХ МОДЕЛЕЙ ЭЛЕМЕНТОВ ПРОКАТНОГО ПРОИЗВОДСТВА

3.1. Анализ средств компьютерного моделирования взаимосвязанных электроприводов станов холодной прокатки

В настоящее время в инженерной практике для решения задач исследования и оптимизации используются различные программные продукты: специализированные пакеты; библиотеки программ; математические системы программирования. Хорошо разработаны методики и алгоритмы, позволяющие исследовать режимы работы сложных электромеханических комплексов; анализировать их качество, рассчитывать частотные характеристики и импульсные переходные функции; исследовать динамику сложных систем, содержащих элементы с нелинейными характеристиками; рассчитывать оптимальные процессы при наличии ограничений; исследовать динамику стохастических систем [4, 7, 8, 31].

При выборе того или иного программного продукта необходимо учитывать следующее:

- вид математического описания исследуемой электромеханической системы;
- особенности представления данных модели;
- каким порядком дифференциальных уравнений, или каким порядком и видом матрицы (симметричная, вырожденная и так далее), или каким количеством структурных элементов графа описывается электромеханическая система;
- вид представления результатов расчета;
- количество и вид нелинейных характеристик, описывающих параметры объекта, управляющие и возмущающие воздействия;
- возможность гибкого изменения математической модели.

На этапе проектирования электромеханической системы возможные решения обычно оцениваются на основании интуиции и предыдущего опыта. Однако, в настоящее время, как правило, требуется инструментарий, позволяющий стандартизировать процесс принятия решений.

Во время настройки электромеханических комплексов, а также при автоматизированном выборе лучших проектных решений, широко используются компьютерные методы исследования и синтеза. Эти методы позволяют повысить эффективность принятия решений и сократить время и затраты на введение оборудования в промышленную эксплуатацию [14].

Математическое моделирование является наиболее совершенным и эффективным методом моделирования, который при исследовании и оптимизации основывается на современных методах математического анализа, вычислительной математики и программирования. Как правило, компьютерные исследования электромеханических комплексов проводят на математических моделях. Однако, модели большинства ЭМС не всегда адекватны своим оригиналам из-за сложности учета в математическом описании всех обстоятельств и особенностей реальных процессов.

Благодаря высокому уровню современного программирования существует возможность при выборе программного продукта учесть большинство факторов идентификации ЭМС, таких как вид математического описания исследуемой ЭМС; особенности представления данных; вид представления результатов расчета; возможность гибкого изменения или редактирования математической модели, алгоритмов, точности, выбора и автоматизации применения численных методов при расчете систем дифференциальных уравнений, возможность автоматизации процесса вычисления [15]. Для решения задач исследования систем автоматизированных ЭП используют такие программные средства: MATLAB, MATHCAD, MAPLE, MATHEMATICA, STATISTICA и другие.

Достаточно удобно рассматривать ЭМС в виде структурных схем, особенно, когда необходимо синтезировать структуру и параметры систем управления. Поэтому значительные преимущества перед другими имеет прикладной пакет моделирования динамических систем Simulink среды MATLAB.

При моделировании с использованием библиотек Simulink среды MATLAB реализуется принцип визуального программирования по структурным схемам, в соответствии с которым, пользователь на экране из библиотеки стандартных блоков составляет модель объекта и осуществляет расчеты в автоматическом режиме, с возможностью управлять временем вычислений и устанавливать начальные условия.

При работе с Simulink-моделями пользователь имеет возможность выбирать метод решения дифференциальных уравнений (метод Рунге-Кутты, Розенброка, Дорманда-Принса, Адамса и т.д.), выбирать тип решения (с переменным или постоянным шагом), модернизировать библиотечные блоки, создать свои собственные, а также создавать новые библиотеки блоков, что особенно важно при проведении исследований в достаточно узкой отрасли, например, производство холоднокатаного листа.

Оптимальность параметров системы управления технологическим процессом прокатки оценивается качеством переходных процессов при возмущающих и управляющих воздействиях [7].

В режиме прокатки с натяжением можно сформировать управляющее воздействие путем скачкообразного изменения задания по скорости (5% от начальной скорости) и получить кривые, характеризующие изменения технологических параметров, таких как угловые скорости вращения валков смежных клетей, усилие прокатки, натяжение в переходном режиме. Прокатываемая полоса находится в обеих клетях одновременно. Вход металла в валки сопровождается броском величины натяжения, который отрабатывается системой управления последующей клетью путем коррекции скорости вращения валков.

В момент входа в последующую клеть металл испытывает наибольшее продольное усилие. Это обстоятельство объясняется первоначальным рассогласованием скоростей смежных клетей и зависит от уставок, внесенных оператором на стадии подготовки стана к работе. Настроечные параметры должны быть скорректированы по ходу технологического процесса на основании текущих показателей работы стана.

Таким образом, последовательное применение известных пакетов при решении задач отдельной отрасли, позволяет получить требуемый результат при исследовании и модернизации существующих систем управления, а также при разработке новых систем управления агрегатами станов холодной прокатки.

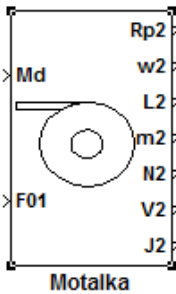
3.2. Разработка компьютерных моделей, учитывающих взаимосвязанность каналов управления

На основании математического описания электромеханических процессов прокатки полосы металла созданы модели, которые имитируют работу намоточно-размоточных механизмов, рабочей клетки, правильной машины, а также модель прокатываемой полосы металла с учетом петлевой ямы, изменения толщины полосы и аварийной ситуации, вызванной обрывом полосы, описанные во второй главе.

Каждая модель представляет собой самостоятельную подсистему с портами входных и выходных координат. Для удобства создан свой логотип, который изображается на модели сверху, интерфейс для введения и изменения параметров каждой из подсистем [31]. Такой подход имеет преимущества, так как любой блок имеет возможность соединиться с другим по каналам механических и электрических связей. Механическими являются скорость, момент, сила натяжения и электрических – ток, напряжение, магнитный поток приводного двигателя и другие. Также для отображения стана и построения системы управления существуют информационные каналы, такие как длина, масса,

относительное удлинение полосы, количество витков, момент инерции, радиус рулона.

Одним из основных агрегатов стана холодной прокатки является наматывающий (разматывающий) механизм. Исходя из зависимостей (2.2)-(2.21), создана модель наматывающего механизма стана, представленная на рисунке 3.1, и внутренняя структура модели разматывающего механизма, представленная на рисунке 3.2.



а)

Block Parameters: Motalka

Subsystem (mask)

Parameters

R0

R_d

J0

1000

K_tr

0

h

0.003

B

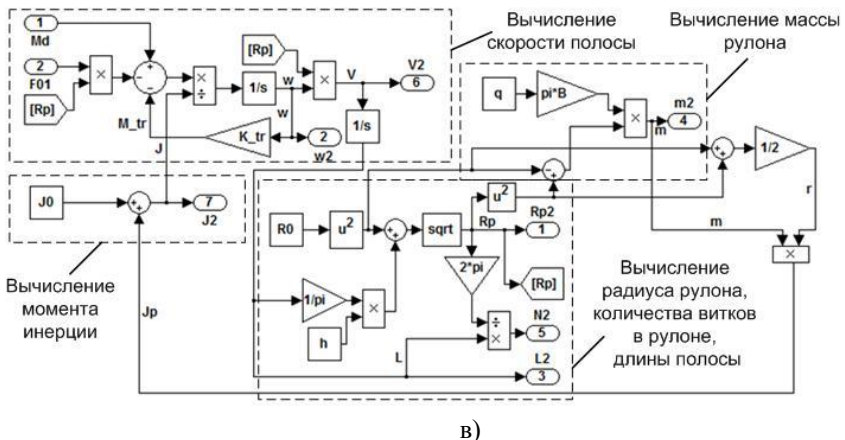
1.5

q

7900

OK Cancel Help Apply

б)



в)

Рисунок 3.1 – Модель наматывающего механизма:
а) подсистема; б) параметры; в) структура

В этих структурах организовано вычисление не только линейной v и угловой ω скоростей, но и определение массы металла в рулоне m , момента инерции рулона J , радиуса рулона R_p , длины намотанной полосы l и количества витков в рулоне N .

Отличие компьютерной модели (рисунки 3.2, 3.3) разматывателя от моталки состоит в том, что в модели разматывателя [26] в начальный момент времени момент инерции, диаметр, масса рулона максимальные, а в модели моталки – минимальные, они учитывают направление движения полосы и задания начальных условий.

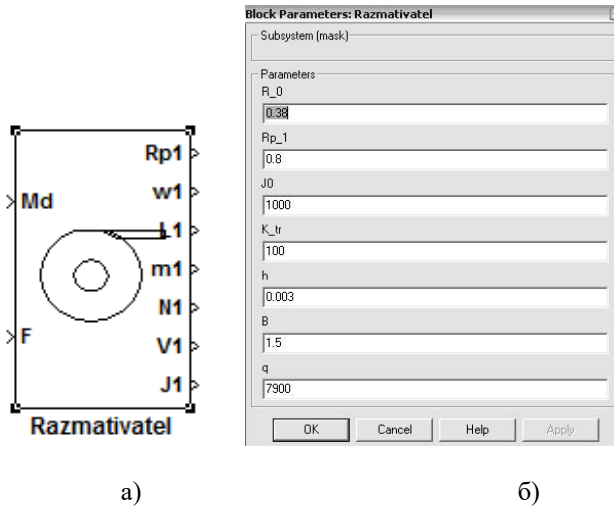


Рисунок 3.2 – Модель разматывающего механизма:
а) подсистема; б) параметры

В модели рабочей клетки (рисунок 3.4) учтены не только вращающиеся массы и баланс моментов (2.24, 2.25), но и предусмотрена возможность нагружения клетки от канала нажима (нажимные винты) через входной порт $Nagim$.

Коэффициенты трения и прокатки K_{MT} , $K_{МП}$ в модели обозначены Kaf_0 , Kaf_a , силы нажима F_N со стороны нажимных винтов обозначена $Nagim$ [26], так как в пакете прикладных программ, в котором было выполнено моделирование, отсутствует возможность использования индексов. Поэтому линейная скорость полосы на выходе из клетки обозначена V_{kl} , силы образующие переднее и заднее натяжение в клетки обозначены $F12$ и $F01$ соответственно.

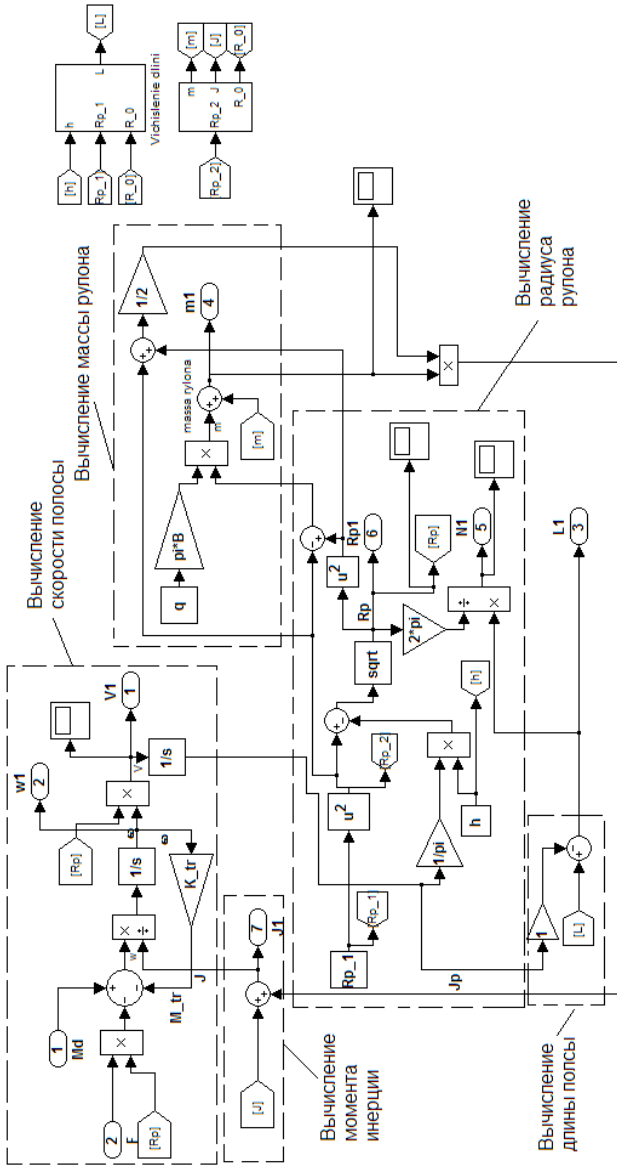


Рисунок 3.3 – Структура модели разматывающего механизма

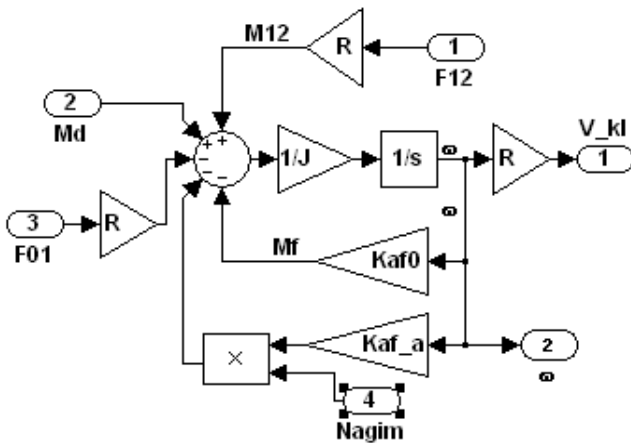
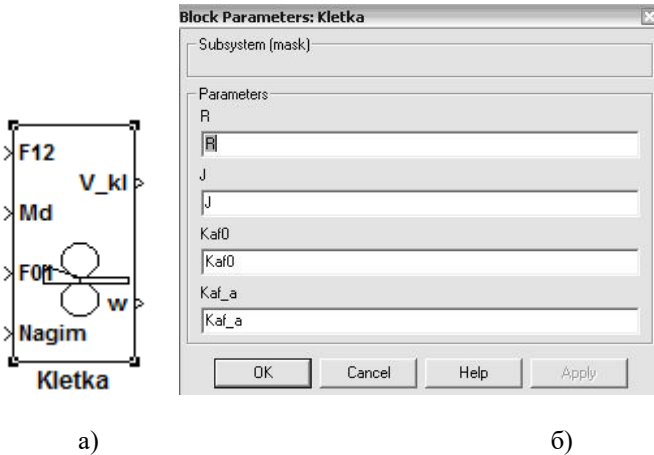


Рисунок 3.4 – Модель рабочей клетки прокатного стана (*Kletka*):
а) подсистема; б) параметры; в) структура

Модель правильной машины (рисунок 3.5) построена на основании описания прокатной клетки, так как они достаточно схожи по функциональности, за исключением того, что в клетке присутствует дополнительное воздействие на полосу со стороны нажимных винтов [30], а также есть дополнительный входной порт *Zpravka/rabota* для имитации наличия и отсутствия полосы между валками правильной машины. С помощью этого канала можно смоделировать линейное нарастание

нагрузки при входе металла в агрегат или уменьшение усилия в функции от необходимой координаты (например, скорость прокатки, длина полосы и т.д.)

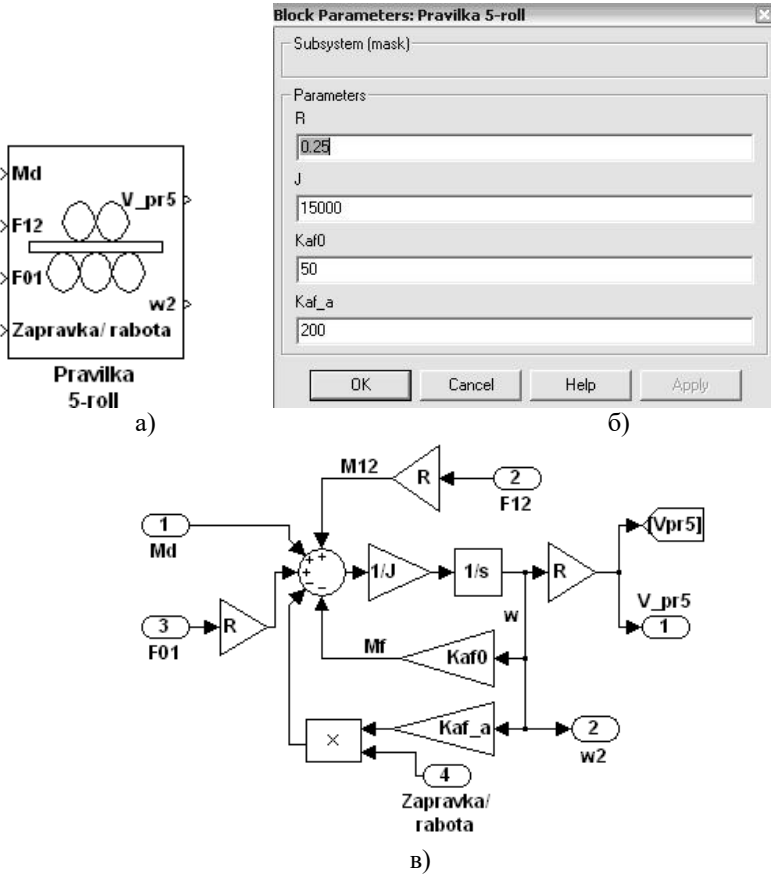


Рисунок 3.5 – Модель пятироlikовой правильной машины (*Pravilka 5-roll*): а) подсистема; б) параметры; в) структура

Конструкции петлевых ям встречаются разнообразны, в частном случае её можно представить как петлю, которая образовывается под воздействием силы тяжести в зависимости от соотношения скоростей $V1$ и $V2$ (рисунок 2.12), изменения длины самой петли, соответственно изменения массы, что показано в формулах (2.43-2.46). При необходимости моделирования усложненного варианта петли металла в

петлевой яме, данная подсистема может быть изменена в соответствии с новыми требованиями или особенностями ее конструкции.

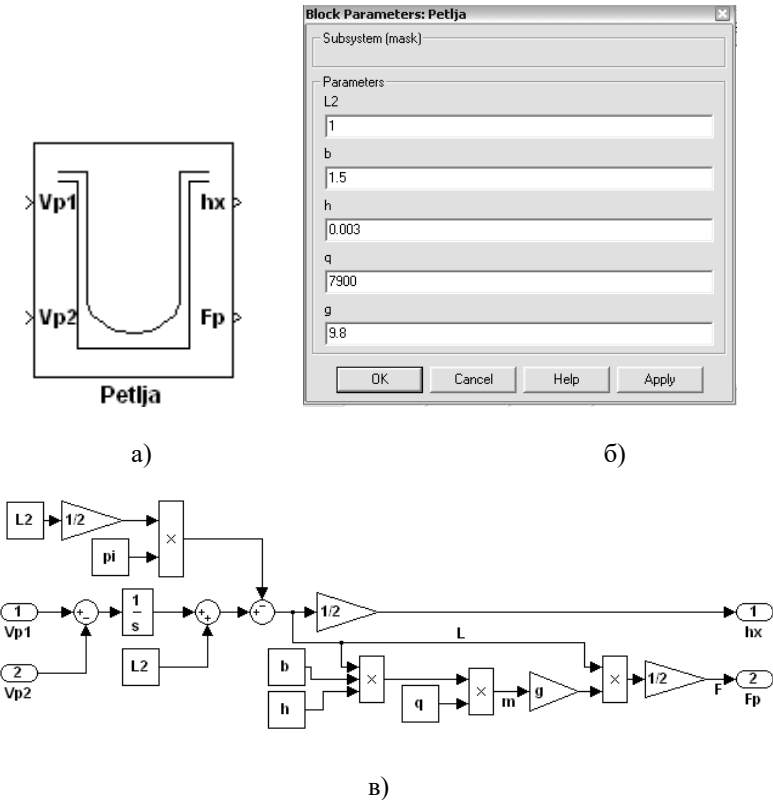


Рисунок 3.6 – Модель петлевой ямы (*Petlja*):
а) подсистема; б) параметры; в) структура

Постоянная величина провисания полосы в яме (в модели обозначена hx) контролируется фотодатчиками ($D1$, $D2$, $D3$, $D4$), дискретные сигналы о срабатывании которых могут передаваться в систему управления скоростью вращения разматывающего механизма (рисунки 3.6, 3.7).

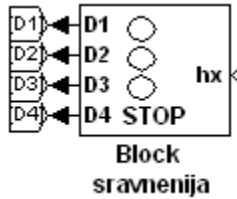


Рисунок 3.7 – Модель блока сравнения (*Blok sravnenija*)

Согласно (2.33) создана модель, имитирующая упругую связь «длинный вал» между двигателем и приводным механизмом (рисунок 3.8).

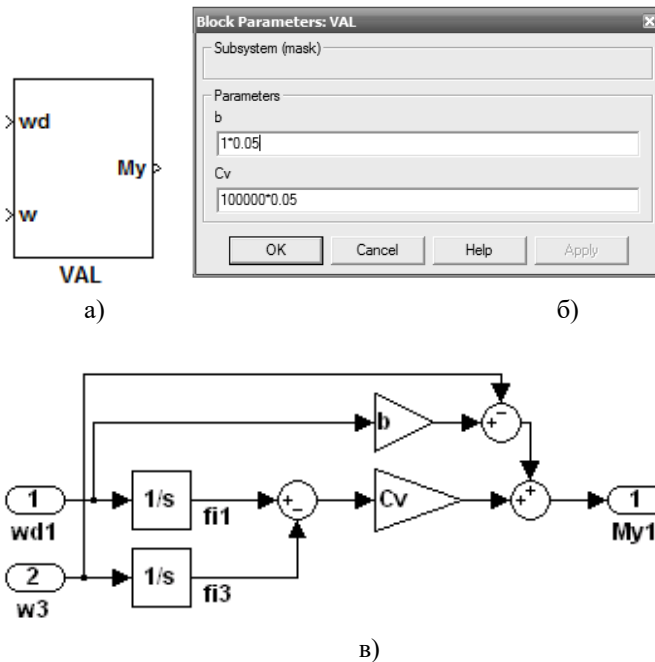


Рисунок 3.8 – Модель подсистемы «длинный вал» (*VAL*):

а) подсистема; б) параметры; в) структура

В модели *VAL* коэффициент внутреннего демпфирования обозначен b , угол поворота вала двигателя – $fi1$, угол поворота вала приводного механизма (моталка, разматыватель, клеть и другие) – $fi3$, ω_{d1}, ω_3 – угловые скорости вращения торцов вала. Данная модель не учитывает зазоры в механической части и при необходимости может быть

дополнена зонами нечувствительности или нелинейными блоками. Но это приведет к усложнению всей модели, что не всегда целесообразно.

На рисунке 3.9 показана модель металла, соединяющая два соседних агрегата [26]. Отметим, что по своей структуре она является универсальной, подходит для всех участков стана. Данная модель представляет собой – упругое звено второго рода, так как усилие (момент) между соседними приводами передается через транспортируемый материал.

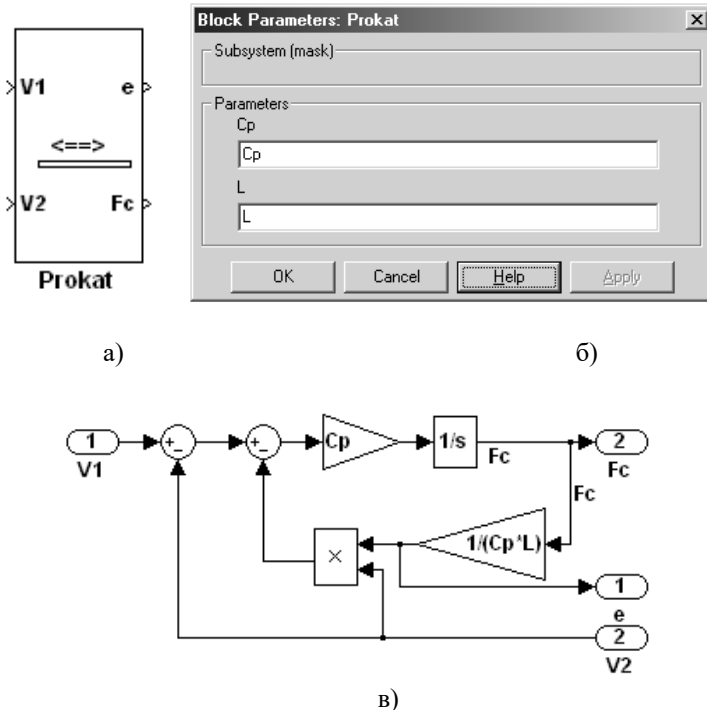


Рисунок 3.9 – Модель прокатываемого металла (*Prokat*):
а) подсистема; б) параметры; в) структура.

Для имитации случайных воздействий со стороны проката блоки *Motalka*, *Prokat*, *Kletka* [26] могут быть дополнены портами входа h (рисунок 3.10), что позволяет исследовать работу этих механизмов при случайном характере изменения толщины прокатываемого материала. Непостоянство значения h приводит к изменению жесткости полосы Cp (рисунок 3.11) и влияет на её упругие свойства. Также влияние разнотолщинности полосы учтено в модели моталки (при вычислении текущего значения радиуса, массы, момента инерции и массы рулона) и

клетки, где с изменением h меняется момент сопротивления из-за увеличения усилия прокатки.

Для примера на рисунке 3.12 приведена модель формирователя толщины полосы случайного характера, сформированный сигнал показан на рисунке 3.13. Для моделирования изменения толщины полосы использован источник случайного сигнала с равномерным распределением (*uniform random number*). Уровень сигнала ограничен сверху и снизу значениями *Maximum* и *Minimum*, периодичность изменения сигнала задается параметром *Sample time*, диапазон варьирования величины h составляет 0,4 % (рисунок 3.13).

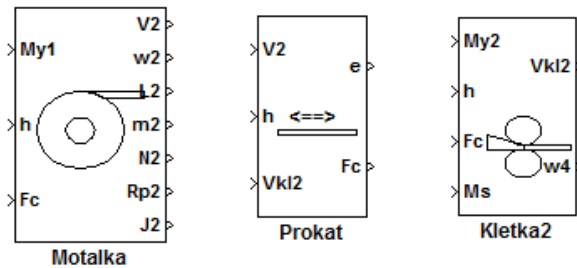


Рисунок 3.10 – Модели *Motalka*, *Prokat*, *Kletka* дополненные портом входа h

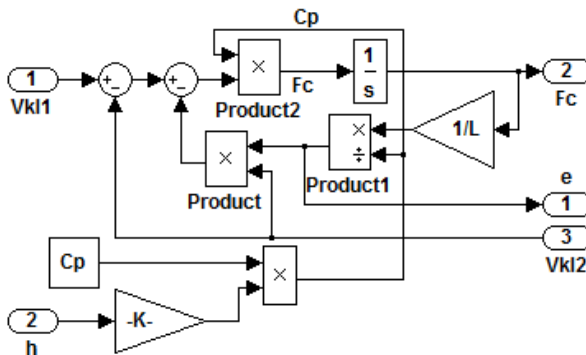


Рисунок 3.11 – Модель прокатываемой полосы с учетом варьирования толщины полосы h

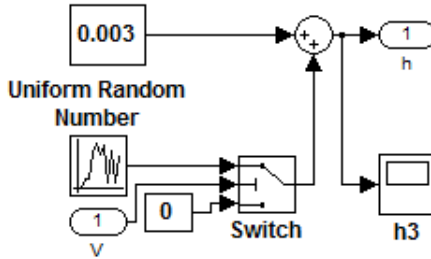


Рисунок 3.12 – Модель формирователя толщины полосы

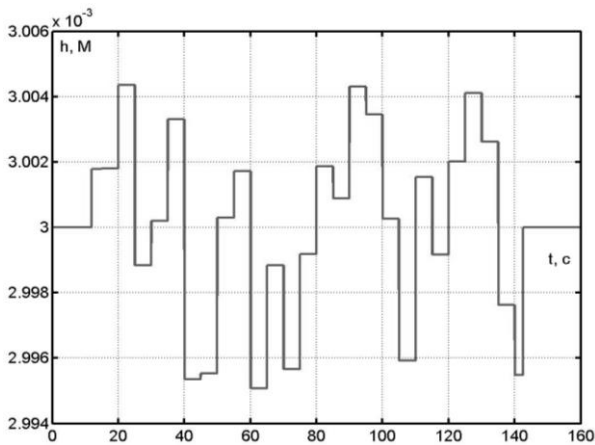
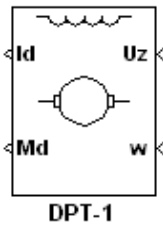


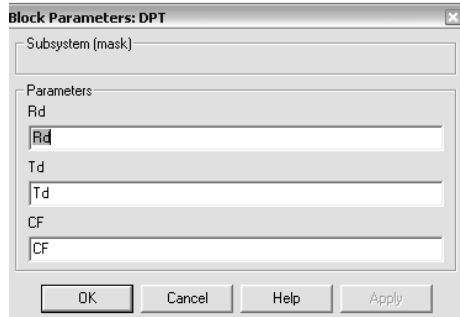
Рисунок 3.13 – Сигнал формирователя толщины случайного характера

Вращающий момент Md создается, например, двигателем постоянного тока независимого возбуждения (ДПТ НВ), который приводит в движение главные приводные агрегаты процесса прокатки (рисунок 3.14).

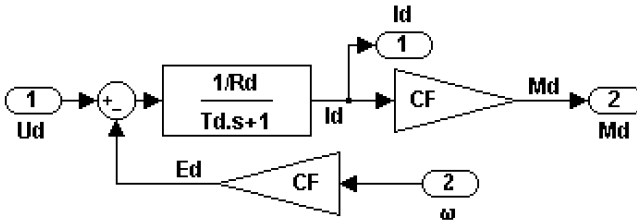
К примеру, в моделях на рисунке 3.1 и рисунке 3.3 данный сигнал Md поступает в подсистемы *Motalka* и *Razmativatel* через порт Md . Формирование вращающего момента осуществляется в подсистеме имитирующей якорь машины в качестве источника момента.



а)



б)

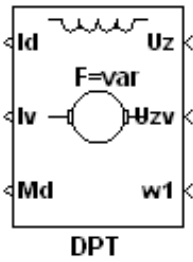


в)

Рисунок 3.14 – Модель якоря двигателя (ДПТ) при работе в первой зоне:

а) подсистема; б) параметры; в) структура

Для учета внутреннего влияния ЭДС двигателя предусмотрен входной порт w (на который поступает сигнал угловой скорости ω двигателя). В случае работы двигателя во второй зоне регулирования модель ДПТ видоизменяется (рисунок 3.15) посредством появления в ней двух каналов регулирования (по напряжению якоря U_d и потоку возбуждения U_{zv}). В этих подсистемах для регулирования напряжения в цепи якоря и потока возбуждения двигателя предназначены порты U_z и U_{zv} соответственно).



Block Parameters: DPT

Subsystem (mask)

Parameters

Rd
0

Ld
0

Rv1
0

Kv
0

T1
0

T2
0

Kfi
0

Tpv
0

OK Cancel Help Apply

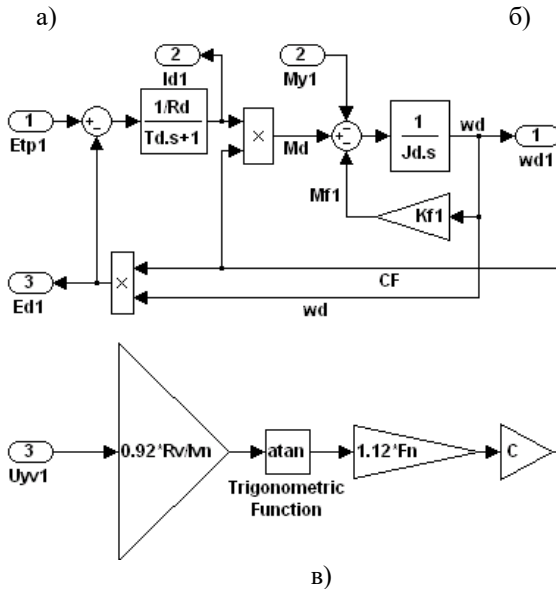


Рисунок 3.15 – Модель якоря двигателя (ДПТ) при работе во второй зоне:

а) подсистема; б) параметры; в) структура

При работе электропривода во второй зоне объект управления ощущает на себе действие одновременно двух сигналов управления: U_{yd} , который определяет процессы в якорной цепи, и U_{ye} , который формирует электромагнитные процессы в элементах магнитной системы двигателя (ток возбуждения, магнитный поток, ЭДС двигателя).

Таким образом, создан комплекс компьютерных моделей элементов прокатного производства. Его можно использовать при работе в пакете Power System для моделирования энергетических систем и устройств после модернизации портов разработанных подсистем.

3.3. Модели взаимосвязанных электроприводов процесса прокатки с учетом упругостей первого и второго рода

Для исследования электромеханических процессов во взаимосвязанных электроприводах смежных клетей прокатного стана на основании математического описания и кинематических схем (рисунки 2.9, 2.12) разработана в пакете современных прикладных программ имитационная модель (рисунок 3.16), где *SAU-1*, *SAU-2* – обозначены блоки, обеспечивающие регулирование управляющих сигналов двигателей первой и второй клетей (*Kletka-1*, *Kletka-2*). Валы, соединяющие прокатные клетки и приводные двигатели имитируются блоками *VAL-1*, *VAL-2*. Металл, выходящий из второй клетки и входящий в первую клетку, имитируется блоком *Prokat*.

В модели вращающие моменты создаются двигателями постоянного тока с независимым возбуждением (*DPT-1*, *DPT-2*), которые приводят во вращение через шпиндели валки двух клетей.

В подсистемах *SAU-1*, *SAU-2* канал регулирования по цепи якоря представляет собой двухконтурную систему автоматического управления, в которой внутренний контур регулирования по току, внешний – по скорости.

В случае обрыва прокатываемой полосы для предотвращения дальнейшей размотки рулона и брака необходимо остановить прокатку, то есть организовать экстренное торможение (рисунок 3.17) [32].

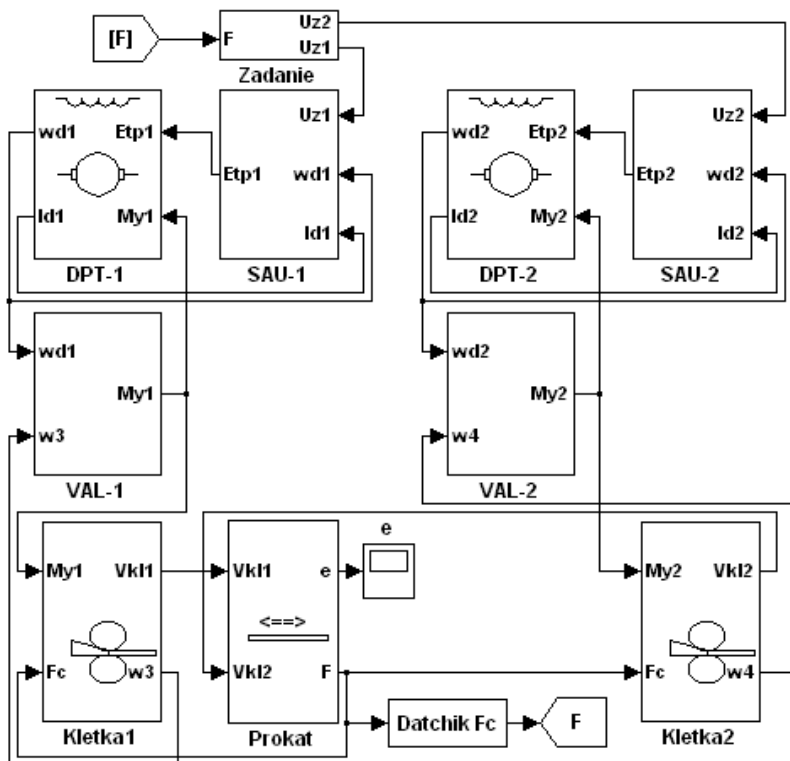


Рисунок 3.16 – Модель четырехмассовой электромеханической системы прокатного механизма с упругостями первого и второго рода

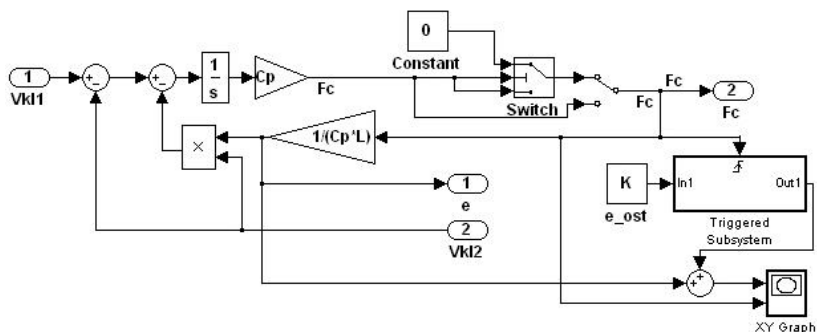


Рисунок 3.17 – Модель модифицированной подсистемы «Prokat» с учетом эффекта обрыва полюсы

В имитационной модели система защиты реализована по способу моментального отключения электроприводов клетей от питающей сети при обрыве прокатываемой полосы, информация о чем, поступает от «*Datchik Fc*» на блок «*Zadanie*».

Из анализа полученных графиков (рисунок 3.18) видно, что такая резкая остановка приводит к весьма значительным скачкам и колебательности координат электромеханической системы (ЭМС).

Это может негативно влиять на работу реального технологического оборудования, следовательно, в аварийных ситуациях необходимо производить плавную остановку ЭМС (рисунок 3.19).

Графики переходных процессов, полученные на разработанной имитационной модели, показаны на рисунке 3.20.

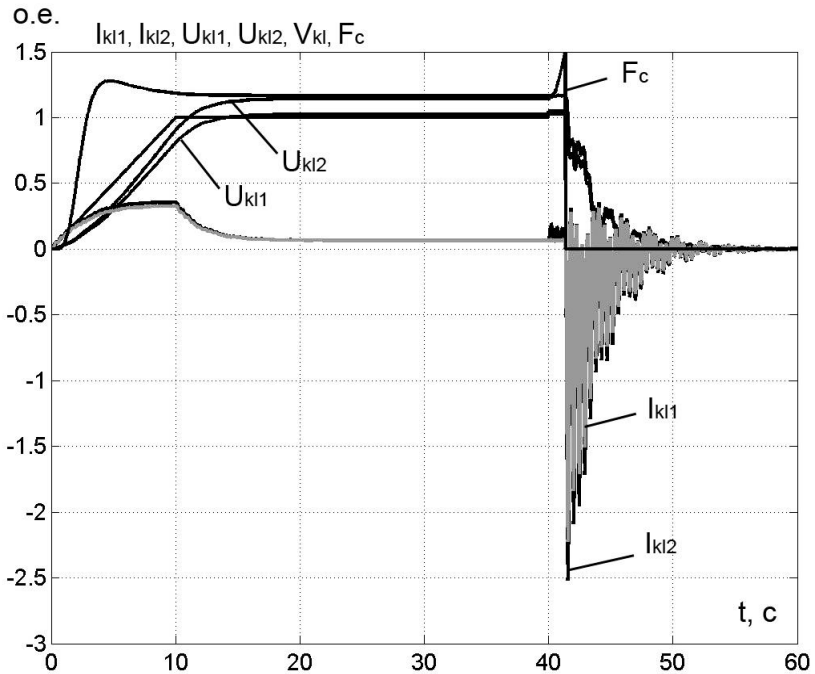


Рисунок 3.18 – Переходные процессы электроприводов двух смежных клетей с учетом упругостей первого и второго рода с учетом обрыва полосы при резкой остановке ЭМС

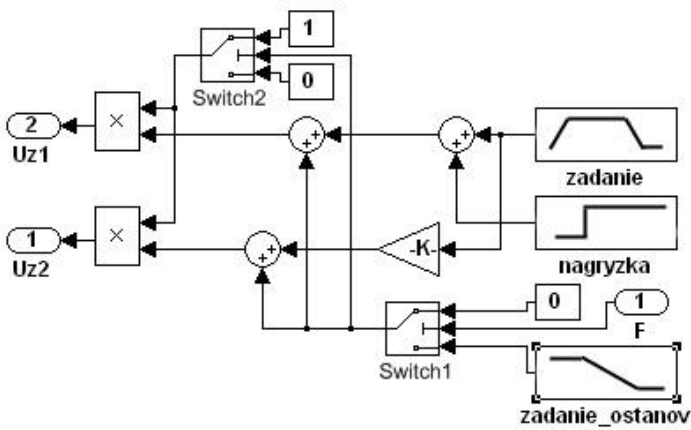


Рисунок 3.19 – Модель подсистемы «Zadanie» при плавной остановке

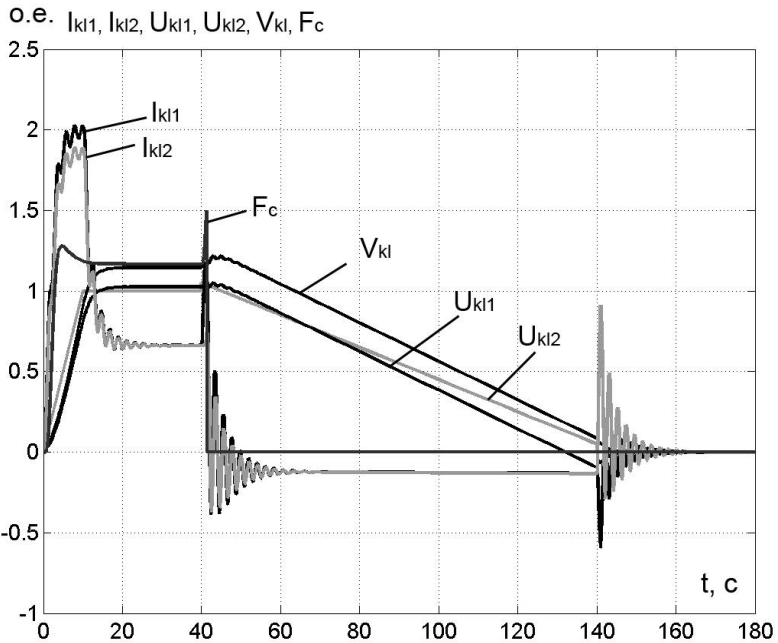


Рисунок 3.20 – Переходные процессы электроприводов двух смежных клеток с учетом упругостей первого и второго рода с учетом обрыва полосы при плавной остановке ЭМС

С этой целью разработан алгоритм системы управления плавной остановкой ЭМС при условии обрыва прокатываемой полосы [32]. В подсистеме «*Zadanie*» формируются задающие сигналы, при этом, если система работает без аварийных режимов, блок *F* подаёт в систему разрешающий сигнал, который умножается на нормальный сигнал задания. Когда же возникает непредвиденная ситуация (авария), F'_c стремится к нулю и при помощи блока «*zadanie_ostanov*» осуществляется постепенное плавное снижение задающего сигнала до момента появления на выходе блока «*zadanie_ostanov*» нуля. Вследствие этого происходит переключение и на выходе блока *Switch1* также появляется нуль. Он, в свою очередь, является управляющим сигналом для блока *Switch2*, который подаст его на систему управления электроприводами клеток и происходит окончательная остановка агрегатов [32].

Чтобы проиллюстрировать учет свойств материала, а именно остаточное удлинение при обрыве полосы, построена зависимость $F=f(\epsilon)$ отображающая растяжение материала (рисунок 3.21).

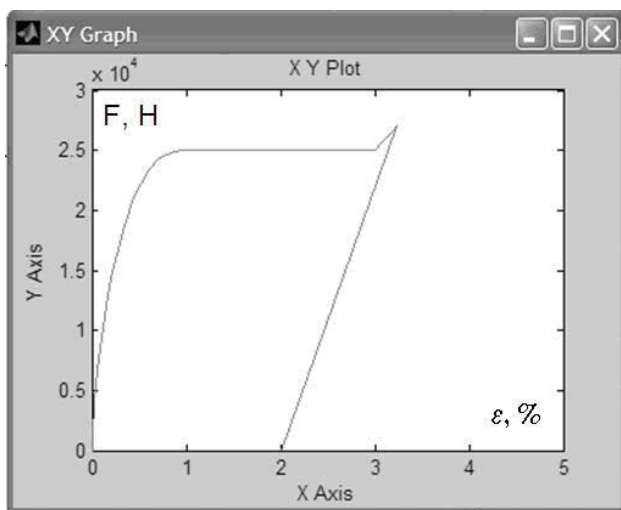


Рисунок 3.21 – Зависимость $F=f(\epsilon)$ отображающая растяжение материала

Сравнивая полученную зависимость с диаграммой растяжения прокатываемой полосы (рисунок 2.11) видно, что она соответствует участкам 0-А-В-К-Л, а именно, на участке 0-А диаграммы и в диапазоне 0-1% полученной зависимости прокатываемая полоса подчиняется закону Гука, на участке А-В диаграммы и в диапазоне 1-3% прокатываемая полоса проходит зону текучести материала, то есть, при неизменной

нагрузке значительно увеличивается длина прелосы. Следующий участок диаграммы В-К и диапазон зависимости $F=f(\varepsilon)$ 3-3,3 % соответствует кратковременному увеличению нагрузки и последующему резкому уменьшению нагрузки, что приводит к уменьшению удлинения прокатываемой полосы без разрушения материала полосы, при этом наблюдается остаточное удлинение полосы, что и требуется при прокатке.

Из выше перечисленных блоков составлена имитационная модель взаимосвязанных ЭП при совместном управлении основными координатами прокатки [27], для примера на рисунке 3.22 приведена ЭМС, состоящая из моталки и рабочей клетки, также с индивидуальными двигателями и САУ. Связь между приводными двигателями и механизмами осуществляется через длинный вал (блоки VAL-1, VAL-2). Система управления выполнена по принципу «ведущий-ведомый», где привод клетки являлся ведущим, а привод моталки – ведомым [27]. Созданные имитационные модели позволяют исследовать динамику ЭМС регулирования межклетевого натяжения в прокатном производстве.

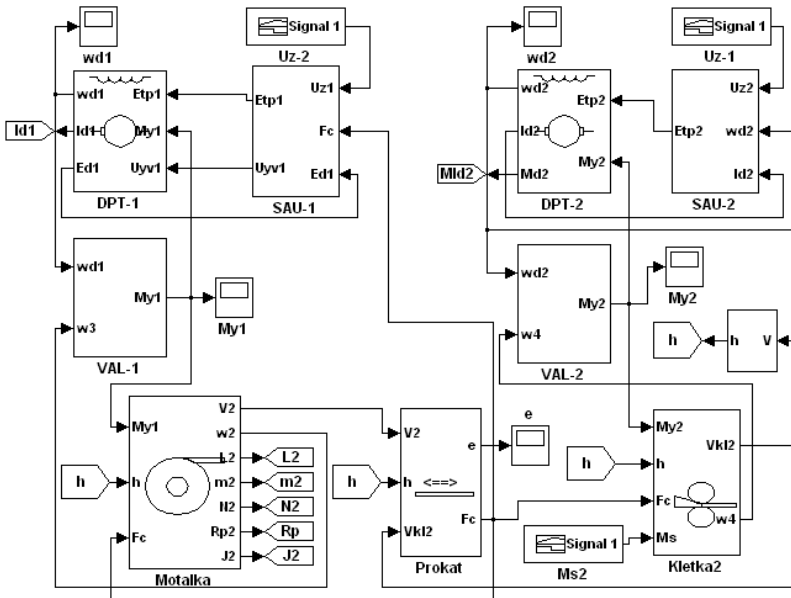


Рисунок 3.22 – Модель взаимосвязанных электроприводов процесса прокатки с учетом упругостей первого и второго рода

На рисунке 3.23 показаны электромеханические процессы (I_{kl} , I_{mot} , ω_{mot} , V_{mot} , V_{kl} , F_c , U_{zv} , U_{zFc} – токи в цепи якоря двигателей клетки и моталки, угловая скорость моталки, линейные скорости прокатываемой полосы на выходе из моталки и на выходе из клетки, сила натяжения полосы, сигналы задания по скорости и по натяжению полосы соответственно) в следующих режимах работы стана: разгон до рабочей скорости, прокатка в установившемся режиме с постоянной рабочей скоростью, торможение, остановка.

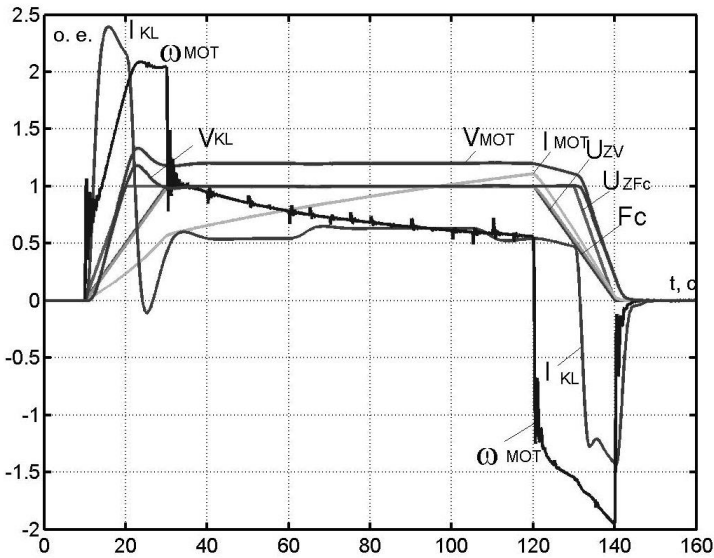


Рисунок 3.23 – Электромеханические процессы модели взаимосвязанных электроприводов процесса прокатки с учетом упругостей первого и второго рода

Представленные графики (рисунок 3.23) приведены к базовым значениям. Трапецеидальное возмущение представлено в виде наброса нагрузки в рабочей клетке. Случайный характер изменения толщины металла больше проявился в системе «моталка-клетка», что проявилось больше на графике угловой скорости моталки, так как толщина металла существенно влияет на радиус и момент инерции рулона.

Рассмотренный набор оборудования присущ большинству прокатных агрегатов, поэтому может быть использован при моделировании всего технологического комплекса прокатки в качестве составной части.

3.4. Компьютерная модель реверсивного одноклетевого стана холодной прокатки

Одноклетевой реверсивный прокатный стан состоит из таких технологических агрегатов: два намоточно-размоточных устройства, рабочая клеть. Для исследования электромеханических процессов в одноклетевом реверсивном прокатном стане разработана в пакете современных прикладных программ имитационная модель, показанная на рисунке 3.24.

В модели одноклетевого реверсивного СХП *SAU-1*, *SAU-2*, *SAU-3* – блоки, обеспечивающие регулирование управляющих сигналов двигателей моталки, клетки и разматывателя (*DPT-1*, *DPT-2*, *DPT-3*) соответственно. Разматывающее устройство представлено блоком *Razmativatel*. Металл, выходящий из разматывателя и входящий в клеть (при прямой прокатке), имитируется блоком *Prokat1*. Рабочая клеть реверсивного одноклетевого стана в модели отображена блоком *Kletka*. Металл, выходящий из клетки и наматываемый на моталку, представлен блоком *Prokat2*. Имитацию наматывающего устройства обеспечивает блок *Motalka*.

В процессе прокатки полоса разматывается с одной моталки и наматывается на другую, при этом диаметры рулонов непрерывно изменяются. Чтобы поддерживать постоянной линейную скорость прокатки, необходимо угловую частоту двигателя разматывающего механизма уменьшать или увеличивать в зависимости от режима работы стана.

Изменение диаметров рулонов в течение всего цикла прокатки должно учитываться при поддержании постоянства натяжения полосы прокатываемого металла.

Для учета изменения радиуса рулона в процессе прокатки осуществляется связь с угловой частотой вращения моталки. В подсистеме *SAU* обеспечено регулирование по двум каналам: по якорю двигателя и по возбуждению. Канал регулирования по якорю представлен двухконтурной САУ (внутренний контур регулирования по току, внешний – по напряжению). Регулирование по возбуждению происходит с учетом изменения потока двигателя.

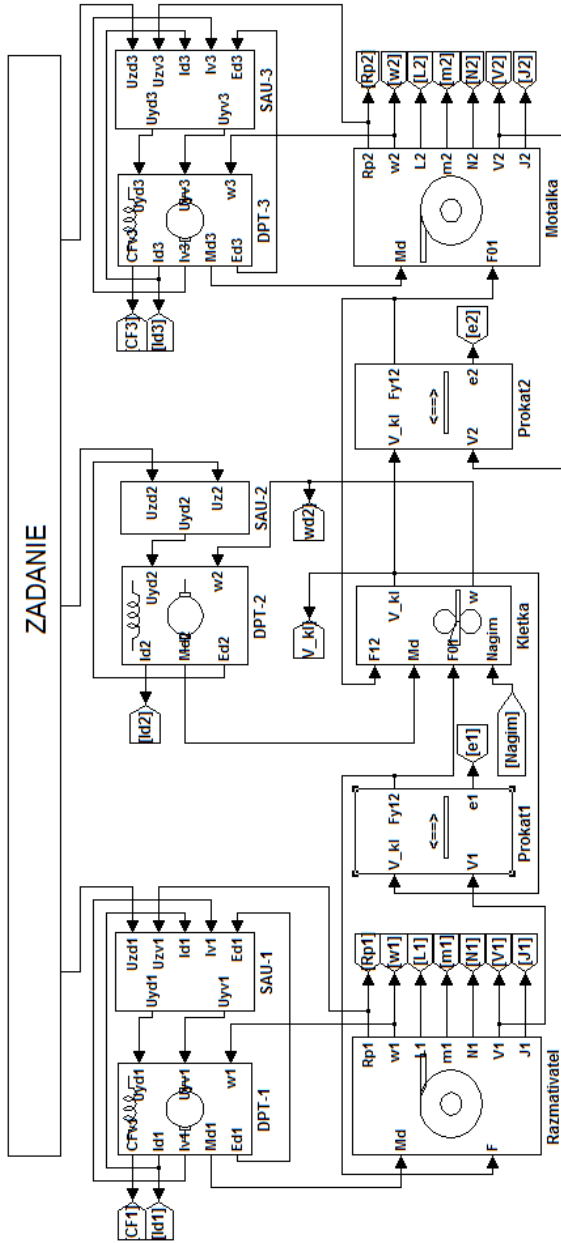


Рисунок 3.24 – Модель одноступенчатого реверсивного СХП

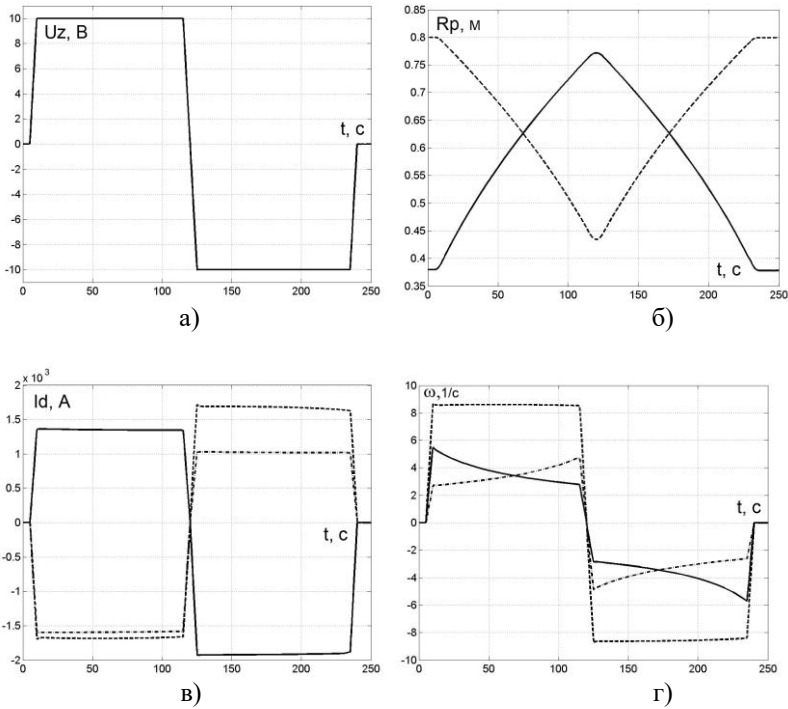


Рисунок 3.25 – Графики переходных процессов стана

Результаты моделирования приведены на рисунке 3.25 (сигнал задания для электроприводов U_z (а), радиус рулона (б), токи якорных цепей электроприводов моталки, клетки, размотывателя (в), угловые скорости электроприводов моталки, клетки, размотывателя (г). Штрихованной линией обозначены процессы, связанные с размотывателем: на рисунке 3.25, б – радиус размотываемого рулона уменьшается до минимально возможного, а после этого происходит реверс полосы и радиус рулона увеличивается до полного рулона.

Анализ результатов моделирования механического движения металла для одноклетового прокатного стана и их сравнение с экспериментально полученными данными на существующем одноклетовом реверсивном стане 1680 цеха ЦХП-1 ОАО «Запорожсталь» свидетельствует о достоверности разработанной имитационной модели (с отклонением между собой не более 5 - 8 %).

3.5. Компьютерная модель 4-х клетового стана холодной прокатки «Тандем»

Непрерывные прокатные станы содержат несколько рабочих клеток, в которых одновременно происходит прокатка металла. Металл движется в одном направлении, и происходит последовательное его обжатие в каждой рабочей клетке. Все клетки, разматыватель и устройство намотки в рулон оснащены электроприводами.

При одновременной прокатке металла в нескольких клетях количество металла, выходящего из предыдущей клетки, должно равняться количеству металла, входящего в последующую клетку. Через каждую клетку проходит в единицу времени одно и то же количество металла.

Для исследования электромеханических процессов в четырехклетевом стане холодной прокатки «Тандем» разработана его компьютерная модель (рисунок 3.26). Подсистема *ZADANIE* создана по принципу «клина скоростей», то есть, угловая скорость двигателей каждой следующей клетки имеет более крутой участок разгона до рабочей скорости по сравнению с предыдущей и, соответственно, большую рабочую скорость. Это обусловлено увеличением длины полосы после обработки её каждой клетью. Для каждой последующей клетки задается соответствующее значение силы нажима, то есть регулируется сила, с которой нажимные винты действуют на прокатываемую полосу.

В блоках SAU задавалось линейное изменение напряжений на обмотки якорей двигателей, а напряжения в обмотке возбуждения изменялись исходя из поддержания постоянства линейных скоростей и натяжения прокатываемого металла при наматывании и сматывании (с учетом варьирования текущего радиального размера рулона).

На рисунке 3.27 цифрами 1, 2, 3, 4 – обозначены рабочие клетки стана: первая, вторая, третья и четвертая соответственно. Задание по скорости на эти клетки задается исходя из принципа «клин скоростей», то есть, скорость прохождения металла по клетям увеличивается с первой клетки по четвертую, так как необходимо поддерживать постоянство объема металла. Каждая последующая клетка увеличивает длину прокатываемой полосы и уменьшает толщину, поэтому линейная скорость полосы увеличивается. При намотке рулона масса, момент инерции и радиус рулона увеличиваются, что показано на рисунке 3.27 г, д, е.

Сравнение полученных при моделировании графиков переходных процессов с данными действующего оборудования ОАО «Запорожсаль» подтвердило адекватность разработанной модели четырехклетевого стана «Тандем».

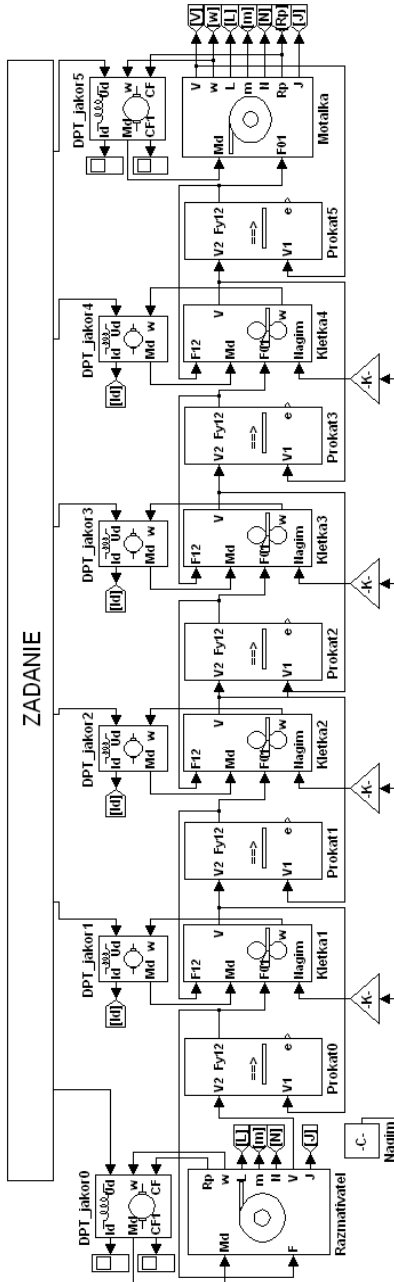


Рисунок 3.26 – Модель четырехклеточного стана холодной прокатки «Тандем»

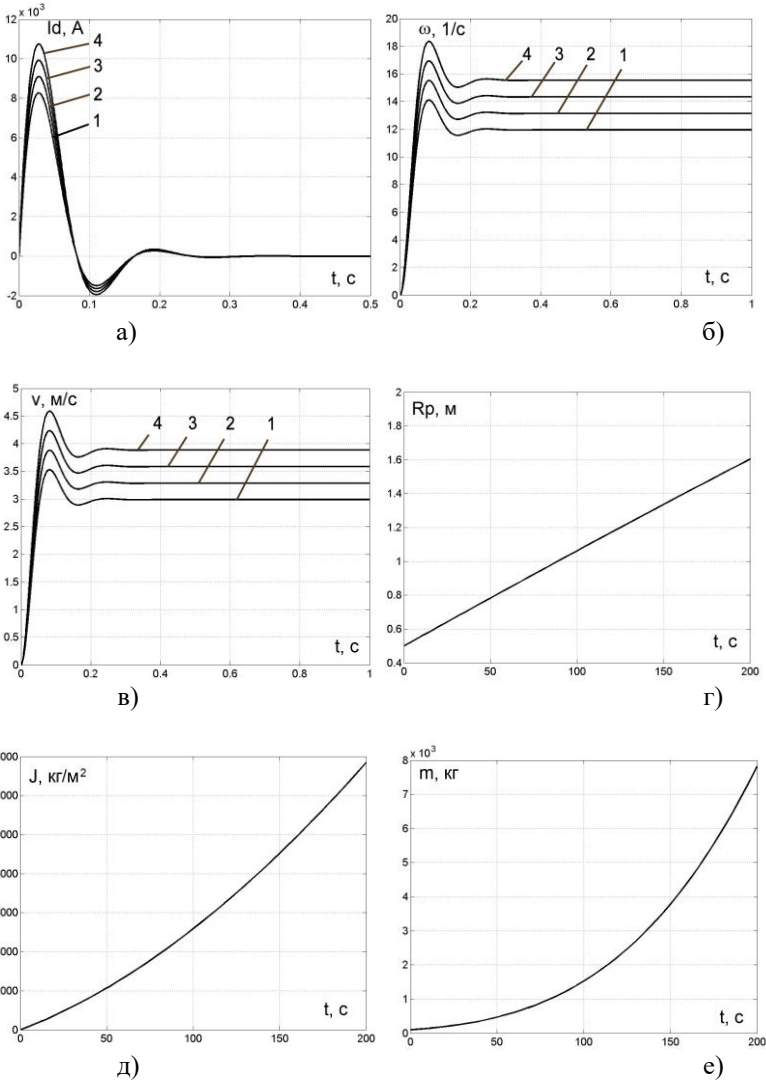


Рисунок 3.27 – Графики переходных процессов на 4-х клетях:
 а) токи якорных цепей двигателей;
 б) угловые скорости двигателей клетей;
 в) линейные скорости движения полосы;
 г) изменение радиуса рулона на моталке;
 д) и е) изменение массы и момента инерции каждой из клетей.

3.6. Компьютерная модель агрегата поперечной резки

Для анализа и синтеза системы регулирования АПР разработана в пакете современных прикладных программ имитационная модель (рисунок 3.28), система автоматического управления которой была построена на основании передаточных функций, при расчёте которых был принят ряд допущений, значительно упрощающих систему [30]. В U_z-1 , U_z-2 , U_z-3 формируется задание на темп и скорость прокатки. В $DPT-1$ реализована двухзонная система регулирования скорости, обеспечивающая постоянные линейную скорость полосы и натяжение. В $DPT-2$, $DPT-3$, $DPT-4$ реализована подчиненная система регулирования скорости, где с помощью блока *Sinhron* синхронизируются линейные скорости полосы на выходе и входе в петлевою яму, обеспечивающие постоянство длины петли. Усилие от разматывателя к правильной машины передается через металл. Блок, имитирующий работу правильных машин, представляет собой инерционную массу всех вращающихся частей машины, приведенную к валу двигателя. В блоке учтены переднее и заднее натяжение полосы, получение линейной скорости металла на выходе из машины. Между 13-роликовой правильной машиной и летучими ножницами отсутствует натяжение, вызывающее продольную деформацию металла, поэтому корректно учитывать только линейную скорость полосы. В модели летучих ножниц реализован принцип порезки полосы на листы в зависимости от скорости подачи полосы.

Далее на рисунке 3.29 приведены графики изменения основных координат полученных на имитационной модели агрегата поперечной резки металла. А именно, показаны графики изменения угловых скоростей вращения двигателей разматывателя, 5-роликовой и 13-роликовой правильных машин. Линейная скорость полосы на выходе 5-роликовой правильной машины несколько больше линейной скорости полосы на выходе 13-роликовой правильной машины, благодаря чему образуется петля.

Сила тяжести петли F_p возрастает по мере увеличения массы петли. Сила натяжения F_{12} поддерживается постоянной. На графиках изменения моментов двигателей разматывателя, 5-роликовой и 13-роликовой правильных машин видны динамические составляющие переходных процессов (разгон, изменение скорости, торможение). Полученные результаты подтверждают адекватность модели при сравнении с экспериментальными данными на агрегате поперечной резки Цеха холодной прокатки №1 ОАО «Запоржсталь».

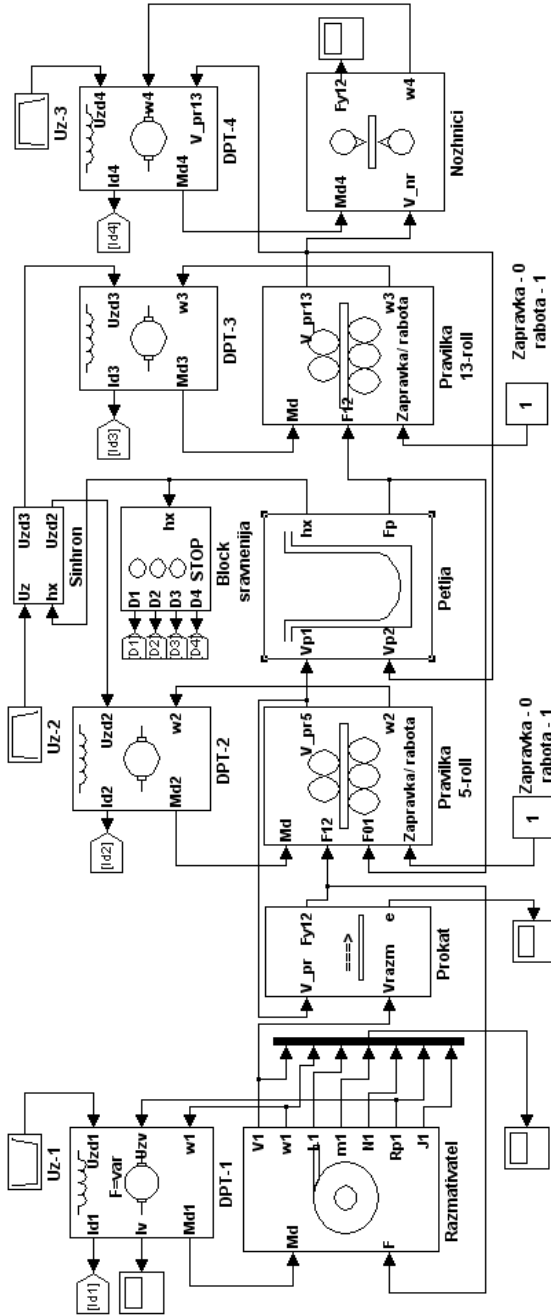


Рисунок 3.28 – Модель агрегата поперечной резки

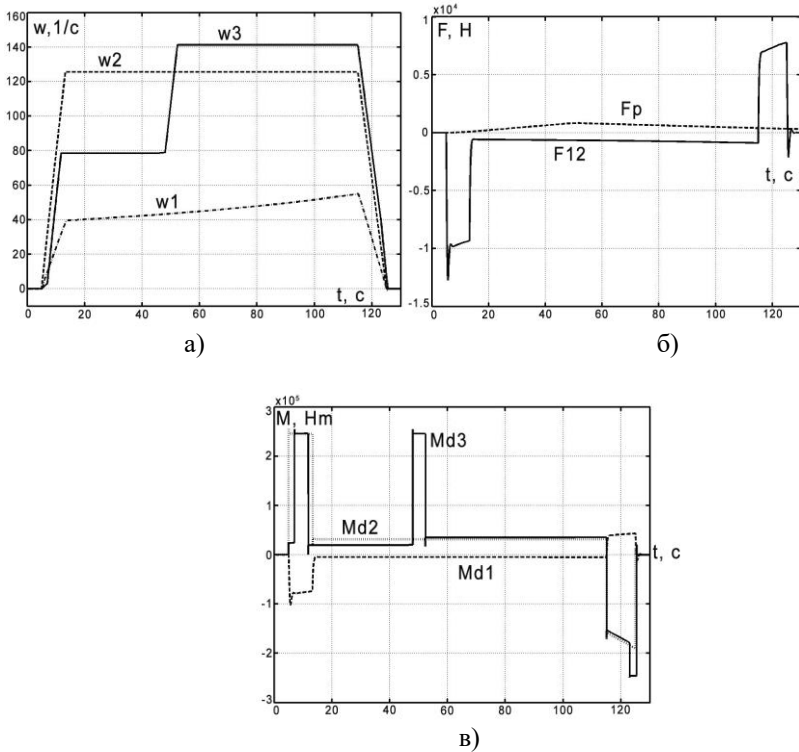


Рисунок 3.29 – Графики электромеханических процессов АПР:
 а) угловые скорости; б) силы, действующие в металле;
 в) моменты двигателей

Таким образом, предложен комплекс взаимосвязанных компьютерных моделей элементов прокатного производства, учитывающий упругости первого и второго рода, реверсирование, петлеобразование, изменение толщины прокатываемой полосы и возможность возникновения аварийной ситуации в связи с обрывом полосы. Рекомендуется внедрение предложенного комплекса компьютерных моделей, что обеспечит рациональный подход к проектированию и исследованию электромеханических систем станов холодной прокатки. Подтверждена универсальность разработанного комплекса моделей элементов прокатного производства при исследовании электромеханических систем с различной структурой, а именно, реверсивного одноклетового стана холодной прокатки, четырехклетового стана холодной прокатки «Тандем», агрегата поперечной резки.

Глава 4. МНОГОКАНАЛЬНЫЙ ДИАГНОСТИРУЮЩИЙ КОМПЛЕКС СТАНА ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ

4.1. Аппаратурный состав

При контроле и исследовании технологического процесса выводы об условиях работы оборудования и о характере протекания технологического процесса делаются на основании анализа величин, полученных при измерении его параметров. Под измерением обычно понимают получение и отображение информации о некоторых координатах технологического процесса. Процесс измерения заключается в экспериментальном определении численного соотношения между измеряемой физической величиной и значением, принятым за единицу измерения. Однако на практике технически трудно контролировать некоторые параметры непосредственно, поэтому при создании достоверной модели прокатного стана их можно вычислять косвенным методом, реализуя на микропроцессорных системах [21].

Методы измерения линейных перемещений, даже если они имеют малую величину, не представляют больших трудностей и довольно хорошо разработаны. Однако, при измерении электромеханических параметров прокатных станов известные прямые методы измерения линейных перемещений не могут быть использованы в связи с кратковременностью действия измеряемых нагрузок и необходимостью передачи сигнала, пропорционального измеряемому электромеханическому параметру, на пульт управления станом или в систему автоматического регулирования. Поэтому при измерении электромеханических параметров при прокатке малые линейные перемещения преобразуют в величину, которую легко усилить и измерить или записать электрическими сигналами.

При применении измерительно-диагностирующих приборов обычно одновременно измеряется несколько параметров. Поэтому в качестве фиксации информации используют светолучевые осциллографы, позволяющие одновременно записывать на светочувствительную бумагу несколько параметров. Результаты измерений получают только после обработки и расшифровки осциллограмм, что существенно замедляет процесс диагностирования прокатки. В известных литературных источниках описывается двухканальный измерительно-вычислительный комплекс ИНД-7681, который получает информацию от специально разработанных датчиков МАД-7681. Однако, при этом не рассматриваются вопросы, связанные с созданием общего диагностирующего комплекса, позволяющего непрерывно отслеживать

работу прокатного стана по нескольким текущим технологическим электромеханическим параметрам, а не только по натяжению.

Современные микропроцессорные системы также позволяют диагностировать и передавать для анализа различные сигналы по информационным каналам. С развитием микропроцессорных электроприводов как постоянного, так и переменного тока, появилась возможность создания общего диагностического многоканального комплекса всего технологического процесса (в частности, дрессировочного прокатного стана), в котором могут контролироваться практически все доступные электромеханические параметры.

С целью уменьшения разнотолщинности металла, получения необходимой поверхностной прочности металла и качественной поверхности полосы производится дрессировка (прокатка с небольшими обжатиями до 1,5% и относительно высоким коэффициентом трения) полосы, в результате которой происходит упрочнение поверхностного слоя. Дрессировка производится в прямом направлении.

Схема размещения оборудования дрессировочного одноклетьевого стана холодной прокатки цеха холодной прокатки №1 ОАО «Запорожсталь» показана на рисунке 4.1. На данном рисунке обозначено: 1 – разматыватель; 2 – натяжные ролики; 3 – нажимное устройство; 4 – клеть; 5 – тензометрические ролики; 6 – моталка; 7, 8, 10 – редукторы двигателей разматывающей и наматывающей моталок, натяжных роликов соответственно; 9 – шестереночная клеть; 11-14 – двигатели электроприводов разматывающей моталки, натяжного устройства, клетки и наматывающей моталки; ω_1 , ω_2 – угловые скорости разматывателя и моталки; v_1 , v_2 – линейные скорости полосы на входе и на выходе клетки; Р – разматывающая моталка, НР – натяжные ролики, К – клеть, М – наматывающая моталка.

Для решения задачи измерения электромеханических параметров в условиях металлопрокатного производства был разработан диагностирующий многоканальный комплекс. Комплекс использует информацию, полученную от датчиков скорости, тока и напряжения. По каждому из четырёх электроприводов [33] контролируются такие координаты: напряжение двигателя, ток возбуждения, ток якоря, а также скорость клетки, которая берется с учетом калибровочного коэффициента пропорционально напряжению тахогенератора.

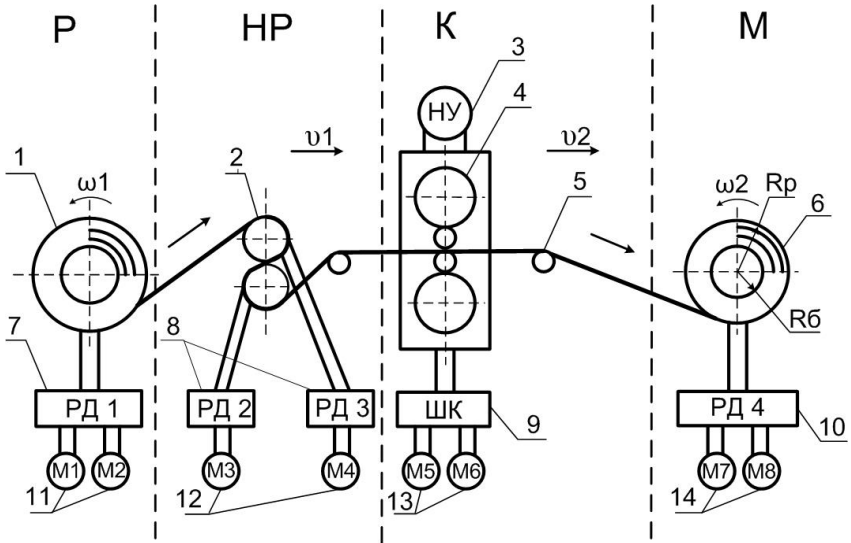


Рисунок 4.1 – Схема размещения оборудования прокатного стана

Структурная схема диагностирующего многоканального комплекса приведена на рисунке 4.2.

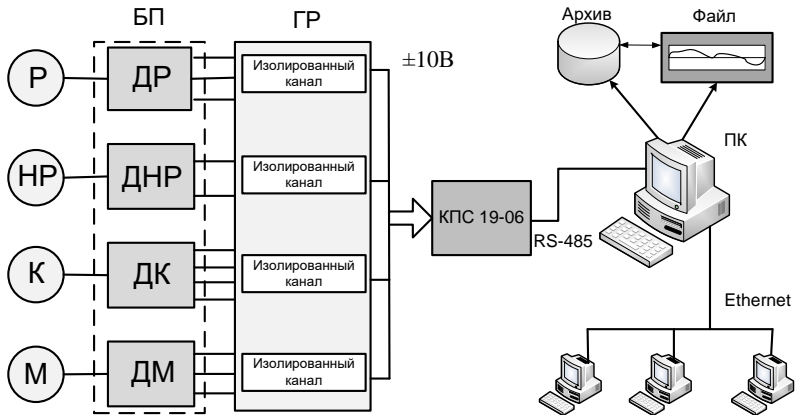


Рисунок 4.2 – Структурная схема диагностирующего многоканального комплекса

Таблица 4.2 – Основные технические характеристики диагностирующего многоканального комплекса

Показатель	Значение
1 Число каналов измерения, шт	16
2 Число контролируемых величин, шт	12
3 Напряжение питания от сети переменного (50±1 Гц) тока, В	220
4 Аналоговые входа, напряжение постоянного тока, В	-10...+10
5 Цифровой канал	RS-485
6 Скорость передачи данных, кБ/с	19200
7. Время выполнения одной команды процессором, мкс	0,5
8. Быстродействие комплекса в целом, мкс	5

Сигналы с датчиков тока и напряжения поступают в блок преобразования (БП), который представлен делителями напряжения. Далее сигналы поступают на блок гальванической развязки (ГР). На блок аналогового ввода Б16.2 микроконтроллера КПС19-06 (рисунок 4.3) подается стабилизированное постоянное напряжение, равное ± 10 В. Контроллер КПС19-06 предназначен для сбора измерительной информации в виде аналоговых сигналов: постоянного тока и напряжения. Также возможна предварительная обработка информации и выдачи управляющих воздействий на объект управления, для построения автоматизированных систем измерения, контроля, регулирования и управления производственными процессами, технологическими линиями [22]. Это осуществляется по программам, записанных в память контроллера с помощью предоставленных потребителю средств программирования и отладки. Программируемый контроллер КПС19-06 представлен на рисунке 4.3.

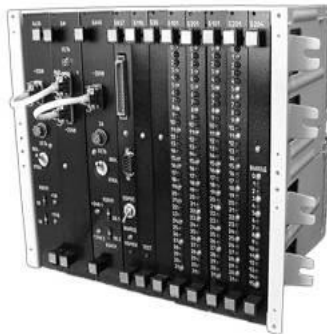


Рисунок 4.3 - Программируемый контроллер КПС19-06

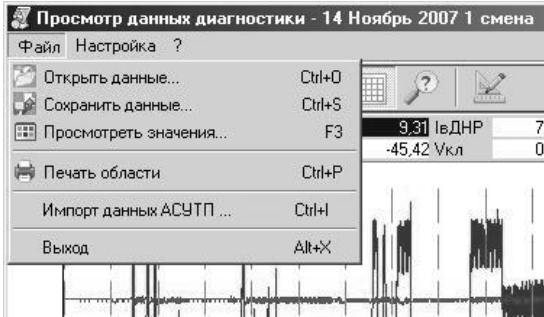
Функциональные возможности микроконтроллера КПС19-06 отвечают техническим требованиям, поставленным при разработке диагностирующего многоканального комплекса. Этот модуль имеет достаточно большое быстродействие процессора и реализует аналогово-цифровое преобразование входных сигналов. Благодаря использованию порта Б16.2 возможно подключение всех датчиков диагностирующего комплекса к микроконтроллеру.

Далее сигналы передаются последовательным каналом связи RS-485 со скоростью 19200 кБ/с на персональный компьютер с операционной системой WindowsXP, где происходит процесс записи и архивации текущих значений электромеханических параметров [15, 21]. В контроллере предусмотрены системы программирования и отладки: «PKC» – инструмент технолога, не владеющего языком программирования «АССЕМБЛЕР» (расширенный функциональными блоками); «WINTS» – предназначенная для пользователей, владеющих языками «СИ» и «АССЕМБЛЕР», а также для написания программ со сложными алгоритмами (включающими поддержку сети, последовательного порта и пульта, прерываний).

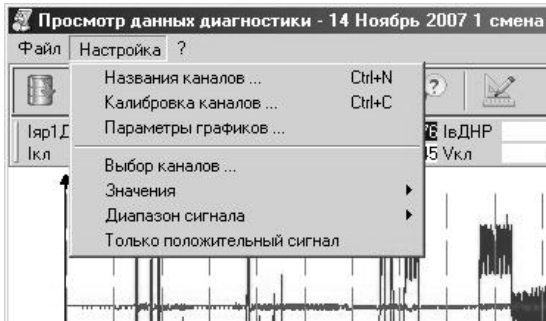
4.2. Программное обеспечение

В рассматриваемом случае программное обеспечение комплекса было специально разработано на базе встроенной системы микроконтроллера КПС19-06. Для написания программы использовались языки программирования Borland Delphi 5.0 и КРОСС-АССЕМБЛЕР ASM51, с помощью которых можно организовать ввод/вывод информации и которые имеют целый ряд резервов. Главное меню созданной программы (рисунок 4.4) содержит как привычные для пользователей возможности открытия файла для просмотра данных, сохранения данных, просмотра значений, печати области значений, так и специфичные, например, импорта данных АСУТП.

Разработанная программа позволяет вводить необходимые названия каналов, калибровать каналы (рисунок 4.5), изменять параметры графиков. Для настройки изображения графиков в программе предусмотрена возможность изменения цвета, толщины линий графика; для удобства исследования кривых может отображаться сетка и задаваться ее шаг; для исследования графиков в общем виде (без отображения влияния шумов на сигнал) предусмотрена функция усреднения значений. Пользователи программы могут выбирать кривые необходимых сигналов для отображения на координатных осях [33].



а)



б)

Рисунок 4.4 - Строка меню программы:
а) меню Файл; б) меню Настройка

Для детального изучения процессов прокатки в комплексе была специально предусмотрена возможность масштабирования по осям X и Y . Для упрощения восприятия графиков отображаемых сигналов можно использовать функцию, которая позволяет на координатной плоскости подписывать графики тем же цветом, что и кривая графика.

Для визуализации мгновенных значений параметров, отображения их в виде осциллограммы и архивирования существует программа мониторинга, которая установлена на персональном компьютере (сервере) и соединена с диагностическим комплексом через Ethernet. Данные записываются в файл, который содержит информацию: дату и время измерения; количество сигналов; массив сигналов – что позволяет удобнее ориентировать архив файлов.

№	Название параметра	Мин. предел	Макс. предел	Вх. значение	Вых. значение	К
1	ток якоря размотывателя 1 ДР	2147483648,0	2147483647,0	439,00	4,43	99,10
2	ток возбуждения 1 ДР	2147483648,0	2147483647,0	10,88	2,72	4,00
3	ток якоря ДНР	2147483648,0	2147483647,0	386,00	3,24	119,14
4	ток возбуждения ДНР	2147483648,0	2147483647,0	6,88	2,34	2,94
5	ток якоря моталки 1 ДМ	2147483648,0	2147483647,0	1426,67	6,26	227,90
6	ток возбуждения 1 ДМ	2147483648,0	2147483647,0	8,28	2,26	3,66
7	№7	2147483648,0	2147483647,0	1,00	1,00	1,00
8	№8	2147483648,0	2147483647,0	1,00	1,00	1,00
9	ток клетки	2147483648,0	2147483647,0	613,33	1,65	371,72
10	ток возбуждения двигателя клетки	2147483648,0	2147483647,0	25,92	6,41	4,04
11	напряжение размотывателя 1 ДР	2147483648,0	2147483647,0	241,00	4,56	52,85
12	скорость клетки	2147483648,0	2147483647,0	9,24	3,35	2,76
13	напряжение моталки 1 ДМ	2147483648,0	2147483647,0	112,00	2,34	47,86
14	напряжение клетки	2147483648,0	2147483647,0	472,00	7,67	61,54
15	Канал №15	2147483648,0	2147483647,0	1,00	1,00	1,00
16	Канал №16	2147483648,0	2147483647,0	1,00	1,00	1,00

Рисунок 4.5 – Окно калибровки регистрируемых параметров

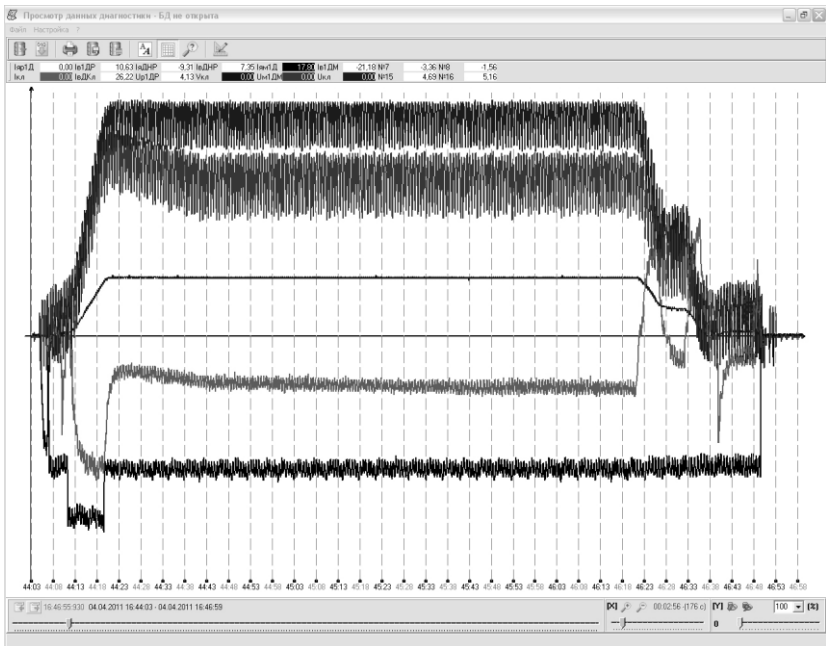


Рисунок 4.6 – Электромеханические процессы дрессировочного стана

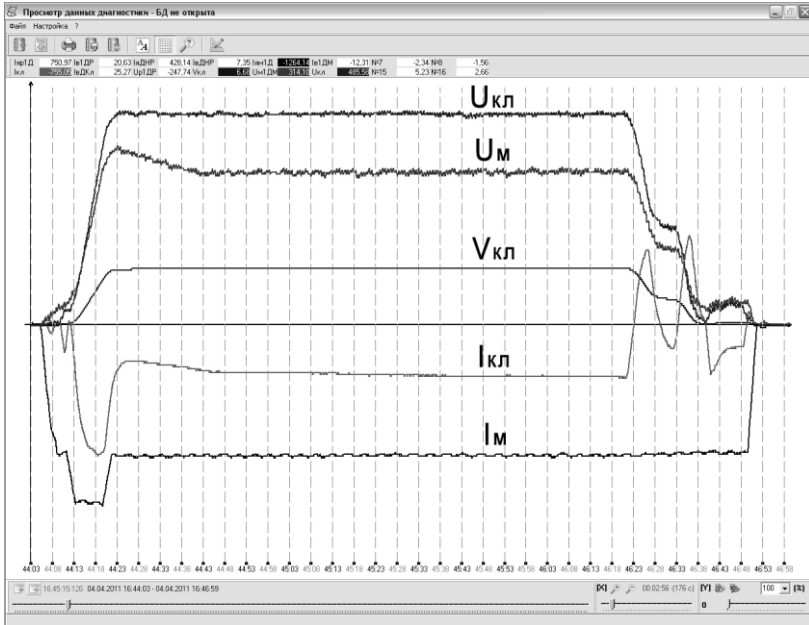


Рисунок 4.7 – Усредненные электромеханические процессы дроссировочного стана

Анализ полученных результатов можно использовать при настройке и контроле системы управления как отдельного оборудования, так и электромеханического комплекса в целом.

Глава 5. МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА ПРИМЕРЕ ДРЕССИРОВОЧНОГО СТАНА

5.1. Краткая характеристика оборудования дрессировочного стана 1700

Дрессировочный стан 1700 состоит из четырехвалковой клетки и обслуживающего её оборудования: цепного транспортера с кантователем, загрузочной тележки с подъемным столом, разматывателя, подающих роликов, натяжного устройства, моталки, снимателя рулонов, механизма переноса рулонов, цепного транспортера за станом.

Цепной транспортер с кантователем предназначен для транспортировки рулонов из термического отделения или со склада дрессировочного отделения к сану и кантовки их из вертикального положения в горизонтальное.

Загрузочная тележка с подъемным столом предназначена для снятия рулонов с кантователя, подачи их к барабану разматывателя и надевания на него.

Разматыватель предназначен для правильной установки рулона относительно продольной оси стана и создания заднего натяжения полосы в процессе дрессировки. Разматыватель состоит из барабана (диаметр барабана 690-770 мм), прижимного устройства и механизма центрирования рулона. Мощность электродвигателя 150 кВт (установлено 2 двигателя), 300-1200 об/мин, максимальное натяжение полосы – 1500 кг.

Подающие ролики предназначены для подачи конца разматываемой полосы в валки натяжного устройства, которое предназначено для создания дополнительного натяжения полосы во время дрессировки и установлено с передней стороны клетки. Состоит из двух валков диаметром 500 мм, привод каждого валка от электродвигателя мощностью 180 кВт, 750-1500 об/мин.

Рабочая клеть стана оснащена двумя двигателями по 660 кВт каждый, 450-1200 об/мин, допускаемое давление металла на валки 500 т, максимальная скорость – 20 м/с. Электродвигатели нажимных устройств соединены муфтой для обеспечения совместной или раздельной работы нажимных винтов. Контроль движения винтов осуществляется при помощи сельсина БД-501А.

Моталка барабанного типа установления с задней стороны клетки, предназначена для натяжения и сматывания полосы в рулон. Максимальный диаметр барабана моталки – 750 мм, скорость наматывания полосы – 20 м/с, число оборотов барабана моталки – 207-664 об/мин, натяжение полосы – до 5 тонн, привод от двигателя мощностью 630 кВт, 500-1000 об/мин.

Дрессировке подвергаются холоднокатанные отожжённые полосы таких групп сталей: углеродистые кипящие и полуспокойные – качественные и обыкновенного качества общего назначения; нестареющая сталь 08ю; низколегированные стали; легированные стали.

Размеры полос 0,5-2,5х850-1500 мм. Величины степени деформации при дрессировке полос, согласно технологической карте №3 приведены в табл. 5.1.

Таблица 5.1 – Величина степени деформации

Вид стали	Величина деформации
Углеродистая кипящая и полуспокойная сталь	0,8-1,2 %
Стали марки 08ю	0,8-1,2 %
Углеродистая спокойная сталь всех толщин	Не более 1,5 %
Низколегированная товарная сталь	Не более 2%
Легированная сталь	Не более 3%
Заготовки для гнутых профилей	Не более 2%

Величина степени деформации при дрессировке регистрируется самопишущими приборами ИРО-1, установленными на постах станов.

При выходе из рабочей клетки передний конец полосы подается к моталке и заправляется в зев её барабана, откидная опора закрывается, затем включается нажимное устройство и опускаются верхние валки на величину, обеспечивающую необходимое обжатие полосы, создается необходимое натяжение между размотателем и валками. Включаются двигатели натяжного устройства, которые работают в генераторном режиме. Двигатель размотателя также включается в генераторный режим. Нижний холостой ролик опускается в нижнее положение, а все механизмы стана переводятся на максимальную для данного режима дрессировки скорость. Замедление и остановка стана производится вальцовщиком. При изменении скорости дрессировки вальцовщик регулирует обжатия с помощью нажимных винтов.

5.2. Анализ показателей существующей системы управления натяжением (достоинства и недостатки)

Регулируемые электроприводы постоянного тока по системе генератор-двигатель широко использованы для главных приводов клеток непрерывных, реверсивных и дрессировочных станов холодной прокатки. Одним из стимулов к применению таких электроприводов была

возможность использования мощных синхронных приводных двигателей преобразовательных агрегатов этих прокатных станов, как источников реактивной энергии, для улучшения энергетических показателей питающей сети [8, 23].

Генератор постоянного тока является усилителем мощности, входным сигналом которого является напряжение возбуждения генератора. Основным видом возбудителей генератора является вентильный преобразователь, который обеспечивает высокое быстродействие и коэффициент усиления мощности.

При сравнении системы Г-Д с ТП-Д видно [1], что в системе Г-Д появляется дополнительное аperiodическое звено с постоянной времени обмотки возбуждения генератора T и коэффициентом K . Таким образом, в контуре появляется дополнительная большая постоянная времени T , которая также подлежит компенсации, как и постоянная времени якорной цепи $T_{я}$ [1].

Можно отказаться от компенсации постоянной времени $T_{я}$, которая является меньше T , положив $T_M = T_{\mu} + T_{я}$. Частота среза контура является достаточно низкой, что соответствует понижению скорости контура и уменьшению точности регулирования. Это ухудшение свойств контура регулирования тока тем больше, чем больше $T_{я}$. Поэтому для компенсации влияния $T_{я}$ на качество регулирования тока и момента в системе Г-Д вводят подчиненный контур регулирования ЭДС генератора.

При дрессировке особое внимание обращается на натяжение полосы. Натяжение полосы контролируется при постоянной скорости стана по показаниям амперметров и должно быть постоянным в течении всего времени дрессировки полосы.

САР каждого валка дрессировочной клетки содержит три контура: контур напряжения генератора с ПИ-регулятором напряжения, контур тока якоря с ПИ-регулятором тока и контур скорости с пропорциональным регулятором ЭДС.

Для надежного гашения остаточного потока возбуждения генератора и предотвращения эффекта «ползучей» скорости электродвигателя при его остановке, в САР вводится дополнительная обратная связь по напряжению генератора. Она подключается коммутатором на вход регулятора возбуждения при выполнении одного из двух условий – нулевой сигнал задания скорости на входе регулятора скорости или размыкание силовой цепи системы Г-Д.

Параметры цепи обратной связи по напряжению генератора выбираются таким образом, чтобы обеспечить надежное гашение остаточного потока возбуждения генератора и одновременно –

устойчивость при введении в режиме гашения поля замкнутого контура регулирования напряжения генератора [8].

В случае, когда к настройке контура регулирования ЭДС двигателя не предъявляются требования обеспечения высокого быстродействия, регулятор ЭДС выполняется интегральным. Его постоянная интегрирования определяет частоту среза ЛАЧХ контура регулирования ЭДС и, соответственно, быстродействие этого контура.

Если же, в соответствии с технологическими требованиями, необходимо обеспечить высокое быстродействие контура регулирования ЭДС, то эта задача может быть решена применением ПИ-регулятора ЭДС. Форсирующая составляющая регулятора при этом должна компенсировать влияние эквивалентной постоянной времени замкнутого контура регулирования тока возбуждения электродвигателя.

5.3. Моделирование существующей системы управления натяжением

Натяжение полосы создается при помощи электроприводов намоточно-размоточных устройств. ЭП моталки работает в двигательном режиме, обеспечивая выходное натяжение полосы. Двигатель размотывателя работает в генераторном режиме. Тянущим двигателем для размотывателя является двигатель прокатной клетки.

Используя компьютерные модели механизма прокатной клетки, намоточно-размоточного механизма, двигателя постоянного тока, блоки, имитирующие упругие связи двигателя и исполнительного механизма, а также прокатываемой полосы составим компьютерную модель [8] системы управления прокатной клетью и наматывающим механизмом.

САР моталки выполнена двухзонной. Управление по цепи якоря осуществляется при помощи двухконтурной системы: внутренний контур тока, внешний – ЭДС (рисунок 5.2). Управление по цепи возбуждения осуществляется системой управления по напряжению. Пунктиром выделены структурные блоки основных частей данной системы (рисунок 5.1).

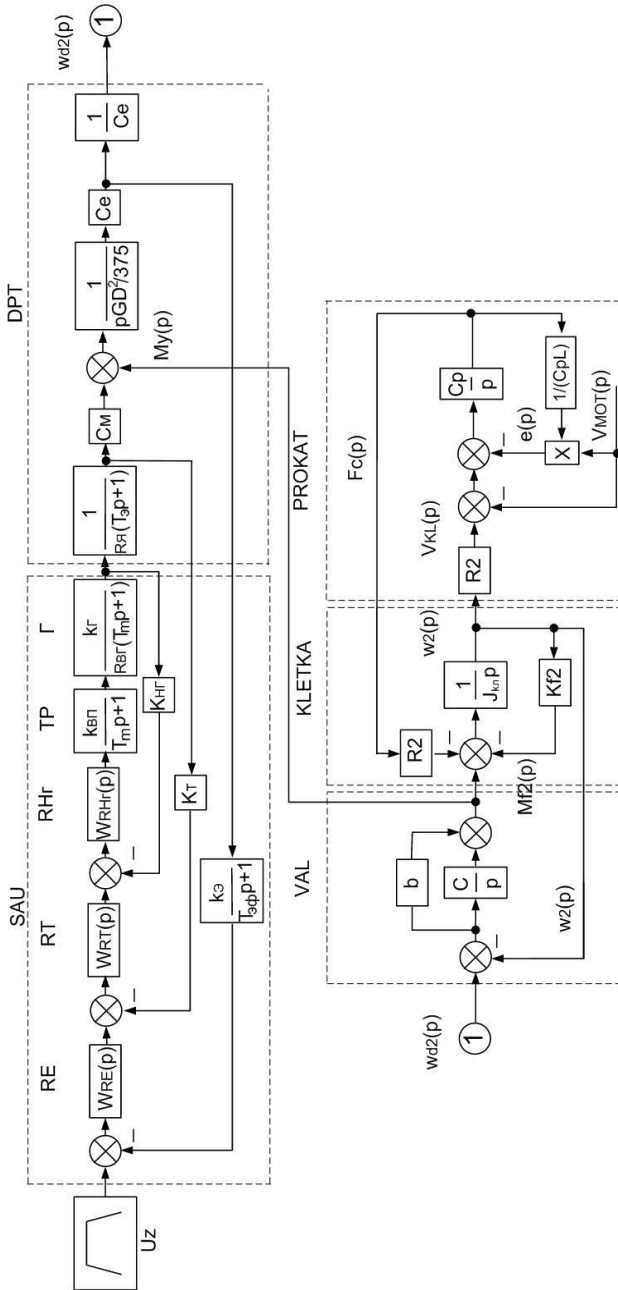


Рисунок 5.1 – Структурная схема электропривода прокатной клетки с учетом упругостей первого и второго рода с системой автоматического управления «генератор-двигатель»

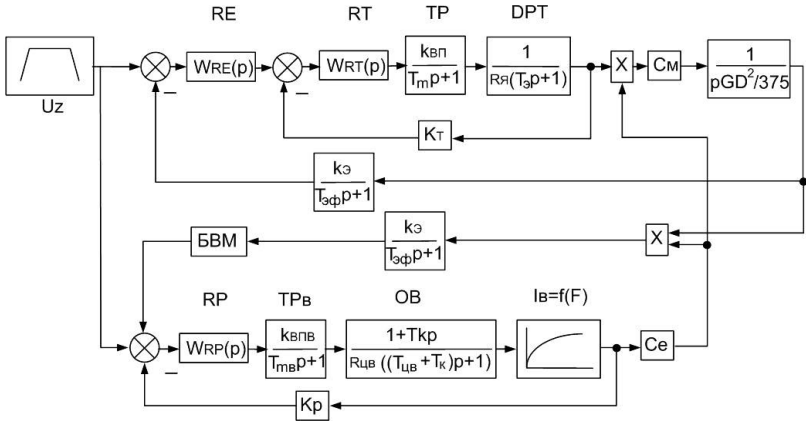


Рисунок 5.2 - Функциональная схема электропривода наматывающего устройства с двухзонной системой автоматического управления

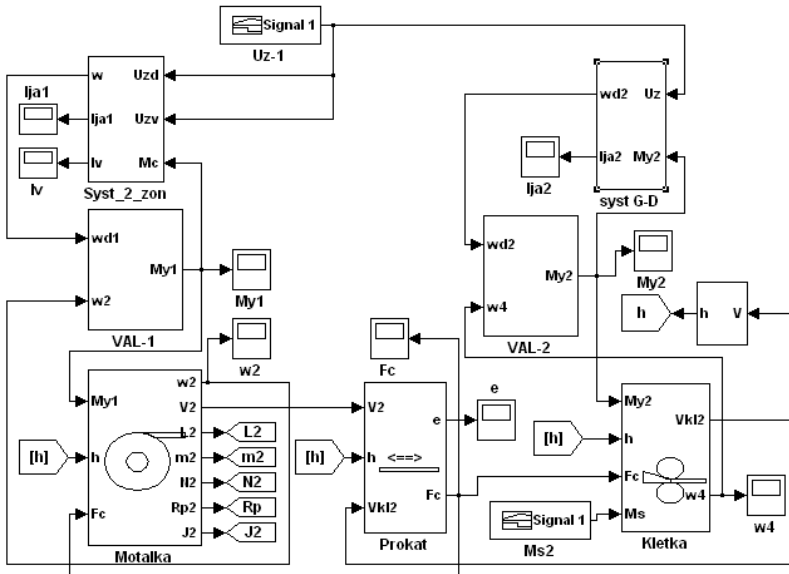


Рисунок 5.3 – Модель ЭП металки и клетки с учетом упругостей первого и второго рода

САР прокатной клетки содержит три контура: контур напряжения генератора с ПИ-регулятором напряжения, контур тока якоря с ПИ-регулятором тока и контур скорости и П-регулятором ЭДС (рисунок 5.2).

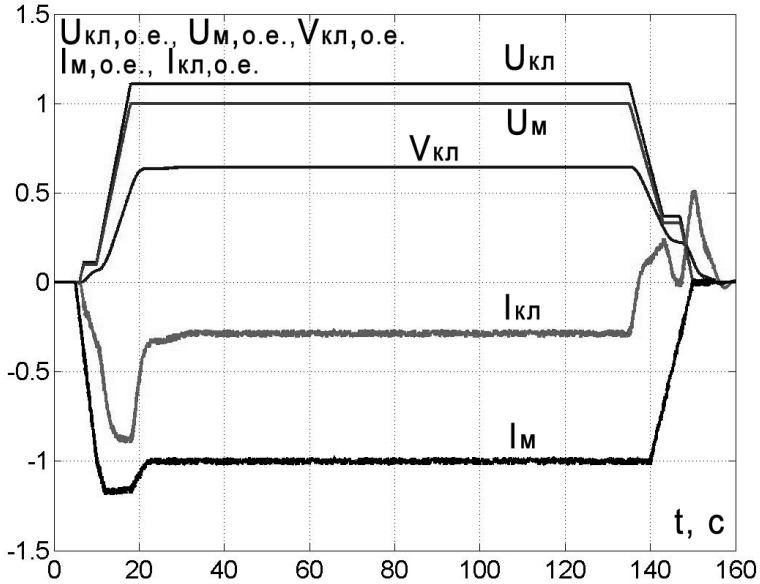


Рисунок 5.4 – Результаты моделирования

На рисунках 5.3, 5.4 показаны модель ЭП моталки и клетки с существующими системами управления, результаты моделирования [27] (ток якоря клетки, линейная скорость движения полосы, напряжение двигателя клетки, напряжения двигателя моталки, ток якоря моталки, ток возбуждения моталки).

5.4. Проверка адекватности моделей

Путем проведения пассивного эксперимента с использованием диагностирующего многоканального комплекса собраны данные электромеханических процессов дрессировочного одноклетевого стана 1700 для произвольно выбранных рулонов и смен (таблицы 5.2 и 5.3).

Чтобы определить эталонные значения измеряемых величин, вычислим среднее статистическое результатов измерений

$$\bar{a} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_i, \quad (5.1)$$

где n – число измерений; a_i – результаты измерений в одинаковых условиях.

Исследованы следующие режимы работы: разгон до заправочной скорости, разгон до рабочей скорости, работа в установившемся режиме, торможение до пониженной скорости, торможение до полной остановки.

Контрольными точками выбраны t_1, t_2, t_3 – переход на заправочную, рабочую и пониженную скорости соответственно; $I_{яМ}$, $I_{еМ}$, U_M – ток якоря, ток возбуждения и напряжение моталки; $I_{кл}$, I_{kl} , U_{kl} – ток якоря, ток возбуждения и напряжение клетки: (1) – при достижении заправочной скорости, (2) – при достижении рабочей скорости, (3) – при достижении пониженной скорости.

Для проверки адекватности разработанных моделей были осуществлено моделирование переходных процессов в основных режимах работы дрессировочного одноклетевого стана 1700 и выполнено их сравнение с вычисленными среднестатистическими значениями.

На рисунке 5.5 показаны переходные процессы, полученные на модели, а на рисунке 5.6 – усредненные экспериментальные переходные процессы наиболее схожие с рассчитанными средними статистическими данными.

В таблицах 5.4, 5.5 приведены координаты переходных процессов в контрольных точках и дана оценка относительной погрешности моделей.

Относительной погрешностью ε_A измеряемой величины A принято называть отношение абсолютной погрешности ΔA к истинному значению A . В качестве наилучшей оценки относительной погрешности ε_A используется отношение ΔA к среднестатистическому значению \bar{a}

$$\varepsilon_A = \frac{\Delta A}{\bar{a}}. \quad (5.2)$$

Сравнение полученных на модели и экспериментальных значений показывает, что относительная погрешность не превышает 8,12 %.

Согласно (5.1) рассчитана средняя статистическая относительная погрешность всей модели $\bar{a}_m = 3,79$ %.

Таблица 5.2 – Экспериментальные данные моталки

Контрольные точки	Численные значения выборки										Среднее статистическое
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
$I_{gM}(1), (A)$	180	170	190	200	180	210	220	200	190	200	194
$I_{gM}(2), (A)$	1400	1400	1450	1500	1550	1600	1650	1550	1500	1550	1680
$I_{gM}(3), (A)$	700	700	750	800	700	850	900	850	850	850	795
$I_{gM}(1), (A)$	21	21	22	23	21	23	24	23	22	23	22,3
$I_{gM}(2), (A)$	21	21	22	23	21	23	24	23	22	23	22,3
$I_{gM}(3), (A)$	0,21	0,21	0,22	0,23	0,21	0,23	0,24	0,23	0,22	0,23	0,22
$U_M(1), (B)$	12	12,5	14	14	12	14	14,5	12,5	12	12,5	13
$U_M(2), (B)$	100	110	115	115	105	115	115	112	110	110	110,7
$U_M(3), (B)$	50	55	60	65	50	70	75	65	60	65	61,5
$t_1, (c)$	2	3	4	5	2	6	6	5	4	5	4,2
$t_2, (c)$	17	18	19	20	17	21	21	20	19	20	19,2
$t_3, (c)$	145	145	146	147	145	148	148	147	146	147	146,4

Таблица 5.3 – Экспериментальные данные клетки

Контрольные точки	Численные значения выборов										Среднее статистическое
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
$I_{kl}(1), (A)$	60	61	62	63	60	64	64	63	62	63	62,2
$I_{kl}(2), (A)$	600	605	610	615	600	620	620	615	610	615	611
$I_{kl}(3), (A)$	490	495	500	505	490	510	510	505	500	505	501
$U_{kl}(1), (B)$	4,5	4,6	4,65	4,7	4,5	4,75	4,75	4,7	4,65	4,7	4,65
$U_{kl}(2), (B)$	450	460	465	470	450	475	475	470	465	470	465
$U_{kl}(3), (B)$	225	230	232	235	225	237	237	235	232	235	232,3
$V_{kl}(1), (M/c)$	1,8	1,9	2	2	1,8	2,1	2,1	2	2	2	1,97
$V_{kl}(2), (M/c)$	18	19	20	20	18	21	21	20	20	20	19,7
$V_{kl}(3), (M/c)$	9	9,5	10	10	9	10,5	10,5	10	10	10	9,85
$t_1, (c)$	2	3	4	5	2	6	6	5	4	5	4,2
$t_2, (c)$	17	18	19	20	17	21	21	20	19	20	19,2
$t_3, (c)$	145	145	146	147	145	148	148	147	146	147	146,4

Таблица 5.4 – Результаты проверки адекватности модели моталки

Контрольные точки	Значение на осциллограмме	Значение на модели	Относительная погрешность
$I_{\dot{y}M} (1), (A)$	190	191	0,5 %
$I_{\dot{y}M} (2), (A)$	1660	1650	0,59 %
$I_{\dot{y}M} (3), (A)$	795	790	0,62 %
$I_{\dot{a}M} (1), (A)$	22,3	21,5	3,59 %
$I_{\dot{a}M} (2), (A)$	22,3	21,5	3,59 %
$I_{\dot{a}M} (3), (A)$	0,22	0,21	3,59 %
$U_M (1), (B)$	13	14	7,69 %
$U_M (2), (B)$	110,7	112	1,17 %
$U_M (3), (B)$	61	65	6,5 %
$t_1, (c)$	4,8	5	4,76 %
$t_2, (c)$	19	20	5,2 %
$t_3, (c)$	145	150	3,41 %

Таблица 5.5 – Результаты проверки адекватности модели клетки

Характерные точки	Значение на осциллограмме	Значение на модели	Относительная погрешность
$I_{kl} (1), (A)$	65	60	8,03 %
$I_{kl} (2), (A)$	605	620	2,45 %
$I_{kl} (3), (A)$	500	510	1,99 %
$U_{kl} (1), (B)$	4,3	4,5	4,3 %
$U_{kl} (2), (B)$	470	460	2,15 %
$U_{kl} (3), (B)$	230	235	2,15 %
$V_{kl} (1), (M/c)$	2	1,9	5,07 %
$V_{kl} (2), (M/c)$	20	19	5,07 %
$V_{kl} (3), (M/c)$	9	9,8	8,12 %
$t_1, (c)$	4,7	4,9	4,76 %
$t_2, (c)$	20	21	5,2 %
$t_3, (c)$	148	147	0,68 %

Таким образом, можно сделать вывод об адекватности разработанных математических и компьютерных моделей главных приводов, систем автоматического управления, исполнительных механизмов и переходных процессов реальному оборудованию и графикам переходных процессов дрессировочного стана 1700-1 цеха холодной прокатки №1 ОАО «Запорожсталь».

Глава 6.

ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ НАТЯЖЕНИЕМ ПРОКАТЫВАЕМОЙ ПОЛОСЫ ДРЕССИРОВОЧНОГО СТАНА 1700

6.1. Синтез алгоритма управления скоростью клетки

Большое количество ЭП по системе Г-Д в настоящее время успешно эксплуатируются в различных отраслях промышленности. В металлургии они используются не только на станах холодной прокатки, но и на обжимных станах горячей прокатки. Повышение производительности этих агрегатов, благодаря уменьшению времени внеплановых простоев, и улучшение качества выпускаемой продукции за счет улучшения процесса регулирования координат электропривода, непосредственно связаны с необходимостью коренной модернизации рассматриваемых электроприводов. Она может быть выполнена без существенных капитальных затрат и поэтому предпочтительна.

Задача управления нестационарными объектами в условиях действия координатных возмущений стала причиной построения систем, устойчивых при неограниченном увеличении коэффициента усиления, гарантирующих апериодический переходный процесс с минимально возможной постоянной времени на траекториях управляемого движения и нулевую статическую ошибку. Такой подход в области линейных законов управления позволил значительно снизить чувствительность системы к внешним возмущениям, обеспечить достаточно высокие возможности компенсации параметрических возмущений [7].

Основное требование, которое предъявляется к электроприводу ведущего механизма, в рассматриваемом случае к прокатной клетке, - это качественная отработка управляющих команд оперативного персонала: разгон и замедление агрегата с заданным темпом и поддержание заданной величины скорости. Последнее требование существенно влияет на производительность агрегата. Требуемая точность поддержания скорости определяется абсолютной величиной максимальной скорости работы агрегата [7].

При составлении уравнений динамики двухмассовой системы с упругими связями первого рода принято, что демпфирование свободных колебаний осуществляется за счет сил внешнего вязкого трения, которое в первом приближении пропорционально скоростям соответствующих масс.

На основании известных выражений (2.47) применительно к двухмассовому объекту управления, изображенном на рисунке 2.13, система уравнений динамики в поэлементной форме примет вид [34].

$$\left. \begin{aligned}
 p\varphi_4 &= \omega_4; \\
 p\omega_4 &= -\frac{1}{J_{kl}}M_4 + \frac{C_2}{J_{kl}}(\varphi_2 - \varphi_4) + \frac{b_2}{J_{kl}}(\omega_2 - \omega_4) - \frac{k_{f4}}{J_{kl}}\omega_4; \\
 p\varphi_2 = \omega_2; \quad p\omega_2 &= \frac{1}{J_{d2}i_{p2}}M_{d2} - \frac{C_2}{J_{d2}}(\varphi_2 - \varphi_4) - \frac{b_2}{J_{d2}}(\omega_2 - \omega_4) - \frac{k_{f2}}{J_{d2}}\omega_2; \\
 pM_{d2} &= -\frac{1}{T_{d2}}M_{d2} - \frac{(C\Phi_2)^2}{R_{d2}T_{d2}i_{p2}}\omega_2 + \frac{C\Phi_2}{R_{d2}T_{d2}}U_{d2}; \\
 pU_{d2} &= -\frac{1}{T_{\mu 2}}U_{d2} + \frac{k_{B2}}{T_{\mu 2}}U_{y2},
 \end{aligned} \right\} (6.1)$$

где φ_2 и φ_4 - углы закручивания торцов шпинделя; ω_2 и ω_4 - угловые скорости торцов шпинделя; M_4 - момент нагрузки; M_{d2} - электромагнитный момент приводного двигателя; U_{d2} и U_{y2} - напряжение на выходе и входе преобразователя соответственно; J_{d2} - момент инерции двигателя и редуктора, J_{kl} - момент инерции прокатной клетки; C_2 - жесткость шпинделя; b_2 - коэффициент внутреннего демпфирования, пропорциональный рассогласованию угловых скоростей двух смежных масс; k_{f2}, k_{f4} - коэффициенты вязкого трения; i_{p2} - передаточное число редуктора; T_{d2} - электромагнитная постоянная времени электропривода; R_{d2} - сопротивление якорной цепи; $C\Phi$ - конструктивный коэффициент электродвигателя; $T_{\mu 2}$ - постоянная времени управляемого преобразователя; k_{B2} - коэффициент усиления управляемого преобразователя.

Структурная схема механической части клетки в виде двухмассовой электромеханической системы с упругостями первого рода, составленная на основании системы уравнений (6.1), приведена на рисунке 6.1.

Для облегчения обобщенного исследования упругодиссипативного объекта управления целесообразно осуществить направленное нормирование системы (6.1).

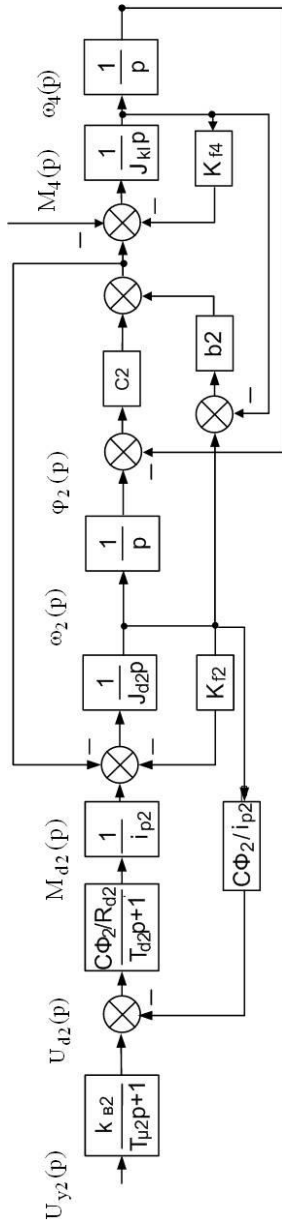


Рисунок 6.1 — Структурная схема механической части клетки в виде двухмассовой электромеханической системы с упругостями первого рода

Примем в качестве базовых переменных U_{max} - максимальное напряжение питания двигателя; ω_{max} - скорость идеального холостого хода двигателя; M_{max} - момент короткого замыкания двигателя при напряжении U_{max} , φ_{max} - максимальный угол поворота вала. Базовые величины подчиняются следующим соотношениям:

$$\varphi_{max} = \omega_{max} \cdot t \Big|_{t=1c}; \quad \omega_{max} = \frac{U_{max}}{C\Phi} i_p;$$

$$M_{max} = C\Phi_2 \frac{U_{max}}{R_{d2}}; \quad U_{max} = k_{B2} \cdot U_{y2max}.$$

Введем новые переменные состояния: y_1, \dots, y_k , которые подчиняются соотношениям:

$$y_1 = \frac{\varphi_4}{\varphi_{max}}; \quad y_2 = \frac{\omega_4}{\omega_{max}}; \quad y_3 = \frac{\varphi_2}{\varphi_{max}}; \quad y_4 = \frac{\omega_2}{\omega_{max}}; \quad y_5 = \frac{M_{d2}}{M_{max}}; \quad y_6 = \frac{U_{d2}}{U_{max}}.$$

С учетом этих переменных состояния система уравнений (6.1) преобразуется к виду

$$\left. \begin{aligned} p y_1 &= y_2; \\ p y_2 &= a_{21} y_1 + a_{22} y_2 + a_{23} y_3 + a_{24} y_4; \\ p y_3 &= y_4; \\ p y_4 &= a_{41} y_1 + a_{42} y_2 + a_{43} y_3 + a_{44} y_4 + a_{45} y_5; \\ p y_5 &= a_{54} y_4 + a_{55} y_5 + a_{56} y_6; \\ p y_6 &= a_{66} y_6 + m_6 u, \end{aligned} \right\} \quad (6.2)$$

где

$$a_{21} = -\frac{C_2}{J_{kl}}; \quad a_{22} = -\frac{b_2}{J_{kl}} - \frac{k_{f4}}{J_{kl}}; \quad a_{23} = \frac{C_2}{J_{kl}}; \quad a_{24} = \frac{b_2}{J_{kl}}; \quad a_{41} = -\frac{C_2}{J_{d2}}$$

$$a_{42} = \frac{b_2}{J_{d2}}; \quad a_{43} = \frac{C_2}{J_{d2}}; \quad a_{44} = -\frac{b_2}{J_{d2}} - \frac{k_{f2}}{J_{d2}}; \quad a_{54} = -\frac{1}{T_{d2}}; \quad a_{55} = -\frac{1}{T_{d2}};$$

$$a_{56} = \frac{1}{T_{d2}}; \quad a_{66} = -\frac{1}{T_{\mu 2}}; \quad m_6 = \frac{1}{T_{\mu}}.$$

Из множества траекторий движения системы (6.2) выделим невозмущенное движение под действием программного управления u^* как решение дифференциальных уравнений

$$\left. \begin{aligned} py_1^* &= y_2^*; \\ py_2^* &= a_{21}y_1^* + a_{22}y_2^* + a_{23}y_3^* + a_{24}y_4^*; \\ py_3^* &= y_4^*; \\ py_4^* &= a_{41}y_1^* + a_{42}y_2^* + a_{43}y_3^* + a_{44}y_4^* + a_{45}y_5^*; \\ py_5^* &= a_{54}y_4^* + a_{55}y_5^* + a_{56}y_6^*; \\ py_6^* &= a_{66}y_6^* + m_6u^*. \end{aligned} \right\} \quad (6.3)$$

Реальное движение объекта управления отличается от желаемого на величину отклонения

$$\eta_k = y_k - y_k^*, (k = 1, \dots, 6). \quad (6.4)$$

Вычтя из системы (6.2) систему (6.3) с учетом обозначений (6.4), получим систему дифференциальных уравнений возмущенного движения

$$\left. \begin{aligned} p\eta_1 &= \eta_2; \\ p\eta_2 &= a_{21}\eta_1 + a_{22}\eta_2 + a_{23}\eta_3 + a_{24}\eta_4; \\ p\eta_3 &= \eta_4; \\ p\eta_4 &= a_{41}\eta_1 + a_{42}\eta_2 + a_{43}\eta_3 + a_{44}\eta_4 + a_{45}\eta_5; \\ p\eta_5 &= a_{54}\eta_4 + a_{55}\eta_5 + a_{56}\eta_6; \\ p\eta_6 &= a_{66}\eta_6 + M_6U, \end{aligned} \right\} \quad (6.5)$$

где $U = u - u^*$ - дополнительное стабилизирующее управление, представляющее собой отклонение реального управляющего воздействия u от программного u^* .

Для решения задачи аналитического конструирования регуляторов необходимо задаться функционалом качества.

Общих правил выбора критериев качества для различных управляемых объектов не существует и назначение критерия оптимальности в каждом конкретном случае является самостоятельной задачей. Функционал качества должен выбираться таким образом, чтобы

он, с одной стороны, наилучшим образом характеризовал цель управления, а с другой стороны, конкретная вариационная задача должна быть аналитически разрешимой. Функционал можно рассматривать как функцию особого рода, в которой роль независимой переменной играет другая функция.

В настоящее время в теории и практике оптимального управления широкое распространение получили интегральные функционалы

$$I = \int_{t_0}^{t_1} F(\eta_1, \dots, \eta_n, U_1, \dots, U_j) dt = \text{extremum} \quad (6.6)$$

Для систем управления, динамика которых описывается дифференциальными уравнениями возмущенного движения (6.5), функционал (6.7) задает цель управления, которая определяется видом функции F.

Для придания синтезируемой системе астатических свойств дополним систему (6.5) уравнением

$$p\eta_0 = \eta_2$$

и примем в качестве критерия оптимальности системы управления скоростью вращения валков клетки интегральный квадратичный функционал [7]

$$I_1 = \int_0^{\infty} \left\{ \left(\left(\frac{v_{06}}{p} + v_{26} \right) \eta_2 + v_{16}\eta_1 + v_{36}\eta_3 + v_{46}\eta_4 + v_{56}\eta_5 + v_{66}\eta_6 \right)^2 + CU^2 \right\} dt. \quad (6.7)$$

В подынтегральном выражении функционала (6.7) $v_{i6}, i=0,1,\dots,6$ - коэффициенты функции Ляпунова

$$V = \sum_{i,j=0}^6 v_{ij}\eta_i\eta_j, \quad (6.8)$$

которые связаны с параметрами объекта управления (6.5) соотношениями [7]

$$v_{06} = \Delta, \quad v_{i6} = M_{i2}(\Delta), \quad (6.9)$$

где

$$\Delta = \begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} & a_{45} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{54} & a_{55} & a_{56} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{66} \end{vmatrix}, \quad (6.10)$$

$M_{i2}(\Delta)$ - минор i -го элемента второго столбца определителя (6.10).

Первое слагаемое подынтегрального выражения функционала (6.7) представляет собой взвешенную с помощью коэффициентов функции Ляпунова сумму площадей, ограниченных квадратами отклонений координат истинного движения от координат программного движения по каждой переменной состояния. Введение под интеграл второго слагаемого, с одной стороны, означает достижение оптимальности гашения возмущенного движения при ограничении затрат энергии на управление, а с другой – обеспечивает поиск оптимального управления среди множества допустимых линейных функций, подчиненных ограничению

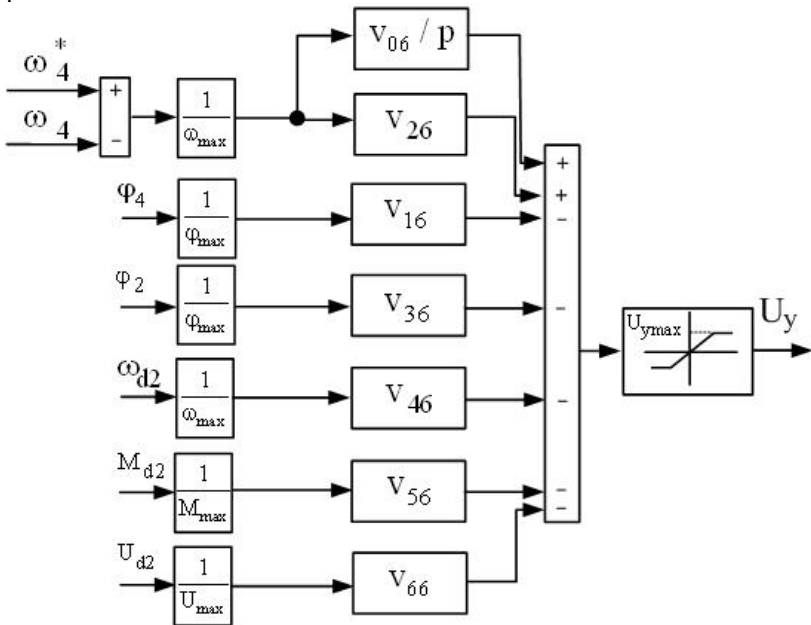


Рисунок 6.2 – Структурная схема регулятора скорости клетки, реализующего алгоритм (6.11)

$$|U| \leq 1.$$

Такой функционал минимизируется оптимальным управлением [34]

$$U_y = U_{y_{max}} \text{sat} \left(\left(\frac{v_{06}}{p} + v_{26} \right) (\omega_4^* - \omega_4) - v_{16} \varphi_4 - v_{36} \varphi_2 - v_{46} \omega_2 - v_{56} I_{d2} - v_{66} U_{d2} \right), \quad (6.11)$$

где $\text{sat}(\cdot)$ - нелинейная функция типа «насыщение».

После перехода к исходным переменным состояния объекта управления регулятор скорости, согласно алгоритму (6.11), примет вид, приведенный на рисунке 6.2.

6.2. Синтез алгоритмов управления натяжением прокатываемой полосы металла

На основании систем уравнений, описывающих двухмассовую систему с упругостями первого и второго рода (2.46, 2.54), система уравнений в поэлементной форме принимает вид [35]

$$\left. \begin{aligned} pFc &= C_p R_1 \omega_3 - C_p R_2 \omega_4 - \frac{F_c R_2 \omega_4}{L}; \\ p\omega_3 &= \frac{1}{J_M} M_{13} + \frac{b_1 (\omega_1 - \omega_3)}{J_M} - \frac{F_c R_1}{J_M} - \frac{k_{f3} \omega_3}{J_M}; \\ pM_{13} &= C_1 (\omega_1 - \omega_3); \\ p\omega_1 &= \frac{1}{J_{d1} i_{p1}} M_{d1} - \frac{1}{J_{d1}} M_{13} - \frac{k_{f1}}{J_{d1}} \omega_1; \\ pM_{d1} &= \frac{C \Phi_1}{R_{d1} T_{d1}} U_{d1} - \frac{1}{T_{d1}} M_{d1} - \frac{(C \Phi_1)^2}{R_{d1} T_{d1} i_{p1}} \omega_1; \\ pU_{d1} &= \frac{k_{B1}}{T_{\mu 1}} U_{y1} - \frac{1}{T_{\mu 1}} U_{d1}, \end{aligned} \right\} \quad (6.12)$$

где ω_{d1} - угловая скорость двигателя М1; ω_1, ω_3 - угловые скорости торцов шпинделя; ω_4 - угловая скорость валков клетки; J_{d1} - момент инерции ротора двигателя М1 и редуктора, J_M - момент инерции

моталки; M_{f1} , M_{f3} - моменты внешнего трения; M_{13} - упругий момент; C_1 - жесткость упругого элемента; C_p - жесткость транспортируемого материала; b_1 - коэффициент внутреннего демпфирования; F_C - сила натяжения прокатываемой полосы; L - расстояние между осями вращающихся механизмов; i_p - передаточное число редуктора, R_1 - радиус рулона; R_2 - радиус вала клетки; k_{B1} , $T_{\mu 1}$ - коэффициент усиления и постоянная времени управляемого преобразователя; U_{d1}, U_{y1} - напряжения на выходе и входе управляемого преобразователя питания двигателя М1.

Для облегчения обобщенного исследования упругодиссипативного объекта управления целесообразно осуществить направленное нормирование системы (6.12). В качестве базовых переменных приняты U_{max} - максимальное напряжение управления преобразователем; ω_{max} - скорость идеального холостого хода двигателя; M_{max} - момент короткого замыкания двигателя при напряжении U_{max} ; F_{max} - технологически максимально допустимое натяжение полосы.

$$\omega_{max} = \frac{U_{max}}{C\Phi_1} i_{p1}; M_{max} = C\Phi_1 \frac{U_{max}}{R_{d1}}; U_{max} = k_{B1} \cdot U_{y1max}.$$

Тогда система уравнений (6.12) преобразуется к виду

$$py_i = \sum_{k=1}^6 a_{ik} y_k + C + m_6 u, \quad (i=1, \dots, 6), \quad (6.13)$$

где

$$y_1 = \frac{F_c}{F_{max}}; y_2 = \frac{\omega_3}{\omega_{max}}; y_3 = \frac{M_{13}}{M_{max}}; y_4 = \frac{\omega_{d1}}{\omega_{max}}; y_5 = \frac{M_{d1}}{M_{max}}; y_6 = \frac{U_{d1}}{U_{max}};$$

$$a_{11} = -\frac{R_2 \omega_4}{L}; a_{12} = C_p R_1 \frac{\omega_{max}}{F_{max}}; a_{21} = -\frac{R_1 F_{max}}{J_M \omega_{max}}; a_{22} = -\left(\frac{b_1}{J_M} + \frac{k_{f3}}{J_M} \right);$$

$$a_{23} = \frac{M_{max}}{J_M \omega_{max}}; a_{24} = \frac{b_1}{J_M}; a_{32} = -\frac{C_1 \omega_{max}}{M_{max}}; a_{34} = \frac{C_1 \omega_{max}}{M_{max}};$$

$$a_{44} = -\frac{k_{f1}}{J_{d1}}; a_{45} = \frac{M_{max}}{J_{d1} \omega_{max}}; a_{54} = -\frac{1}{T_{d1}}; a_{55} = -\frac{1}{T_{d1}};$$

$$a_{56} = \frac{I}{T_{d1}}; a_{66} = -\frac{I}{T_{\mu}}; m_6 = \frac{I}{T_{\mu}}. \quad (6.14)$$

Из множества траекторий движения системы (6.13) выделим невозмущенное движение под действием программного управления u^* как решение дифференциальных уравнений

$$p y_i^* = \sum_{k=1}^6 a_{ik} y_k^* + C + m_6 u^*, \quad (i=1, \dots, 6). \quad (6.15)$$

Реальное движение объекта управления отличается от желаемого на величину отклонения

$$\eta_k = y_k - y_k^*, \quad (k=1, \dots, 6). \quad (6.16)$$

Тогда возмущенного движение объекта управления (6.12), полученные путем вычитания уравнений (6.15) из уравнений (6.13) можно представить следующим образом

$$p \eta_i = \sum_{k=1}^6 a_{ik} \eta_k + m_6 U, \quad (i=1, \dots, 6), \quad (6.17)$$

где $U = u - u^*$ - дополнительное стабилизирующее управление, представляющее собой отклонение реального управляющего воздействия u от программного u^* ; a_{ik}, m_6 - коэффициенты.

Для синтезируемой системы уравнений качество управления может быть задано функционалом Летова

$$I = \int_0^{\infty} \left(\sum_{i,k=0}^6 w_{ik} \eta_i \eta_k + c U^2 \right) dt, \quad w_{ik} = w_{ki}, \quad (6.18)$$

экстремальное значение, которому на траекториях движения (6.17) доставляет оптимальное управление

$$U = -sat \frac{g}{m_6} \sum_{i=0}^6 v_{i6} \eta_i, \quad (6.19)$$

гарантируя при этом экспоненциальный характер управляемого движения регулируемой переменной $\eta_l = -\exp\left(\frac{1}{g}t\right)$ при траектории не возмущенного движения $y_l^* = I(t)$ и обеспечивая замкнутой системе астатические свойства за счет наличия в своем составе интегральной составляющей $\eta_0 = \frac{1}{p}\eta_l$ [7].

Оптимальное управление (6.19) в развернутом виде

$$U = -sat \frac{g}{m_6} (v_{06}\eta_0 + v_{16}\eta_1 + v_{26}\eta_2 + v_{36}\eta_3 + v_{46}\eta_4 + v_{56}\eta_5 + v_{66}\eta_6). \quad (6.20)$$

Коэффициентами алгоритма управления (6.20) являются коэффициенты функции

$$V = \sum_{i,k=0}^6 v_{ik}\eta_i\eta_k, v_{ik} = v_{ki}, \quad (6.21)$$

которые связаны между собой соотношениями

$$v_{ik} = \frac{v_{in}v_{kn}}{v_{nn}}, \quad (i,k=0,1,2,\dots,6). \quad (6.22)$$

Коэффициенты (6.22) определяются соответственно минорами i -ых, k -ых и n -ых элементов 1-го столбца определителя коэффициентов системы (6.17) [7]

$$\begin{aligned} v_{06} &= (-1)^6 \Delta, \\ v_{i6} &= (-1)^{i+6} M_{i1}, \quad i = 1, 2, \dots, 6, \end{aligned} \quad (6.23)$$

где

$$\Delta = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & 0 & 0 \\ 0 & a_{32} & 0 & a_{34} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_{43} & a_{44} & a_{45} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{54} & a_{55} & a_{56} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{66} \end{vmatrix}. \quad (6.24)$$

Тогда искомые коэффициенты алгоритма оптимального управления определяются выражениями

$$\begin{aligned}
 v_{06} &= -a_{66}(a_{11}a_{23}a_{32}a_{55}a_{44} - a_{11}a_{23}a_{32}a_{45}a_{54} - a_{11}a_{55}a_{43}a_{24}a_{32} + \\
 &+ a_{11}a_{55}a_{43}a_{34}a_{22} - a_{55}a_{43}a_{34}a_{12}a_{21}); v_{16} = -a_{22}a_{43}a_{34}a_{55}a_{66} - \\
 &- a_{32}a_{23}a_{44}a_{55}a_{66} + a_{32}a_{23}a_{54}a_{45}a_{66} + a_{32}a_{43}a_{24}a_{55}a_{66}; \\
 v_{26} &= -a_{12}a_{43}a_{34}a_{55}a_{66}; v_{36} = -a_{12}(a_{23}a_{44}a_{55}a_{66} - a_{23}a_{54}a_{45}a_{66} - \\
 &- a_{43}a_{24}a_{55}a_{66}); v_{46} = a_{12}a_{23}a_{34}a_{55}a_{66}; v_{56} = -a_{12}a_{23}a_{34}a_{45}a_{66}; \\
 v_{66} &= a_{12}a_{23}a_{34}a_{45}a_{56}.
 \end{aligned} \tag{6.25}$$

Следует отметить, что весовые коэффициенты функционала (6.18) однозначно связаны с коэффициентами функции (6.21) соотношениями

$$w_{ik} = \frac{m_6^2}{c} v_{i6} v_{k6} = g v_{i6} v_{k6}, \quad i, k = 0, 1, \dots, 6. \tag{6.26}$$

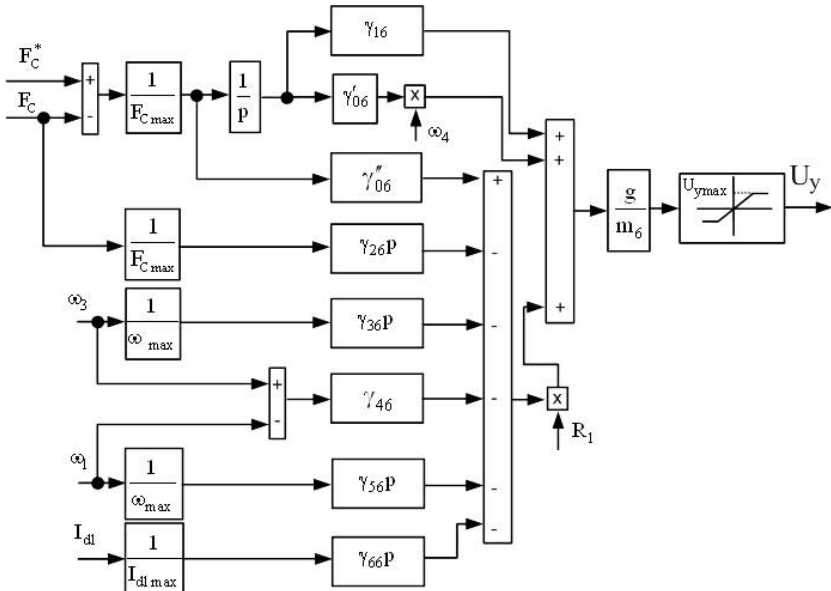


Рисунок 6.2 – Структурная схема регулятора натяжения с жесткими обратными связями

Выполнив в алгоритме управления (6.20) замену координат возмущенного движения в силу системы дифференциальных уравнений (6.17) и перейдя от относительных значений переменных состояний к их именованным значениям, получим в окончательном виде алгоритм оптимального управления натяжением прокатываемой полосы

$$U_y = U_{y\max} \text{sat} \frac{g}{m_6} \left(\left(\frac{\gamma_{06}}{p} + \gamma_{16} \right) (F_C^* - F_C) - \gamma_{26} p F_C - \gamma_{36} p \omega_3 - \right. \\ \left. - \gamma_{46} (\omega_1 - \omega_3) - \gamma_{56} p \omega_1 - \gamma_{66} p I_{d1} \right). \quad (6.27)$$

В коэффициенты алгоритма оптимального управления натяжением прокатываемой полосы входят переменные технологические параметры: угловая скорость валков клетки ω_4 и радиус рулона R_1 .

Согласно (6.22) регулятор натяжения будет иметь вид (рисунок 6.2)

Из анализа значений коэффициентов (6.14) системы (6.13) видно, что скорость клетки ω_4 входит в состав коэффициента a_{11} , а радиус рулона R_1 - в состав коэффициентов a_{12}, a_{21} . Так как эти коэффициенты уравнений динамики участвуют в расчете коэффициентов функции Ляпунова, разделим слагаемые коэффициента γ_{06} на две составляющие: γ'_{06} - с учетом переменной скорости ω_4 и γ''_{06} - с учетом переменного радиуса рулона R_1 . Аналогичным образом учтем изменение коэффициентов регулятора $\gamma_{26}, \dots, \gamma_{66}$ в зависимости от переменного радиуса рулона, тогда структурная схема регулятора натяжения примет окончательный вид, изображенный на рисунке 6.2.

6.3. Моделирование оптимальной системы управления взаимосвязанными электроприводами

Используя компьютерные модели механизма прокатной клетки, двигателя постоянного тока, блоков, имитирующих упругую связь между двигателем и прокатной клетью [31], составим компьютерную модель системы управления скоростью вращения прокатной клетки (рисунок 6.3), которая построена на основании алгоритма (6.11).

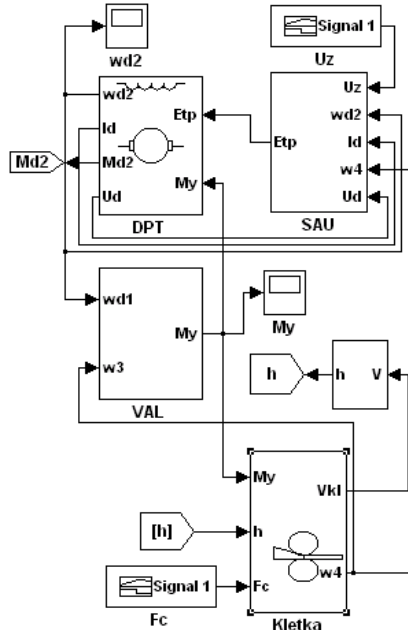


Рисунок 6.3 – Модель электропривода клетки

При моделировании использованы данные оборудования дроссировочного одноклетевого стана 1700-1 цеха холодной прокатки №1 ОАО «Запорожсталь». Результаты математического моделирования синтезированной системы оптимального управления приведены на рисунках 6.4 и 6.5 .

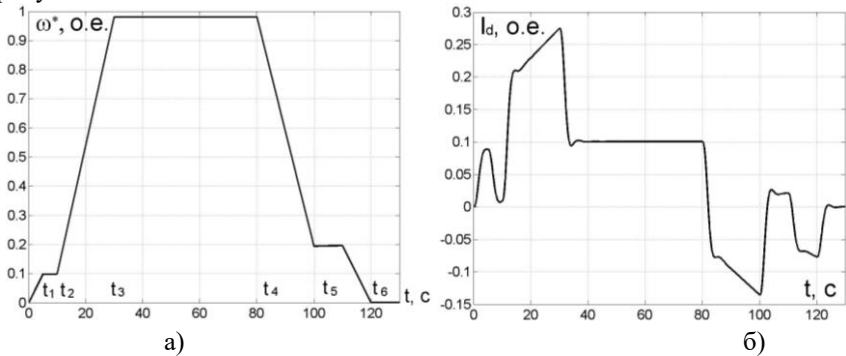
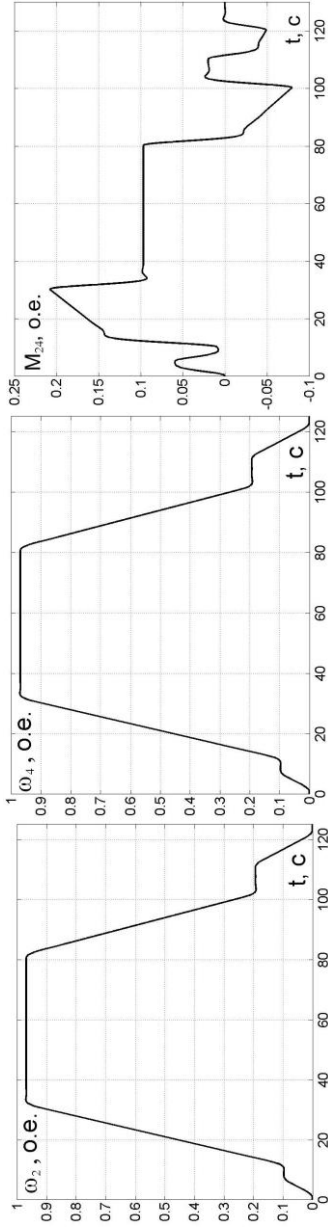


Рисунок 6.4 - Результаты моделирования системы оптимального управления скоростью прокатной клетки: сигнал задания (а), ток якорной цепи двигателя (б)



а)

б)

в)

Рисунок 6.5 – Результаты моделирования системы оптимального управления скоростью прокатной клетки: угловая скорость двигателя (а), угловая скорость валков клетки (б), момент упругой деформации шпинделя (в).

Согласно технологическим особенностям прокатки, переходные процессы получены для таких режимов работы стана: разгон до заправочной скорости ($0-t_1$), работа на этой скорости (t_1-t_2), разгон до скорости прокатки (t_2-t_3), работа в установившемся режиме (t_3-t_4), торможение до пониженной скорости (t_4-t_5), работа на этой скорости (t_5-t_6) и торможении (t_6-120c).

На рисунке 6.4, б и рисунке 6.5, д на участке времени с 18 с до 20 с и с 83 с до 100 с наблюдается линейные изменения тока и упругого момента, вызванные изменением скорости и наличием вязкого трения в системе.

Структура компьютерной модели синтезированной системы оптимального управления взаимосвязанными электроприводами клетки и моталки приведена на рисунке 6.6 [25].

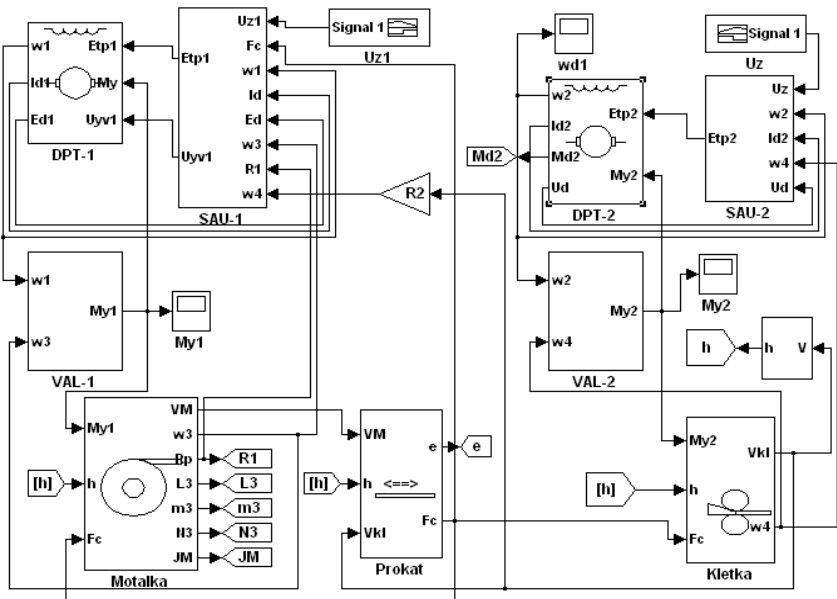


Рисунок 6.6 – Модель электромеханической системы оптимального управления взаимосвязанными электроприводами клетки и моталки

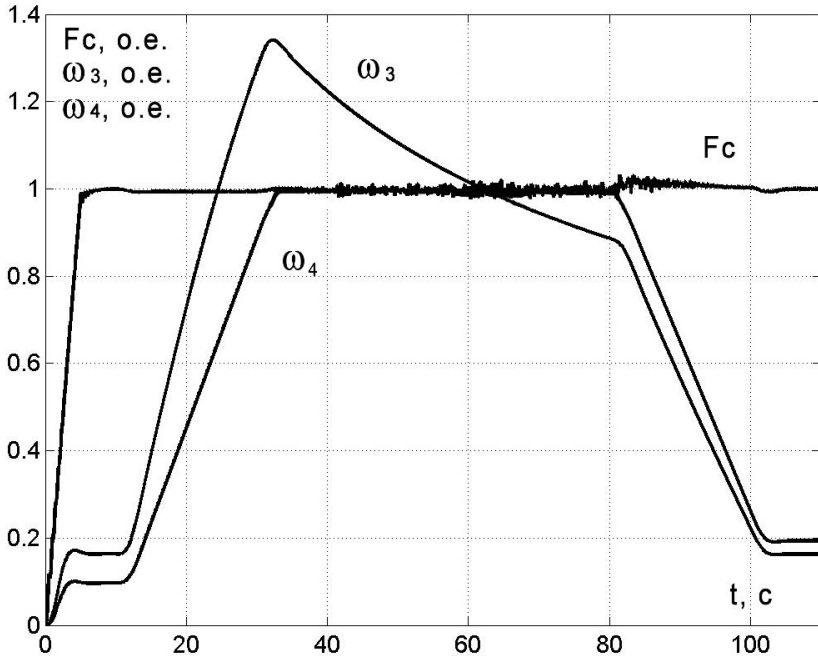


Рисунок 6.7 – Переходные процессы синтезированной системы

Согласно технологической инструкции ТИ 226-П.ХЛ 1-20-05 «Дрессировка холоднокатаных полос на станах 1700 №1 и №2» натяжение создается между клетью и разматывающим устройством с момента захвата переднего конца полосы валками. При выходе из рабочей клетки передний конец полосы подается к моталке и заправляется в зев ее барабана, создается необходимое натяжение, все механизмы стана переводятся на максимальную для данного режима скорость. При дрессировке особое внимание обращается на натяжение полосы, которое контролируется при постоянной скорости стана по показаниям амперметров и должно быть постоянным в течение всего времени дрессировки полосы. После окончания дрессировки рулона стан останавливается, разводятся валки клетки, пропускается задний конец полосы и подматывается в рулон.

На рисунке 6.7 показаны переходные процессы (F_C – натяжение прокатываемой полосы, ω_3 – угловая скорость моталки, ω_4 – угловая скорость клетки) при заправленном конце полосы в барабан моталки, с 0 с до 5 с устанавливается необходимое натяжение полосы, с 5 с до 120 с

производится дрессировка с постоянным натяжением, с 120 с до 130 с снимается задание на натяжение. При этом задание по скорости клетки в момент времени 0 с – 10 с соответствует заправочной скорости стана, 10 с – 30 с разгон клетки до рабочей скорости, 30 с – 80 с – работа при постоянной скорости, 80 с – 100 с – торможение до пониженной скорости, 100 с – 110 с – работа на пониженной скорости.

К характеристикам качества прокатки отнесем: точность поддержания скорости, точность поддержания натяжения, отсутствие перерегулирования без увеличения времени регулирования, нулевую статическую ошибку, снижение колебательности, низкую чувствительность к ряду дестабилизирующих факторов.

6.4. Сравнение синтезированной и существующей систем при внешних и параметрических возмущениях

Для исследования качества синтезированной системы оптимального управления взаимосвязанными электроприводами клетки и моталки смоделировано внешнее возмущение в виде наброса нагрузки 30% от номинального момента двигателя клетки в интервал времени с 40 с до 60 с (рисунок 6.8), а также параметрические возмущения, вызванные изменением начального момента инерции (рисунках 6.9-6.11), коэффициентов трения и изменения сопротивления якорной цепи электроприводов моталки и клетки (6.12-6.15), а также при изменении начального радиуса рулона (6.16).

При скачкообразном увеличении и последующем уменьшении нагрузки клетки на 30% от приложенного номинального момента амплитуда колебаний натяжения полосы увеличилась на 1-2%, а угловая скорость клетки в интервале времени с 40 с до 60 с уменьшилась на 1-2%, что допустимо по технологическому процессу.

Увеличение начального момента инерции моталки в 1,5-2 раза не приводит к изменению скоростей моталки и клетки, при этом на участке разгона до заправочной скорости незначительно увеличивается колебательность натяжения полосы.

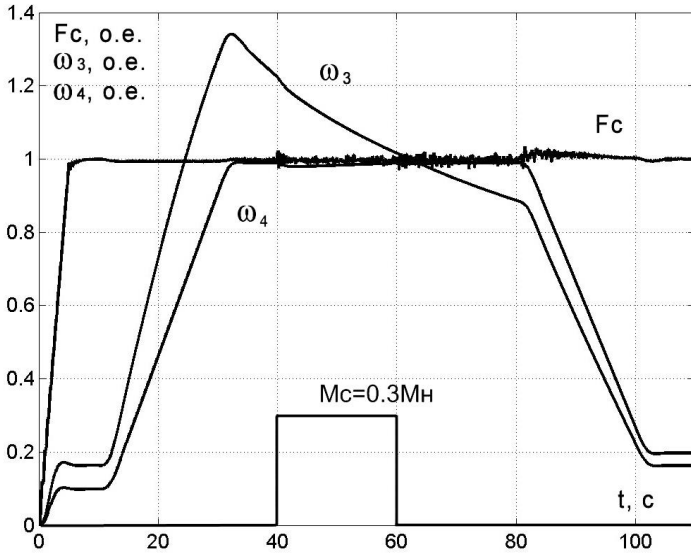


Рисунок 6.8 – Наброс нагрузки на электропривод клетки $M_c = 0,3 M_n$

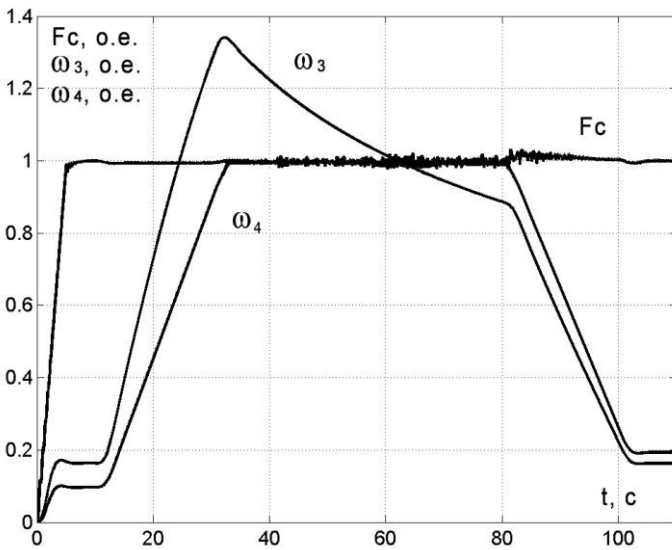


Рисунок 6.9 – Начальный приведенный момент инерции электропривода моталки увеличен в 1,5 раза

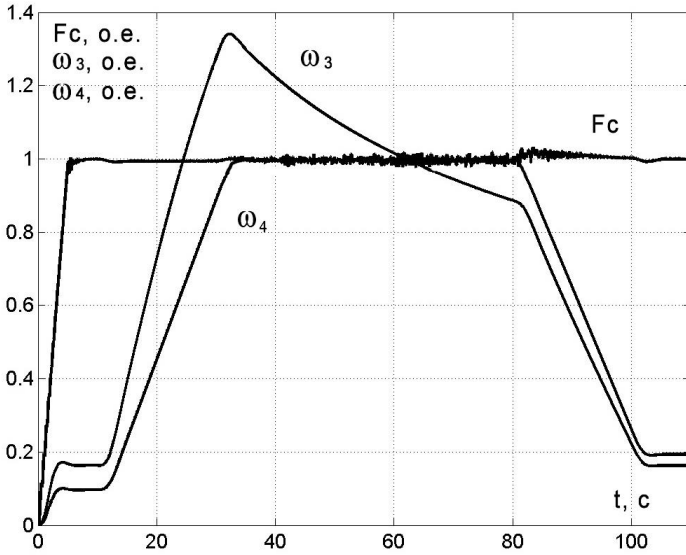


Рисунок 6.10 – Начальный приведенный момент инерции электропривода моталки увеличен в 2 раза

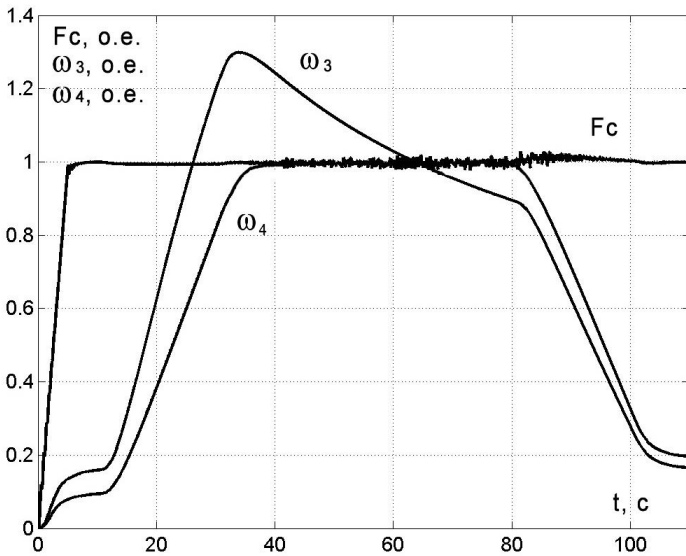


Рисунок 6.11 – Начальный приведенный момент инерции электропривода клетки увеличен в 3 раза

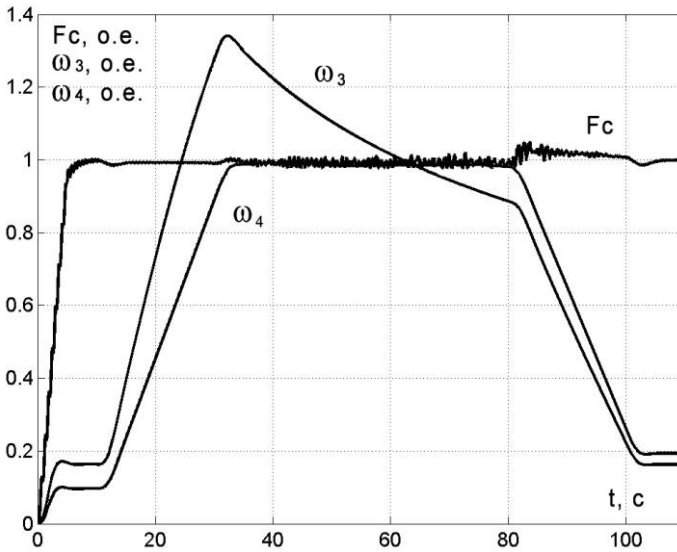


Рисунок 6.12 – Увеличение сопротивления якорной цепи электропривода моталки в 2 раза

Увеличение начального приведенного момента инерции электропривода клетки в 3 раза приводит к более затянутым переходным процессам скоростей клетки и моталки, однако на натяжение полосы это не оказывает влияния.

Ряд экспериментов по изменению коэффициентов трения моталки и клетки показал, что синтезированная система оптимального управления взаимосвязанными электроприводами не чувствительна к этим изменениям.

Изменение сопротивления якорной цепи электропривода моталки влияет на электромагнитную и электромеханическую постоянные времени, которые определяют значения коэффициентов вспомогательных обратных связей алгоритма управления натяжением полосы.

При увеличении сопротивления наблюдается повышение колебательности натяжения при разгоне до заправочной скорости и работе на ней. Уменьшение сопротивления не влияет на натяжение полосы и угловую скорость моталки.

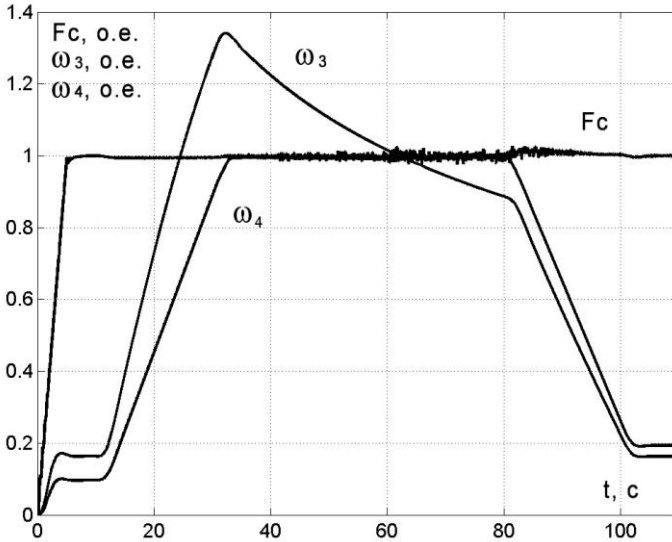


Рисунок 6.13 – Уменьшение сопротивления якорной цепи электропривода моталки в 2 раза

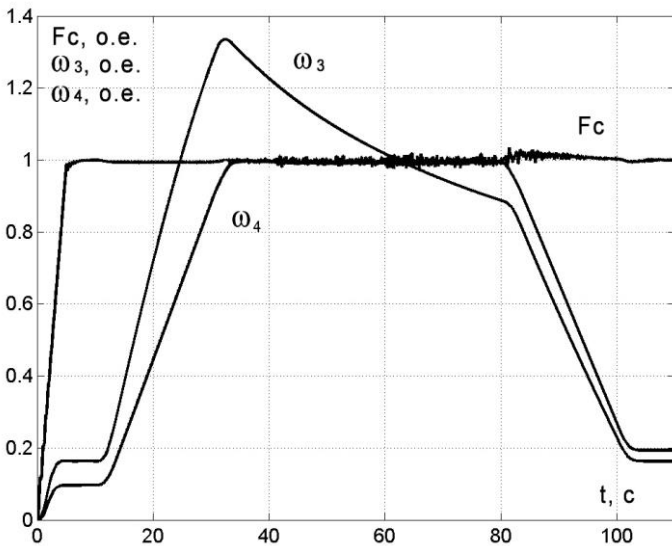


Рисунок 6.14 – Уменьшение сопротивления якорной цепи электропривода клетки в 2 раза

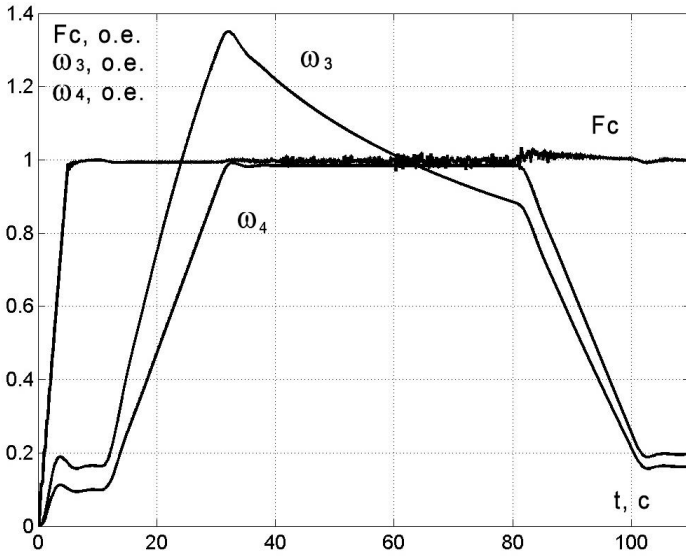


Рисунок 6.15 – Увеличение сопротивления якорной цепи электропривода клетки в 2 раза

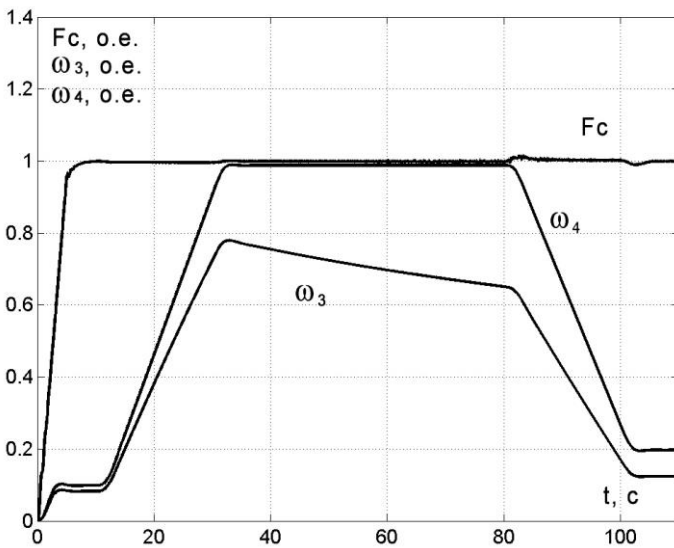


Рисунок 6.16 – Начальный радиус рулона увеличен в 2 раза

Изменение сопротивления якорной цепи электропривода клетки не оказывает влияния на угловую скорость клетки, что свидетельствует о нечувствительности системы к изменениям этого параметра.

При увеличении начального радиуса рулона в 2 раза, например, при вынужденной остановке прокатки рулона и последующем запуске прокатки того же рулона, угловая скорость моталки уменьшается пропорционально радиусу рулона, а натяжение полосы и угловая скорость клетки остаются неизменными.

На основании проведенных исследований можно сказать, что синтезированная система оптимального управления взаимосвязанными электроприводами моталки и клетки обеспечивает заданное качество процесса управления и обладает низкой чувствительностью к изменению ряда параметров, что приведет к повышению качества управления при применении этой системы.

Разработанные алгоритмы оптимального управления натяжением прокатываемой полосы положены в основу проектирования электроприводов металлургического оборудования с новыми системами управления, в частности, намоточно-размоточными устройствами на предприятии «Государственный институт проектирования промышленных предприятий «ГИПРОПРОМ».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В книге приведено новое решение актуальной научно-прикладной задачи оптимизации систем управления взаимосвязанными электроприводами прокатной клетки и намоточно-размоточных механизмов стана холодной прокатки с использованием комплекса моделей элементов прокатного производства, что позволяет повысить качество готовой продукции и снизить количество аварийных ситуаций, вызванных обрывом полосы во время прокатки.

Наиболее существенные научные и практические результаты, выводы и рекомендации состоят в следующем.

Усовершенствовано математическое описание процессов прокатки полосы путем учета её переменной толщины, эффекта обрыва и зависимости силы натяжения от относительного удлинения, которое положено в основу разработки математических моделей, которые позволяют имитировать работу и исследовать качество процессов управления взаимосвязанными электроприводами основных механизмов станов холодной прокатки.

Введен параметр, который учитывает переменную толщину полосы металла и позволяет повысить адекватность и точность математических моделей намоточно-размоточного механизма и прокатной клетки, которые использованы при синтезе электромеханических систем оптимального управления натяжением полосы.

Впервые разработан комплекс взаимосвязанных моделей основных элементов прокатного производства, который позволяет учитывать упругие связи первого и второго родов между электроприводами прокатной клетки и намоточно-размоточного механизма. Комплекс предусматривает возможность имитации переменной толщины прокатываемой полосы и аварийных ситуаций, вызванных её обрывом.

Предложен и внедрен в производственную практику многоканальный диагностирующий комплекс электроприводов основных механизмов станов холодной прокатки, который позволяет проводить мониторинг электромеханических процессов в реальном времени, записывать в архив, а также выявлять причины возникновения аварийных ситуаций.

Сравнение электромеханических процессов, полученных при моделировании, с данными мониторинга реального оборудования подтвердило их адекватность (относительная погрешность моделирования не превышает 9%) и возможность использования разработанного комплекса взаимосвязанных моделей для синтеза и исследования систем оптимального управления электроприводами основных механизмов станов холодной прокатки.

Впервые предложен метод исследования многомассовых взаимосвязанных электроприводов основных механизмов станов холодной прокатки с переменными моментами инерции, статического сопротивления, а также толщины полосы металла путем использования разработанного комплекса математических моделей основных элементов прокатного производства.

Получила дальнейшее развитие теория взаимосвязанных электроприводов с упругими связями путем разработки математической модели четырехмассовой электромеханической системы, в которой учтено взаимное влияние механизмов через две упругих связи первого рода и одну связь второго рода.

Доказана возможность повышения качества готовой продукции станов холодной прокатки, электроприводы основных механизмов которых связаны между собой упругими связями первого и второго родов, в условиях переменных радиуса рулона и скорости вращения валков клетки, путем оптимизации систем управления электроприводами по минимуму интегральных квадратичных функционалов качества.

Путем математического моделирования синтезированных систем оптимального управления взаимосвязанными электроприводами моталки и клетки подтверждена возможность устранения перерегулирования скорости прокатки и натяжения полосы без увеличения времени переходного процесса при нулевой статической ошибке. Точность стабилизации натяжения соответствует технологическим требованиям, при этом динамическая ошибка не превышает 5%. Системы обладают низкой чувствительностью к ряду дестабилизирующих факторов, таких как увеличение нагрузки на 30% от номинального момента двигателя клетки, изменения начального момента инерции моталки в 1,5-3 раза, сопротивления якорной цепи электроприводов моталки и клетки в 2 раза, увеличение начального радиуса рулона в 2 раза.

Результаты работы внедрены на ОАО «Запорожсталь» в виде комплекса диагностики электроприводов основного оборудования дроссировочного одноклетевого стана 1700-1 цеха холодной прокатки №1 и на предприятии «Государственный институт проектирования промышленных предприятий «ГИПРОПРОМ» - в виде математических моделей электромеханических систем станов холодной прокатки и алгоритмов оптимального управления натяжением полосы.

Выполненный комплекс теоретических и экспериментальных исследований позволил развить теорию и практику многомассовых взаимосвязанных электроприводов основного оборудования станов холодной прокатки с упругими связями первого и второго родов на основе разработанного комплекса взаимосвязанных моделей элементов прокатного производства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Півняк Г.Г. Автоматизований електропривод у прокатному виробництві / Г. Г. Півняк, О.С. Бешта, М.П. Фількін – Дніпропетровськ, 2008.– 224 с.
2. Файнберг Ю. М. Авторегулирование при холодной прокатке / Ю. М. Файнберг – Х.: Metallurgizdat, 1960. – 186 с.
3. Дружинин Н. Н. Непрерывные станы как объект автоматизации / Н. Н. Дружинин – М.: «Металлургия», 1975. – 336 с.
4. Борцов Ю. А. Автоматизированный электропривод с упругими связями / Ю. А. Борцов, Г. Г. Соколовский – СПб.: Энергоатомиздат, 1992. – 288 с.
5. Зеленов А. Б. Электропривод механизмов прокатных станов / А. Б. Зеленов, В. Н. Тертичников, В. Г. Гулякин – Х.: Гос. науч.-техн. изд-во лит-ры по черн. и цв. металлургии, 1963. – 339 с.
6. Белов М. П. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов / М. П. Белов, В. А. Новиков, Л. Н. Рассудов – М.: Изд-кий центр «Академия», 2007. – 576 с.
7. Садовой А. В. Системы оптимального управления прецизионными электроприводами / А. В. Садовой, Б. В. Сухинин, Ю. В. Сохина – К.: ИСИМО, 1996. – 298 с.
8. Лимонов Л. Г. Автоматизированный электропривод промышленных механизмов / Л. Г. Лимонов – Х.: Изд-во «ФОРТ», 2009. – 272 с.
9. Толочко О. И. Трехконтурная система подчиненного регулирования скорости двухмассового электромеханического объекта / О. И. Толочко, Р. В. Федоряк, П. Х. Коцегуб // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету ім. Михайла Остроградського. – 1998. – №1 – С.44–46.
10. Ключев В.И. Анализ электромеханической связи при упругих колебаниях в электроприводах / В.И. Ключев // Электричество, 1971. – №9. – С.47–51.
11. Ронин Я. П. Автоматическое регулирование натяжения полосы на моталках станов холодной прокатки / Я. П. Ронин – М.: Металлургия, 1970. – 149 с.
12. Смирнов А. Тонкое дело. Современ. процессы производства тонкого листа и полосы / А. Смирнов // Металл. – 2005. – №12. – С. 82–87.
13. Бычков В. П. Электропривод и автоматизация металлургического производства / В. П. Бычков. – М.: Высшая школа, 1977. – 391 с.
14. Василев Я. Д. Современный стан холодной прокатки для комбината «Запорожсталь» / Я. Д. Василев, А. Ю. Путноки, О. В. Симененко // Металлургич. и горноруд. пром-ть, 2007. – №1. – С.37–40.

15. Жуков С.Ф., Дьяченко М.Д., Калантаренко А.А. Организация отображения информации в автоматизированной системе управления распределенными объектами / С. Ф. Жуков, М. Д. Дьяченко, А. А. Калантаренко // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету ім. Михайла Остроградського. – 2000. – №1. – С. 1–4.
16. Акимов Л. В. Синтез упрощенных структур двухмассовых электроприводов с нелинейной нагрузкой / Л. В. Акимов, В. Т. Долбня, В. Б. Клепиков, А. В. Пирожок – Харьков, НТУ «ХПИ» – Запорожье, ЗНТУ, 2002. – 159 с.
17. Кузнецов Б.И. Синтез электромеханических систем со сложными кинематическими цепями / Б. И. Кузнецов, Т. Б. Никитина, В. В. Коломиец – Х., 2005. – 512 с.
18. Робертс В. Холодная прокатка стали / В. Робертс – М.: «Металлургия», 1982. – 293 с.
19. Егоров В. Н. Динамика систем электропривода / В. Н. Егоров, В. М. Шестаков – Л., Энергоатомиздат., 1983. – 216 с.
20. Большаков В.И. Динамика машин и автоматизация металлургического оборудования / В. И. Большаков // Теория и практика металлургии. – 2002. – №5–6, – С. 4–9.
21. Полилов Е. В. Опыт разработки и внедрения систем регистрации электрических процессов и событий электроприводов линии стана / Е. В. Полилов, А. Б. Зеленев // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського. – Кременчуг: КДПУ, 2005. – Вып. 4/2005(33). – С. 9–11.
22. Кутін В.М. Підвищення якості діагностичних процедур складних систем автоматичного керування / В. М. Кутін, В. В. Луцяк, С. В. Матвієнко // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету ім. Михайла Остроградського. – 2000. Вып. 3/2007(44), Ч.2. – С.137–138.
23. Целиков А. И. Основы теории прокатки / А. И. Целиков – М.: Металлургия, 1965. – 247 с.
24. Гудвин Г. К. Проектирование систем управления / Г. К. Гудвин, С. Ф. Гребне, М. Э. Сальгадо – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2004. – 911с.
25. Альшиц В.М., Зеленев В.И., Тикоцкий А.Е. Электроприводы моталок и размотывателей станов холодной прокатки. – М.: Информэлектро, 1980. – С. 1-2
26. Назарова Е. С. Имитационная модель механического движения металла для реверсивного одноклетевого стана холодной прокатки / Е. С. Назарова, А. В. Пирожок, Ю. А. Супрун // Електротехніка та електроенергетика. – 2007. – №1. – С. 9-15.

27. Пирожок А. В. Исследование и моделирование электромеханических систем при совместном управлении основными координатами / А. В. Пирожок, Е. С. Назарова // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – 2010. – № 28. – С.174-175.
28. Бройдо Б. С. Синтез систем автоматического управления непрерывными станами холодной прокатки / Б. С. Бройдо. – М.: «Металлургия», 1978. – 160 с.
29. Грудев А. П. Теория прокатки / А. П. Грудев – М.: «ИНТЕРМЕТ ИНЖИНИРИНГ», 2001. – 280 с.
30. Бондаренко В. И. Анализ и синтез системы регулирования координат агрегата поперечной резки (АПР) с помощью разработанных подсистем элементов электропривода / В. И. Бондаренко, А. В. Пирожок, Е. С. Назарова // Електроінформ / Тематичний випуск: Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика. – 2009. – С.199-200.
31. Назарова О. С. Моделювання електромеханічних процесів в прокатному обладнанні за допомогою бібліотеки підсистем / О. С. Назарова, В. І. Бондаренко, А. В. Пирожок // Електроінформ. – 2010. – №2-3. – С. 22-24.
32. Назарова Е. С. Учет эффекта обрыва прокатываемой полосы при моделировании электроприводов двух смежных клетей стана холодной прокатки / Е. С. Назарова, А. В. Пирожок, А. С. Нечпай, П. А. Подпружников // Електротехніка та електроенергетика. – 2011. – №2. – С. 37-41.
33. Пирожок А. В. Диагностирующий многоканальный комплекс стана холодной прокатки / А. В. Пирожок, Е. С. Назарова, О. О. Супрун, А. Г. Маринченко // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету ім. Михайла Остроградського. – частина 1. – №4(51). – 2008. – С. 117-122.
34. Садовой А. В. Система оптимального управления скоростью клетки стана холодной прокатки / А. В. Садовой, Р. С. Волянский, Е. С. Назарова // Збірник наукових праць Дніпродзержинського державного технічного університету. –2011. – № 1(16). – С.117-124.
35. Садовой А. В. Система оптимального управления натяжением прокатываемой полосы стана холодной прокатки / А. В. Садовой, Р. С. Волянский, Е. С. Назарова // Збірник наукових праць Донбаського державного технічного університету. – 2011. – № 34. – С.122-130.

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ

АКОР – аналитическое конструирование оптимальных регуляторов
АСУТП – автоматическая система управления технологическим процессом.

АЦП – аналогово-цифровой преобразователь.

ВС – вычислительные средства.

Д-ИМ – двигатель – исполнительный механизм.

ДН – датчик напряжения.

ДПТ – двигатель постоянного тока.

ДТ – датчик тока.

ДЦП – дискретно-цифровой преобразователь.

ДЭ – датчик ЭДС.

ЗИ – задатчик интенсивности.

ЛАЧХ – логарифмическая амплитудно-частотная характеристика.

МП – микропроцессор.

МК – микроконтроллер.

ОВ – обмотка возбуждения.

ОУ – объект управления.

ОС – обратная связь.

РН – регулятор напряжения.

РНат – регулятор натяжения.

РТ – регулятор тока.

РЭ – регулятор ЭДС.

САРН – система автоматического регулирования натяжения.

САРТ – система автоматического регулирования толщины.

САУ – система автоматического управления.

СИФУ – система импульсно-фазового управления.

СУ – система управления.

СХП – стан холодной прокатки.

СЭП – система электроприводов.

ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь.

ЦДП – цифро-дискретный преобразователь.

ЭМК – электромеханический комплекс.

ЭМС – электромеханическая система.

ЭП – электропривод.