

Некоммерческое акционерное общество
«АЛМАТИНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ЭНЕРГЕТИКИ И СВЯЗИ»

Кафедра Электропривод и автоматизация промышленных установок
Специальность 68071800 - Электроэнергетика


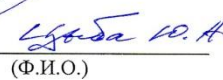
Допущен к защите
Зав. кафедрой



« _____ » _____ 20__ г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ
пояснительная записка

Тема Модернизация электропривода вращающегося станка

Магистрант  
подпись (Ф.И.О.)

Руководитель диссертации  
подпись (Ф.И.О.)

Рецензент  
подпись (Ф.И.О.)

Алматы, 2016 г.

Некоммерческое акционерное общество
«АЛМАТИНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ЭНЕРГЕТИКИ И СВЯЗИ»

Факультет Электротехнический
Специальность 61041800 - Электротехника
Кафедра Электропривод и автоматизация промышленных установок

ЗАДАНИЕ

на выполнение магистерской диссертации

Магистранту Абдулла Абдуллович Каировичев
(фамилия, имя, отчество)

Тема диссертации Автоматизация электропривода вращающегося станка

утверждена Ученым советом университета № от « »

Срок сдачи законченной диссертации « »

Цель исследования Разработка автоматизированного электропривода привода вращающегося станка, который обеспечивает стабильность привода вращающегося станка, что повышает производительности процесса вращающегося и производительности за счет увеличения скорости вращения и снижения числа оборотов привода.

Перечень подлежащих разработке в магистерской диссертации вопросов или краткое содержание магистерской диссертации:

1. Вращающийся станок многократного вращения как регулируемая непрерывная механическая система
2. Анализ принципов стабилизации вращающегося привода и его оптимизация на приводах станков с регулируемой скоростью вращения электродвигателей
3. Критерии оптимального управления и регулирования привода вращающегося станка
4. Аналитическое построение регулятора и исследование автоматизированного электропривода станка на математической модели в среде СИМУЛИН

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей)

- 1) Процесс обработки металла вихром
- 2) Схема силовых параметров вихромного 3-кратного преобразователя
- 3) Графики зависимости $P_n = f(\omega)$ в режиме стабилизации дачности на вихром
- 4) Графики зависимости $P_n = f(\omega)$ в режиме стабилизации перемены магнетизма

Рекомендуемая основная литература

1. Производство стальной проволоки: монография / Х.И. Багайев, Б.А. Ибрагимов, Г.С. Гун и др. - Алматы: ГОУ ИЭИ "ЭИП" 2006 - 543 с.
2. Экономическая эффективность с противоматериальными // И: электротехника по научно-исследовательской работе АХ-47. Алматы: ТПИ, 1982 - 90 с.
3. Туркешев И.И., Садырбаев Т.К., Туркешев А.И. Проблемы автоматизации вихромного оборудования // Автоматизированной электропривод в XXI веке пути развития; Труды IV международной конференции по автоматизированному электроприводу / Часть 2 - Алматы: ГОУ ИЭИ "ЭИП", 2004

Г Р А Ф И К

подготовки магистерской диссертации

Наименование разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю	Примечание
Описание проекта.		
Общие понятия проволоки		
Технология вихромной проволоки		
Анализ существующих вихромных аппаратов в вихромных сетях		
Обзор существующих систем автоматического регулирования электроприводов вихромного станка		
Система датчиков управления противоматериальными вихромными сетями		
Возможность реализации регулирования силовых параметров вихромных.		
Анализ возможностей электроприводов вихромных станков при различных режимах питания		
Система управления вихромными станками		
Математическая модель вихромного станка.		

Дата выдачи задания _____

Заведующий кафедрой _____ (_____)
(подпись) (Ф.И.О.)

Руководитель диссертации _____ (_____)
(подпись) (Ф.И.О.)

Задание принял к исполнению
магистрант _____ (_____)
(подпись) (Ф.И.О.)

Аннотация

В диссертации разработана система управления стабилизации противонатяжения на прямоточном волочильном стане, учитывающая разность скоростей между вторым и первым, между третьим и вторым и между третьим и первым двигателями. Проведен анализ установившегося режима волочения при различных схемах питания двигателей и обоснована необходимость управления по цепи обмотки якоря для стабилизации статических противонатяжений проволоки по отношению к изменению режима и усилий волочения. Показано, что волочильный стан с индивидуальной схемой питания двигателей обладает так называемым свойством саморегулирования натяжения проволоки по отношению к изменению режима волочения. Рассмотрены возможности косвенного измерения усилий волочения по электромагнитным моментам на прямоточных станах. Синтезирован закон стабилизации противонатяжений проволоки в переходных режимах волочения и показано, что разработанная система позволяет стабилизировать противонатяжения проволоки как в переходном режиме, так и в установившемся режиме волочения. Кроме этого разработана структурная и математическая модели электропривода постоянного тока стана. Предложен метод аналитического конструирования регулятора и исследования автоматизированного электропривода стана на математической модели в системе MATLAB. В диссертационной работе приведена разработанная программа синтеза параметров системы управления трехдвигательного электропривода волочильного стана. Определена устойчивость движения прямоточного волочильного стана в системе Matlab.

Summary

In this dissertation the control system of stabilization of an antitension on the direct - flow drawing camp, a considering difference of speeds between the second and the first, the third and the second and between the third and the first engines is developed. Analysis of steady-state drawing at various circuits supply engines and the necessity of control on the circuit of the armature winding to stabilize static counterstrain wire with respect to the change in regime and efforts drawing. It is shown that drawing machines with individual power supply circuit engine has a so-called self-regulating property tension wire in relation to the regime change drawing. Synthesized stabilization law counterstains wire drawing in transient conditions and show that the system designed to stabilize counterstrain wire in a transition mode and in the steady drawing. Besides it is developed structural and mathematical models of the direct electric drive of a camp. The method of analytical design of the controller and the study of automated direct - flow drawing camp on a mathematical model of the system MATLAB. The developed program of synthesis of parameters of a control system of the three – engine electric drive of a drawing camp is provided in the thesis. Stability of movement of a direct – flow drawing camp in Matlab system is defined.

Аңдатпа

Диссертацияда бірінші, екінші, үшінші қозғалтқыштар аралығындағы жылдамдықтар ерекшелігін орындайтын тура сым созатын станның кері тартылуын тұрақтандырудың басқару жүйесі жетілдірілген. Қозғалтқыштарды түрлі сұлбалалармен қорек көзіне қосқан кездегі сым созудың қалыптасқан режимінің талдауы және сым созылуының күшеюі мен режимдердің өзгеруіне қатысты статикалық қарсытартуды тұрақтандыру мақсатында якорь орамасының тізбегі арқылы басқаруына талдау жүргізілді. Сондай-ақ, жеке қоректену сұлбасы бар сым созатын стан қозғалтқыштары созу режимінің өзгеруіне қатысты өздік басқару сипатына ие екендігі көрсетілді. Созудың өтпелі режимдерінде сымның қарсытартуын тұрақтау заңы синтезделді және құрастырылған жүйе сымның қарсытартуын өтпелі режимде және қалыптасқан режимде тұрақты ұстауына мүмкіндік береді. Одан басқа станның тұрақты ток электр жетегінің құрылымдық және математикалық моделдері орындалған. Сонымен қатар MATLAB математикалық модель жүйесінде регулятордың аналитикалық құрастыру тәсілі және станның автоматтандырылған электр жетегінің зерттелуі ұсынылды. Диссертациялық жұмыста сым созатын станның үш қозғалтқышты электр жетегінің басқару жүйесінің параметрлері синтезінің жетілдірілген бағдарламасы келтірілген. Тура сым созатын станның қозғалыс тұрақтылығы MATLAB жүйесінде анықталған.

Общая характеристика работы

Актуальность проблемы.

Тенденция развития волочильного производства направлена на освоение и выпуск волочильных станов с высокоскоростными характеристиками, каковыми являются многократные волочильные станы с противонатяжением. Эти станы по сравнению с волочильными станами, работающими без противонатяжения, способствуют увеличению производительности на 44%, улучшают качество выпускаемой продукции.

Одним из основных факторов, определяющих производительность этих станов, является частый обрыв проволоки, за счет чего в наиболее неблагоприятных сменах теряется около 40% рабочего времени. Обрывность в многократных волочильных станах с противонатяжением в значительной степени определяется стабильностью параметров процесса волочения, в особенности уровнем и стабильностью величин противонатяжений. Из-за нестабильности противонатяжений происходит значительная доля обрывов проволоки, приводящих к образованию невосстанавливаемого брака, потерям сырья и простоям стана на время заправки проволоки на барабаны.

Основная причина нестабильности противонатяжения - сложная зависимость параметров процесса волочения от большого числа параметров, затрудняющая задачу технологов и оператора-волочильщика в выборе и регулировке режимов работы электропривода. Поэтому решение задачи стабилизации противонатяжений проволоки должно опираться не на интуицию оператора-волочильщика, а на эффективную систему автоматического регулирования (САР) волочильным станом

В связи с этим актуальной является задача усовершенствования и создания новых автоматизированных волочильных станов с системой автоматической стабилизации противонатяжений проволоки. Однако созданию таких систем автоматической стабилизации должно предшествовать решение ряда задач, связанных с математическим описанием регулируемого объекта, обоснованием структуры регулирующего устройства, разработкой методов синтеза параметров системы стабилизации противонатяжений проволоки из условий ее устойчивости и оптимальности.

Целью работы является разработка автоматизированного электропривода прямого волочильного стана, который обеспечивает стабильность противонатяжений проволоки между волочильными барабанами, что повышает энергоэффективность процесса волочения и производительность за счет увеличения скорости волочения и снижения числа обрывов проволоки.

Общая методика исследований

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

Исследованы возможные режимы регулирования силовыми параметрами волочения, обеспечивающие наибольшую инвариантность

статических противонапряжений проволоки к изменениям режима и усилий волочения. При этом определены критерии оптимального регулирования и управления. Проведен анализ электроприводов с параллельным и блочным соединением приводных электродвигателей, применение которых в условиях интенсификации производства проволоки, может оказаться экономически и технически более целесообразным. Рассмотрены возможности косвенного измерения усилий волочения по электромагнитным моментам на прямоточных станах.

Научная новизна:

В соответствии проведенных исследований предложена система автоматической настройки и регулирования противонапряжений с косвенным контролем силовых параметров волочения при индивидуальном питании приводных электродвигателей по схеме ТП-ДПТ.

Апробация работы.

Материалы диссертации обсуждены и доложены на ежегодной конференции магистрантов кафедры "Электропривод и автоматизация промышленных установок" Алматинского университета энергетики и связи (г. Алматы 2015 октябрь).

Публикации.

По результатам исследований опубликовано научная статья по теме "Модернизация электропривода волочильного стана" в сборнике научные труды магистрантов АУЭС.

Структура и объем работы.

Диссертация состоит из аннотаций на трех языках, введения, трех разделов и заключения, содержит 85 страницы, список использованных источников и приложения.

Содержание

Обозначения и сокращения	9
Введение	10
1 Волоочильные станы многократного волочения-как регулируемые непрерывные поточные машины агрегаты	12
1.1 Конструктивные и технологические особенности волочильных станов без скольжения проволоки по барабану	12
1.2 Характеристики процесса волочения	15
1.3 Анализ усилий волочения	18
1.4 Обзор существующих систем автоматического регулирования электроприводом волочильных станов	20
1.5 Постановка задачи исследований	28
2 Основные принципы стабилизации противонатяжений проволоки и его оптимизация на прямоточных станах с разными схемами питания приводных электродвигателей	29
2.1 Синтез законов управления противонатяжением в установившихся режимах	29
2.2 Возможные режимы регулирования силовых параметров волочения	33
2.3 Анализ многодвигательных электроприводов волочильных станов при различных схемах питания якорных цепей	38
2.4 Критерии оптимального управления и регулирования прямоточными волочильными станами	45
2.5 Оценка точности и надежности систем с полной и неполной информацией	54
3 Аналитическое конструирования регулятора и исследования автоматизированного электропривода стана на математической модели в системе MATLAB	60
3.1 Аналитическое конструирование регулятора многодвигательного электропривода прямоточного волочильного стана	69
3.2 Исследование электропривода стана ВПЦ-3-4-550 с системой стабилизации противонатяжений на компьютерной модели	74
Заключение	80
Список литературы	81

Обозначения и сокращения

САР – системы автоматического регулирования
ПВС – прямоточный волочильный стан
ТП – тиристорного преобразователя
НВ – неуправляемым выпрямителем
МУ – магнитных усилителей
НА – намоточного аппарата
РУ – размоточное устройство
ЗИ – задатчики интенсивности
ИН – источнику напряжения
ЭС – элементами сравнения
ДТ – датчик тока
У – усилителей
LM – обмотки возбуждения

Введение

Современные требования развития техники, строительства и расширение спроса металлообрабатывающих отраслей экономики обусловили ускоренный рост и развитие прогрессивных направлений в производстве проволоки и изделий из нее. Особая роль в выполнении этой важной задачи принадлежит волочильному производству. Процесс волочения является одним из наиболее экономичных видов механической обработки металлов. Увеличение выпуска проволоки осуществляется как за счет расширения парка машин волочильных станов, так и путем повышения производительности.

Тенденция развития волочильного производства направлена на освоение и выпуск волочильных станов с высокоскоростными характеристиками, каковыми являются многократные волочильные станы с противонатяжением. Эти станы по сравнению с волочильными станами, работающими без противонатяжения, способствуют увеличению производительности на 44%, улучшают качество выпускаемой продукции.

Одним из основных факторов, определяющих производительность этих станов, является частый обрыв проволоки, за счет чего в наиболее неблагоприятных сменах теряется около 40% рабочего времени. Обрывность в многократных волочильных станах с противонатяжением в значительной степени определяется стабильностью параметров процесса волочения, в особенности уровнем и стабильностью величин противонатяжений. Из-за нестабильности противонатяжений происходит значительная доля обрывов проволоки, приводящих к образованию невозстанавливаемого брака, потерям сырья и простоям стана на время заправки проволоки на барабаны.

Основная причина нестабильности противонатяжения - сложная зависимость параметров процесса волочения от большого числа параметров, затрудняющая задачу технологов и оператора-волочильщика в выборе и регулировке режимов работы электропривода. Поэтому решение задачи стабилизации противонатяжений проволоки должно опираться не на интуицию оператора-волочильщика, а на эффективную систему автоматического регулирования (САР) волочильным станом

В связи с этим актуальной является задача усовершенствования и создания новых автоматизированных волочильных станов с системой автоматической стабилизации противонатяжений проволоки. Однако созданию таких систем автоматической стабилизации должно предшествовать решение ряда задач, связанных с математическим описанием регулируемого объекта, обоснованием структуры регулирующего устройства, разработкой методов синтеза параметров системы стабилизации противонатяжений проволоки из условий ее устойчивости и оптимальности.

Настоящая работа посвящена разработке и исследованию системы стабилизации противонатяжений проволоки в многократных прямоточных волочильных станах, позволяющей поддерживать натяжения проволоки на заданном оптимальном уровне и тем самым повысить производительность стана за счет снижения обрывности проволоки

В первой главе работы проведен обзор и анализ конструктивных и технологических особенностей волочильных станов. Показана сложная зависимость между параметрами процесса волочения, невозможность аналитического определения усилий волочения. Отмечены преимущества прямоточных волочильных станов перед другими подобными машинами и несоответствие существующих систем управления электроприводами требованиям, предъявляемым к ним технологией процесса волочения, недостаточное использование возможностей комбинированного управления как по цепи якоря, так и по цепи возбуждения. Обосновывается необходимость учета упругих свойств проволоки, формулируются задачи исследования.

Во второй главе выведены уравнения движения многократного прямоточного волочильного стана. На основе численного анализа динамики стана ВПЦ-3-4-550 обоснован выбор расчетной модели многократных волочильных станов и описаны уравнения движения прямоточного волочильного стана при различных схемах питания двигателей. Проведен анализ электроприводов с параллельным и блочным соединением приводных электродвигателей, при этом обоснована необходимость управления по цепи обмотки якоря для стабилизации статических противонапряжений проволоки по отношению к изменению режима и усилий волочения.

Третья глава посвящена синтезу системы стабилизации противонапряжений проволоки в волочильных станах. Исследованы возможные режимы регулирования волочильным станом, обеспечивающий инвариантность статических противонапряжений проволоки к изменениям режима и усилий волочения. Рассмотрены возможности косвенного измерения усилий волочения по электромагнитным моментам на прямоточных станах. Синтезирован закон стабилизации противонапряжений проволоки в переходных режимах волочения и показано, что разработанная система позволяет стабилизировать противонапряжения проволоки как в переходном режиме, так и в установившемся режиме волочения. Приведены законы стабилизации противонапряжений проволоки при линейном разгоне и остановке волочильного стана. Кроме того в главе приведены результаты экспериментальной проверки теоретических результатов работы путем численного моделирования 3-х кратного волочильного стана. Анализ полученных результатов подтверждает, что предлагаемая система стабилизации противонапряжений проволоки обеспечивает поддержание на заданном уровне натяжений проволоки во всех режимах работы волочильного стана и устойчивость системы стабилизации при любых возмущениях.

Глава 1. Волоочильные станы многократного волочения-как регулируемые непрерывные поточные машины агрегаты

1.1 Конструктивные и технологические особенности волоочильных станов без скольжения проволоки по барабану

В ряде отраслей промышленности (металлургическая, текстильная, химическая, целлюлозно-бумажная и др.) имеются непрерывно-поточные машины-агрегаты, предназначенные для выработки ленточных материалов (бумажное полотно и др.). К таким машинам-агрегатам относятся непрерывные прокатные и волоочильные станы, текстильные машины, машины, вырабатывающие синтетическую пленку и др. Непрерывные поточные машины-агрегаты состоят обычно из ряда секций (блоков), в которых происходит технологическая (механическая, термическая, химическая) обработка материала.

Особенностью непрерывно-поточных машин-агрегатов является одновременность прохождения обрабатываемого материала через ряд секций и их взаимосвязь через этот материал, который в первом приближении необходимо рассматривать как невесомую упругую ленту [4-6]. Поэтому результаты исследования одного вида машин во многом вполне приемлемы и для других видов машин этого типа

Одним из примеров непрерывно-поточных машин-агрегатов являются многократные волоочильные станы для производства проволоки. Волоочильные станы обычно подразделяют по общим признакам на ряд групп: по диаметру протягиваемой проволоки, по кратности волочения, по диаметру барабана, по принципу работы (со скольжением и без скольжения проволоки на барабане), по типу тяговых барабанов (одинарные или сдвоенные), по принципу передачи от барабана к барабану (сверху, через направляющие ролики или прямо от барабана к барабану), по приложенной нагрузке к проволоке (с противонапряжением и без нее) [8,9]. Волоочильные машины часто различаются по кратности волочения и диаметру чистового барабана [8]. Все они независимо от их деления на различные группы состоят из следующих основных узлов тягового барабана, создающего усилие волочения, электропривода к нему с редуктором, через который передается вращение от электродвигателя постоянного тока, и системы автоматического регулирования

В зависимости от особенностей технологического процесса применяются машины однократного и многократного волочения. В машинах многократного волочения проволока одновременно протягивается через несколько волок, количество которых колеблется от 2 до 15. От машин однократного волочения они выгодно отличаются высокой производительностью. По принципу работы машины многократного

волочения подразделяются на машины без скольжения и со скольжением проволоки по тяговому барабану.

В машинах без скольжения регулирование скоростей и требуемое сохранение постоянства секундных объемов осуществляются путем изменения запаса проволоки на промежуточных барабанах (магазинного типа) или изменением частоты вращения барабанов (петлевые и прямоточные).

Наиболее просты в эксплуатации и не имеют автоматизированного электропривода машины магазинного типа. Но они имеют ряд существенных недостатков - главным образом более низкую производительность по сравнению с петлевыми и прямоточными машинами, скручивание проволоки при переходе с блока на блок, что в свою очередь приводит к более низкому качеству выпускаемой продукции, к повышенной обрывности проволоки, устранение которой заметно снижает производительность машины. Кроме того, волочение производится без противонатяжения, что увеличивает удельный расход энергии на производство проволоки [9,10].

Машины многократного волочения с противонатяжением отличаются высокой производительностью, универсальностью. Исследованием Е.В.Пальмова и М.К.Гурьяновой [2] установлено, что производительность машин с противонатяжением на 44% выше, стойкость волок при волочении стальной проволоки в 2 раза больше, расход энергии меньше, коэффициент технического использования на 14-20% больше, чем на машинах, работающих без противонатяжения.

Для многократного волочения стальной проволоки из различных марок с противонатяжением предназначены волочильные машины АПМ-3-4/550, ВПТ-4/550, ВПМ- 6-7/550, ВПТ-6-7/350, ВПТ - 5/750 и т.п. [8] Характеристики этих машин приведены в таблице 1.1.

При волочении тонкой проволоки из низкоуглеродистой, среднеуглеродистой, высокоуглеродистой стали используются машины многократного волочения со скольжением, выпускаемые зарубежными фирмами «Кратос», «Грюна» [11]. Машины многократного волочения со скольжением работают на жидкой смазке в условиях весьма энергичного отвода тепла и отличаются своей портативностью, возможностью достижения высокой скорости волочения. Согласование скоростей проволоки и барабанов обеспечивается за счет проскальзывания проволоки по барабану [12]. Волочение ведется с противонатяжением, составляющим около 30% силы волочения [13].

Однако недостатком волочильных машин со скольжением является наличие истирания барабана и проволоки, которое приводит к дополнительному повышению температуры проволоки и быстрому выходу из строя волочильных барабанов.

Отсюда следует, что наиболее перспективными являются машины многократного волочения без скольжения, работающие с

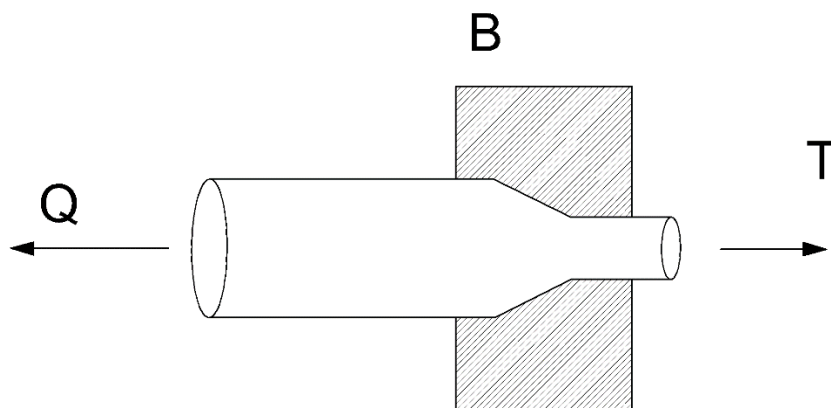
Таблица 1.1 –Характеристики волочильных машин с противонатяжением

Характеристики	Размерность	Тип машин				
		ВПТ-6-7/350	ВПТ-5/350	ВПМ-3-4/550	ВПТ-3-4/550	ВПМ-6-7/550
Количество блоков	Шт	6	5	3	3	6
Кратность волочения	Шт	6-7	5	3-4	3-4	6-7
Диаметр барабанов	Мм	240;350	750	550;375	550;425	550
Предел прочности заготовки	кг/ мм ²	100-140	30-60	60-140	30-60	40-140
Начальный диаметр проволоки	Мм	4-2	14	7	7	7
Конечный диаметр проволоки	Мм	1,9-0,8	8-3,6	4,7-3,1	5,0-3,4	3,4-2
Скорость волочения	м/ с	8-20	1,6-4	5-12,5	3,45-8,2	8-20
Мощность привода	Квт	450	300	240	240	160

противонатяжением. Эти машины имеют ряд преимуществ перед другими видами волочильных машин: возможность волочения с повышенными скоростями, что обеспечивает их высокую производительность, отсутствие скручивания проволоки, позволяющее получать продукцию с более высокими механическими характеристиками, возможность волочения проволоки на этих машинах с противонатяжением способствует снижению энергозатрат на единицу продукции, повышению стойкости волок и барабаном, что также повышает их производительность [14].

1.2 Характеристики процесса волочения

Волочением называется способ обработки металла давлением, при котором обрабатываемый металл в виде заготовки постоянного поперечного сечения вводится в канал волочильного инструмента (волоки) и протягивается через него (рисунок 1.1).



Q-противонатяжение, Т- сила волочения, В- волока
Рисунок 1.1 – Процесс обработки металла волоке

Сечение канала плавно уменьшается от места входа металла в инструмент к месту выхода из него. Выходное сечение канала всегда меньше сечения протягиваемой заготовки. Поэтому заправка, проходя через волоку, деформируется, поперечное сечение ее изменяется, и она после выхода из волоки принимает форму и размеры наименьшего сечения канала. Длина проволоки при этом возрастает прямо пропорционально уменьшению поперечного сечения [15].

В общем случае на процесс волочения оказывают влияние механические и физические свойства протягиваемого металла, степень деформации, форма профиля волочильного канала, материал волоки, качество трущихся поверхностей, скорость деформации, уровень противонатяжений [12,13,15].

Тенденция развития волочильного производства направлена на освоение и выпуск волочильных машин с высокоскоростными характеристиками. Основным эффектом от скоростного волочения-это повышение производительности волочильной машины [1]. Кроме того, уменьшается удельный расход энергии волок. Высокие скорости волочения оказывают положительное влияние на физико-механические свойства стальной проволоки [12,16].

Однако, при этом необходимо решение двух основных проблем: понижение температуры проволоки и волок, которая во многом способствует ухудшению механических и физических свойств металла, а также снижение уровня шума и вибрации, которые при высоких скоростях волочения превышают допустимые нормы [17,18,19].

На рисунке 1.2 приведена качественная зависимость фактической производительности волочильной машины от скорости волочения [20].

Как видно, для скорости волочения имеет максимум производительности волочильной машины.

Скоростное волочение предъявляет повышенные требования к волочильным машинам:

1) прямой ввод проволоки (без обводковых устройств),

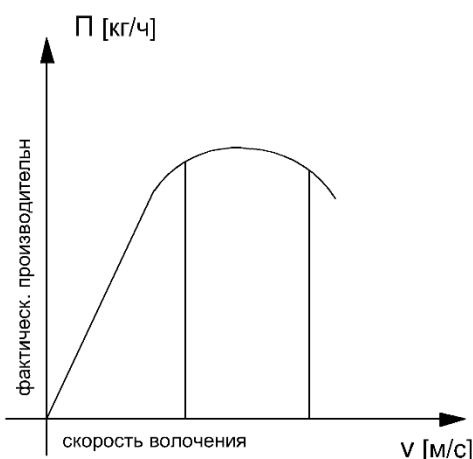


Рисунок 1.2-зависимость фактической производительности волочильной машины от скорости волочения

2) низкие и легкие барабаны с постоянным количеством витков проволоки на них,

3) автоматическое тонкое регулирование скорости между соседними барабанами,

4) плавный пуск,

5) автоматическая быстрая остановка,

6) безопасность в работе [13,21].

Дальнейшее повышение скоростей волочения проволоки, как показывает практика последних лет, ограничено конструкцией существующих

волоочильных машин и не освоенностью процесса волочения проволоки на больших скоростях [22,23,24].

Поэтому процесс высокоскоростного волочения требует создания волоочильных машин улучшенных конструкций. Важное место в этом отношении занимает волочение с противонатяжением, которое удовлетворяет, как указывалось выше, почти: всем требованиям высокоскоростного волочения [1].

Но существующие волоочильные машины с противонатяжением имеют два основных недостатка:

1) Необходимость эффективной системы охлаждения проволоки и волоки (проволока выходя из одной волоки практически не успевает охладиться до следующей волоки).

2) Отсутствие надежной и эффективной системы автоматического регулирования (САР) натяжением проволоки во всех режимах работы волоочильной машины.

Создание САР натяжением проволоки в какой-то мере решает и вопрос охлаждения проволоки, позволяя стабилизировать число витков на барабане и обеспечивая оптимальные натяжения проволоки при волочении.

Основное требование к САР силовых параметров волоочильных машин с противонатяжением заключается в поддержании противонатяжения максимально близким к постоянному [25,26]. В значительной степени производительность волоочильной машины снижается за счет обрывов проволоки в процессе заправки, пуска и волочения с постоянной скоростью. В таблице 1.2 приведены анализ простоев волоочильной машины при производстве проволоки из низкоуглеродистой стали [27]:

Таблица 1.2

Причины простоев	Удельное время простоев
Сварка бунтов в катанке	8.6%
Съем мотков и смена катушек	26.1%
Смена волок	2.9%
Устранение обрывов	38.9%
Распушивание катанки	6.1%
Прочие	16.4%

Как видно из таблицы 1.2 имеются значительные резервы экономии времени, занимаемого вспомогательными операциями.

Подробный анализ причин обрывов при волочении изложен в монографии Перлина И.Л. и Ерманзса М.З. [15]. Обрывность проволоки в основном обусловлена дефектом в структуре металла, наличием больших остаточных напряжений и неправильным режимом волочения [1,15]. Исследования рабочих режимов различных волоочильных машин, проведенные в работах [24,28], показывают, что более 20% всех обрывов происходит по вине электропривода, т.е. из-за неправильности режима волочения.

Большой процент обрывов связан с динамическими режимами работы волочильной машины. В момент пуска волочильной машины усилие волочения всегда больше, чем при установившемся режиме, причем отношение силы волочения F_{\max} в пусковом режиме к силе волочения F_0 в установившемся режиме F_{\max}/F_0 возрастает от первого барабана к последним по мере увеличения скорости [30].

1.3 Анализ усилий волочения

Существуют различные формулы для определения силовых параметров процесса волочения [1]. Сравнительный анализ расчета по номограммам для определения силовых параметров волочения, составленных В.Л.Колмогоровым, А.Л.Тарнавским, Л.С.Ватрушиным, В.Г.Осинцевым показывает, что использование для построения номограмм формулы И.Л.Перлина позволяет получить расчетные данные, наиболее близко отвечающие действительным [29].

Эффективная эксплуатация волочильных станов возможна при условии точного знания требующихся усилий волочения. Величина усилий волочения в основном характеризуется обжатием, формой канала волокна, скоростью волочения, противонапряжением и температурой проволоки [15]. Часть этих факторов в процессе волочения можно считать постоянными. К ним относятся коэффициент обжатия, форма канала волокна, состояние поверхности канала волокна, свойство смазки. Меняются с течением времени скорость волочения, противонапряжение, температура проволоки. Поэтому целесообразно разделить факторы, определяющие усилие волочения, на изменяемые и неизменяемые.

Значительная часть факторов, влияющих на величины усилий волочения, являются случайными. К ним относятся дефекты проволоки, изменение натяжения проволоки между волочильным станом и намоточным устройством, отсутствие смазки на проволоке в одной из волок, утолщение проволоки в месте сварки и т.п.

Среди этих довольно разнообразных факторов, влияющих на величины усилий волочения, основными являются скорость волочения и противонапряжения [1]. Установлено, что с ростом скорости усилие волочения увеличивается на 30-40% при изменении скорости в диапазоне 0.01-1 м/с [15]. При более высоких скоростях (примерно 5.8-6.7 м/с) усилие волочения снижается. Исследования, проведенные Е.В.Пальмовым [30] в диапазоне скорости 0.0001-7.5 м/с показали, что усилие волочения от скорости практически не зависит и лишь при малых скоростях она возрастает. В работе [13] отмечено снижение силы с повышением скорости в пределах 3-12 м/с при волочении низкоуглеродистой стали диаметром 01.0 мм. При волочении со скоростью близкой к 25 м/с сила снижается на 15-17%. В работе [31] при волочении тонкой (01.0 мм) стальной высокоуглеродистой проволоки со скоростями до 30 м/с отмечено снижение силы волочения на 20%.

Таким образом, из изложенного следует, что в области малых скоростей усилие волочения растет, при скоростях свыше 2-12 м/с сила меняется мало, т.е. приводит к ее снижению. Дальнейшее увеличение скоростей практически не влияет на усилие волочения [15].

Выявлению зависимости усилий волочения от противонапряжения посвящен ряд работ. В работе [28] экспериментальными методами получены зависимости сил натяжения проволоки от усилий волочения. Противонапряжения по своей абсолютной величине близки к величинам усилий волочения. Противонапряжения проволоки по своему значению могут приближаться к пределу текучести материала проволоки, что приводит к возникновению процесса пластической деформации проволоки вне волокна, которое в свою очередь приводит к обрыву проволоки. Общая зависимость усилий волочения от противонапряжения, приведенная в работах [1,3,28,32, 33], имеет вид падающей гиперболы. Кривые, показывающие зависимость усилий волочения от противонапряжений в большинстве, имеют прямолинейные [15,34] и криволинейные [1] участки, а в ряде случаев сложную форму, близкую к гиперболе.

Разнообразие факторов, влияющих на величину усилий волочения, а также сложная зависимость ее от частных факторов как скорость волочения и противонапряжение, дает возможность утверждать, что невозможно аналитически прогнозировать изменения усилий волочения. Поэтому возникает необходимость разработки экспериментальной установки для более точной оценки усилий волочения.

Заслуживает внимания прибор для измерения усилий волочения, конструкция и схема которого описаны в работах [35,36]. В нем в качестве чувствительного элемента используется датчик типа 1778 ДсТ.

Все вышеотмеченные воздействия, как внешние, так и возникающие в машине, передаются на нее через волокно и поэтому усилие волочения при исследовании математической модели является возмущающим воздействием, зависящим от целого ряда факторов, которые можно разбить на следующие группы [24]:

- технологические возмущающие воздействия, вызываемые неоднородностью проволоки по длине, неравномерным поступлением смазки в очаг деформации, износом рабочего инструмента, нагревом проволоки и т.д.;

- возмущающие воздействия, связанные с работой намоточных и размоточных устройств;

- возмущающие воздействия, связанные с конструкцией волочильного стана и вызываемые наличием упругости проволоки и упругих связей в электромеханической системе, кинематических погрешностей, различных приведенных моментов инерции отдельных блоков, ненадежной системой регулирования.

Оценке влияния на работу волочильного стана первых двух групп возмущающих воздействий посвящены работы [37].

Выявлению влияния упругих связей в электромеханической системе и наличия кинематических погрешностей в редукторе и снижению при этом повышенного уровня шума и вибрации на волочильных машинах и подобных машинных агрегатах посвящены работы [17-19,24].

Практически отсутствуют работы, посвященные вопросам динамики непрерывно-поточных машин-агрегатов с учетом упругости обрабатываемого материала. Можно указать лишь на работы ленинградской школы по динамике электропривода бумагоделательных машин [5,6], в которых на основе приближенных частотных методов проведен качественный анализ характера колебательных процессов в системах автоматического регулирования электроприводом.

Таким образом, работы в направлении изучения влияния упругости обрабатываемого материала на динамику непрерывно-поточных машин-агрегатов, в том числе волочильных станков, еще не получили должного развития, хотя именно проведение таких широких комплексных исследований с применением современной вычислительной техники открывает перспективы дальнейшего совершенствования ряда металлургических, текстильных, химических, бумагоделательных, волочильных и др. машин.

1.4 Обзор существующих систем автоматического регулирования электроприводом волочильных станков

В основном все прямоточные и петлевые волочильные машины оснащены электродвигателями постоянного тока, питание которых осуществляется от генераторов постоянного тока или регулируемых выпрямителей (тиристорных преобразователей) [11]. Существуют параллельное, последовательное и индивидуальное подключения цепей якоря к источникам питания [11]. В настоящее время в основном последовательное соединение якорей двигателей применяется в приводе прямоточных волочильных машин, редко в петлевых волочильных машинах [11], параллельное и индивидуальное (блочное) - в приводе петлевых волочильных машин [11].

Достоинством используемой в настоящее время последовательной схемы соединения электродвигателей, как считают некоторые авторы [37], является наличие саморегулирования скоростей вращения двигателей при наличии механических связей между валами двигателей посредством проволоки. Требуемое соотношение скоростей в волочильной машине устанавливается величинами потоков возбуждения двигателей, а при изменении нагрузки на одном из двигателей автоматически происходит перераспределение напряжений на якорях двигателей и поддерживается необходимое соотношение скоростей. Разгон, торможение и регулирование скорости волочения производится соответствующими изменениями напряжения на якорях двигателей.

В общем случае, разработанные в настоящее время системы регулирования процессом волочения можно условно разделить на три группы.

К первой группе относятся системы регулирования частоты вращения двигателей из условий сохранения постоянства секундных объемов [11]. В работах описана система регулирования скорости петлевого стана. Положение петли регулируется изменением частоты вращения двигателя соответствующего блока, которая определяется током обмотки возбуждения и каждый блок имеет обратную связь по скорости. В работах предложена система многосвязного регулирования скоростей блоков петлевого стана, использующая многополюсник для учета положения всех петель и устраняющая тем самым лишние возмущения, уменьшая отклонение петли от заданного положения.

Основными недостатками рассмотренных систем автоматического регулирования скорости волочильного стана являются:

- отсутствие регулирования технологических параметров процесса волочения, что не дает возможности использовать преимущества волочения с противонатяжением. Регулирование скорости блоков петлевого волочильного стана производится без учета положения петли (скорости) на других блоках и их управляющих воздействий;
- отсутствие учета упругих связей электромеханической системы и упругости проволоки.

Ко второй группе относятся САР прямоточных волочильных станов, которые не имеют датчиков, дающих информацию о процессе волочения. Поэтому эти машины в основном оснащены системами регулирования моментов на волочильных блоках [11]. В этих станах якоря всех двигателей соединены последовательно, вследствие чего сумма электродвижущей силы (ЭДС) двигателей постоянна. Соотношения скоростей и величины моментов двигателей задаются потоками возбуждения. При изменении нагрузки на одном из волочильных барабанов величина ЭДС на этом двигателе меняется, момент уменьшается или увеличивается в зависимости от знака приращения усилий волочения, что соответственно меняет скорость блока и затем всей машины. В работе [32] рассматривается стабилизация тяговых усилий на волочильных барабанах. При заправке машины проволокой блоками памяти запоминаются моменты на двигателях, которые служат установкой для стабилизации моментов во время работы волочильного стана.

Системы регулирования моментов обладают следующими основными недостатками:

- величина противонатяжений не регулируется и может колебаться в широких пределах, при которых происходит обрыв проволоки;
- не учитываются при регулировании динамические составляющие моментов, вследствие чего в переходных режимах значения величин противонатяжений могут превзойти допустимые.

Эти недостатки характерны также так называемым системам саморегулирования прямоточными станами, описанным в работах.

Особого внимания заслуживает третья группа систем регулирования, где осуществляется стабилизация противонатяжений проволоки. Вопрос о построении оптимальной системы стабилизации противонатяжений в прямоточном волочильном стане методом динамического программирования был рассмотрен в работах [24]. В результате решения уравнения динамического программирования и нахождения функции Ляпунова определен закон регулирования и показала схема оптимальной системы стабилизации противонатяжений. Для получения информации о противонатяжении используется датчик давления на волоку. Однако отсутствие достаточно надежных датчиков требует поиска способов косвенной оценки силы волочения. К недостаткам таких систем с неполной информацией следует отнести сложность правильного выбора весовых коэффициентов, что не позволяет установить на волочильных станах оптимальное противонатяжение, а это в свою очередь приводит к увеличению энергозатрат на единицу продукции. Кроме того, отсутствие учета упругих связей, особенно упругих свойств проволоки, при ее волочении приводит к возникновению значительных динамических нагрузок в кинематической передаче и проволоке, что снижает надежность и производительность волочильного оборудования. Наряду с указанными недостатками, характерными для всех рассмотренных систем имеет место и тот факт, что еще не в полной мере используются возможности управления электроприводом постоянного тока независимого возбуждения, а именно, не исследуется дополнительная возможность управления магнитным полем двигателя с целью формирования желаемых статических и динамических характеристик волочильного стана. Более того, не учитывается взаимовлияние различных секций машин через источник питания электродвигателей секций различные в зависимости от схемы питания.

Необходимо отметить, что в настоящее время волочильное производство за рубежом и у нас в стране развивается в направлении создания непрерывных установок, повышения скорости, улучшения условий охлаждения и смазки на базе широкого использования электронных систем автоматики.

В производстве так же рассматриваются принципы программного управления работой волочильных машин многократного волочения с использованием микропроцессоров в линиях волочильных машин. Фирма Hi-Draw Machinery Ltd создала систему автоматического проектирования волочильных машин с синхронизацией скоростей блоков с помощью компьютерных систем. Фирма Davis-Standard (США) применяет систему контроля в линиях по производству проволоки с микропроцессором, что позволяет точно регулировать основные параметры процесса волочения.

Основным достоинством работы таких станов является отсутствие скольжения проволоки по барабану и закручивания ее при переходе с одного барабана другой. Одним из путей устранения скольжения проволоки является автоматическое регулирование окружных скоростей тяговых барабанов до полного совпадения со скоростью проволоки. Каждый барабан работает от

индивидуального привода с регулируемым числом оборотов. Между соседними барабанами при помощи специальных натяжных устройств из протягиваемой проволоки образуется петля, длина которой изменяется в зависимости от натяжения проволоки. Это изменение воздействует на скорость предыдущего барабана, чем достигается синхронизация скоростей.

К преимуществам прямоточного волочения по сравнению с петлевым относится более легкая заправка, так как отпадает необходимость огибать проволоку вокруг направляющих роликов небольшого диаметра. В прямоточных станах имеет место саморегулирование скоростей вращения двигателей, обеспечиваемое последовательным соединением якорей при питании их от общего генератора.

Влияние многих видов возмущений на обрывность проволоки существенно зависит от типа примененного электропривода и системы его автоматического управления и регулирования. Электроприводы ПВС, как правило, оснащены электродвигателями постоянного тока, питание которых осуществляется от управляемых тиристорных преобразователей типа БТУ, ЭПУ, КТЭ и т.д. При этом используются известные схемы питания: последовательное или параллельное соединение якорей электродвигателей с подключением к одному общему источнику питания и индивидуальное подключение каждого двигателя к собственному источнику питания.

Проведение исследования показали, что последовательное соединение якорей двигателей применяется в электроприводе ПВС, редко в петлевых станах [1,7,27]. Параллельное и индивидуальное соединение якорей двигателей используются, в основном, в электроприводе петлевых станов [30 - 32] и очень мало – в ПВС. Это объясняется тем, что ПВС обладает повышенной чувствительностью к возмущающим воздействиям, причем, любое возмущение возникающее на линии волочения, распространяется как по ходу, так и против хода волочения. Это приводит к увеличению числа обрывов проволоки. Источниками возмущений могут быть не только изменения силовых параметров волочения, диаметра и предела прочности проволоки, но и высокочастотные колебания, связанные с биением барабана и вариациями упругих свойств проволоки, среднечастотные колебания барабанов, связанные со свойствами электропривода, колебания питающей сети, изменения режима смазки в волокнах и т.п. В связи с этим, при параллельном соединении якорей двигателей возникает существенная проблема в синхронизации скоростей между блоками волочения, как в статическом, так и в динамическом режимах работы ПВС. Кроме того, требуется автоматически регулировать потоки двигателей для выравнивания статических токов якорей двигателей, и появляются значительные броски токов двигателей в режиме заправки при выборе петли проволоки.

Преимущество индивидуального питания двигателей заключается в высоком быстродействии электропривода за счет управления двигателями по цепи якорей. Однако массогабаритные показатели и надежность электропривода с индивидуальным питанием гораздо хуже, чем у

электропривода с параллельным и последовательным соединении якорей. Поэтому, в ПВС широкое распространение получил электропривод с последовательным соединением якорей, который получил название привода с саморегулированием.

На рисунке 1.3 изображена функциональная схема электропривода ПВС ВПТ-5/750. Якоря электродвигателей М1-М5 волоочильных барабанов Б1-Б5 соединены последовательно и получают питание от тиристорного преобразователя ТП, который, совместно с неуправляемым выпрямителем НВ выдает требуемое напряжение 550В. Причем, НВ питается от отдельного трансформатора напряжением 0,23кВ. Обмотки возбуждения LM1-LM5 подключены к рабочей обмотке магнитных усилителей МУ1-МУ5.

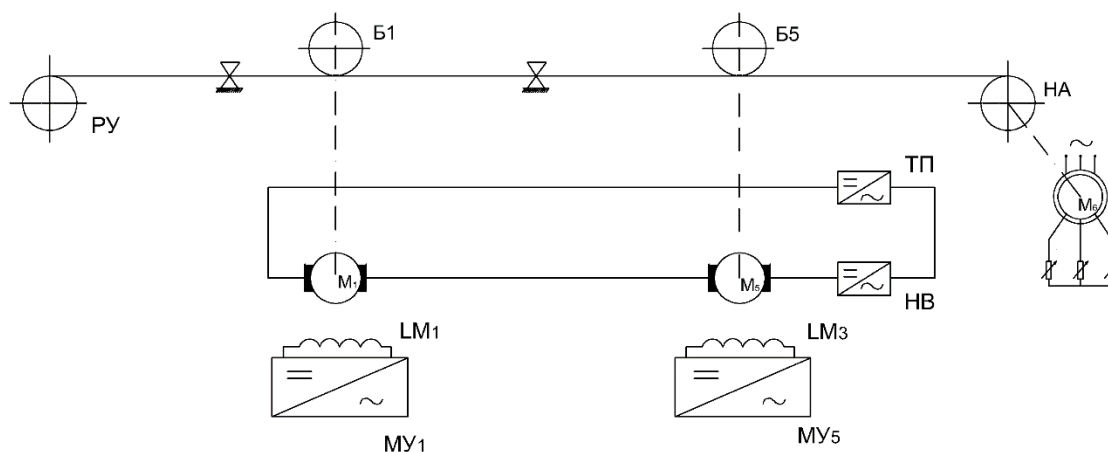


Рисунок 1.3-Функциональная схема электропривода ПВС ВПТ-5 / 750

Электропривод намоточного аппарата НА выполнен в виде асинхронного электродвигателя с фазным ротором. Разгон двигателя НА осуществляется в функции времени. Размоточное устройство РУ снабжено механическим тормозом, который на схеме не показан.

Требуемое соотношение скоростей между барабанами устанавливается величинами потоков возбуждения двигателей. При изменении нагрузки на одном из двигателей, автоматически происходит перераспределение напряжений на якорях двигателей и поддерживается необходимое соотношение скоростей. Разгон, торможение и регулирование скорости волочения производятся соответствующим изменением напряжения на якорях двигателей тиристорным преобразователем.

Главным достоинством рассмотренного электропривода ПВС является простота реализации. К недостаткам электропривода ПВС с саморегулированием следует отнести следующее: во-первых, при обрыве проволоки, напряжение на якоре резко возрастает и прикладывается к разгрузившемуся двигателю, что снижает срок его службы; во-вторых, при увеличении кратности волочения больше трех, требуется высоковольтный источник питания. Кроме того, исследования, проведенные в работах ряда

авторов, свидетельствуют о существовании проблемы обрывности проволоки в ПВС с саморегулированием. Основной причиной обрывности проволоки является отсутствие на действующих ПВС надежной системы регулирования, обеспечивающей оптимальные силовые параметры волочения.

На протяжении ряда лет как в нашей стране, так и за рубежом, ведутся работы по созданию систем автоматической стабилизации силовых параметров волочения и их оптимизации.

Построение систем управления ПВС ведется в двух направлениях: с использованием датчиков непосредственного замера силовых параметров в процессе волочения (системы с полной информацией) и путем косвенного контроля силовых параметров (системы с неполной информацией). Теоретически, системы управления с полной информацией обладают рядом преимуществ по сравнению с другими системами. На их базе ведутся работы в области создания автоматизированного электропривода волочильных станков с широким использованием электронных систем автоматики. Например фирма Hi-Draw Machinery Ltd. создала систему автоматического регулирования волочильного стана, обеспечивающую синхронизацию с помощью компьютерных систем. Фирма Davis-Standart применяет систему контроля в линиях по производству проволоки с микропроцессором. Однако, попытки внедрения в производство систем управления ПВС с полной информацией заканчивались неудачно из-за отсутствия высоконадежных датчиков силовых параметров волочения. Вследствие этого возникла необходимость в поиске способов косвенной оценки силовых параметров волочения и разработке систем с неполной информацией.

Системы управления с неполной информацией разрабатываются на ведущих предприятиях в области обработки металлов и автоматизации волочильного оборудования, а также в научных и учебных ВУЗах [12]. Основной целью разработанных систем регулирования является стабилизация силовых параметров волочения.

На рисунке 1.4 изображена функциональная схема системы регулирования электропривода ПВС, разработанная в отраслевой лаборатории ОНИЛАВ при Казахском политехническом институте им.В.И.Ленина. Электродвигатели М получают питание от тиристорного преобразователя ТП. Обмотки возбуждения подключены к выходам усилителей У, которые совместно с сумматорами СУ и элементами сравнения ЭС образуют индивидуальные регуляторы ЭДС двигателей. В системе предусмотрены задатчики интенсивности ЗИ, подключенные к общему источнику напряжения ИН, и обратная связь по току якорей через датчик тока ДТ.

Стабилизация силовых параметров осуществляется по принципу подчиненного регулирования. Индивидуальные регуляторы в цепи возбуждения каждого электродвигателя позволяют обеспечить стабилизацию противонапряжения следующим образом. Ток в якорях последовательно соединенных двигателей одинаков, а напряжения на якорях различные и определяются заданным маршрутом волочения. При налипании металла на

поверхность канала волокна, расположенной, например, между тяговыми барабанами с двигателями М3 и М4, приложенное к входящей в эту волоку проволоке противонапряжение уменьшается. За счет роста нагрузки снижается ЭДС двигателя М3 и предыдущих М2 и М1. Выполнение данного устройства

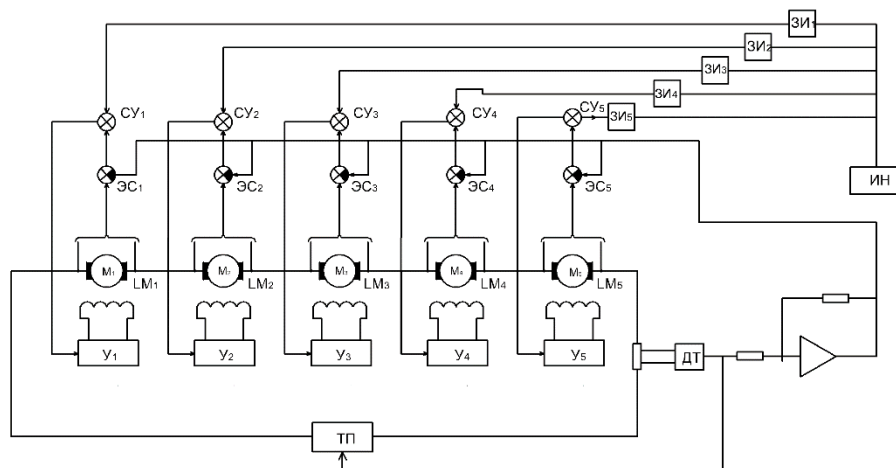


Рисунок 1.4-Функциональная схема системы регулирования электроприводом ПВС

по принципу подчиненного регулирования обеспечивает рост ЭДС двигателей М4 и М5. При этом происходит увеличение общего тока и напряжения на якорях двигателей перераспределяются пропорционально изменениям противонапряжений между соответствующими тяговыми барабанами. Т.е. напряжение падает на якорях двигателей М1 и М2 и растет на якорях двигателей М4 и М5.

Более совершенная система стабилизации силовых параметров разработана в работе, функциональная схема которой изображена на рисунке 1.5. Якоря, соединенные последовательно, и обмотки возбуждения LM двигателей М получают питание от управляемых источников напряжения УН. Система стабилизации состоит из блока 1 выделения электромагнитного момента, блоков 2 и 3 памяти заданного и рабочего давления на волоку, блока 4 сравнения текущих и заданных значений моментов, блока 5 выделения изменения давления на волоку, блока 6 уставок давления на волоку, пороговых элементов 7, узла блокировки 8 и блока сравнения 9.

В системе стабилизации имеется узел контроля давления наволоку, в принципе работы которого заложена зависимость давления на волоку от диаметра ее рабочей поверхности, то есть система позволяет фиксировать изменение давления наволоку и, при превышении его отклонения выше допустимого, сигнал с выхода порогового элемента запрещает дальнейшую работу стана и сигнализирует о необходимости замены волок.

Величина давлений на волоку определяется путем алгебраического суммирования величины противонатяжения предыдущего блока и величины тягового усилия без противонатяжения последующего блока в блоках суммирования 9. В рабочем режиме в блоке 4 происходит сравнение

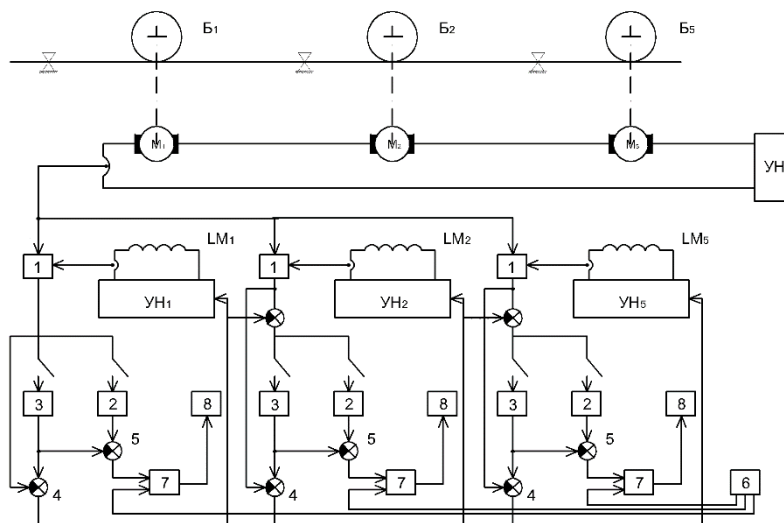


Рисунок 1.5-Функциональная схема системы стабилизации силовых параметров на ПВС

текущего и заданного моментов, сигнал которого подается на вход регулируемого источника УН для регулировки тока возбуждения. Таким образом, поддерживается постоянство электромагнитного момента двигателя заданной величины.

Рассмотренные системы стабилизации силовых параметров ПВС и подобные им системы [12] обладают существенными недостатками: стабилизация заданной величины моментов двигателей не может обеспечить безобрывного волочения, так как по мере износа волочильного инструмента давление на волоку постоянно уменьшается, а величина противонатяжения растет; возмущающие воздействия, поступающие от размоточного устройства, взаимодействуют с упругими свойствами проволоки и упругими связями редуктора, возбуждают незатухающие колебания и приводят к нарушению устойчивости системы регулирования электропривода ПВС. Кроме того, существующие системы регулирования ПВС не нашли применения в действующих волочильных станах из-за сложности их реализации и низкой надежности.

Из описания работ систем управления электроприводом ПВС можно сделать вывод о необходимости разработки системы регулирования, которая позволит целенаправленно изменять и поддерживать заданные силовые параметры по мере их изменения.

Из наличия вышеотмеченных недостатков существующих САР волочильными станами следует необходимость разработки новых систем

автоматической стабилизации натяжения проволоки в прямоточных волочильных станах с перспективой применения средств вычислительной техники. Разработка таких систем возможна на основе комплексных экспериментальных и теоретических исследований этих машин.

1.5 Постановка задачи исследований

Приведенный выше обзор материалов по теории и практике волочения и анализ накопленных экспериментальных результатов позволяют сделать следующие выводы:

1. Наиболее перспективными волочильными машинами являются прямоточные многократные станы без скольжения, которые имеют следующие преимущества перед другими видами волочильных машин: возможность волочения с повышенными скоростями, отсутствие скручивания проволоки, низкие энергозатраты на единицу продукции, повышенная стойкость волок и барабанов за счет волочения с противонатяжением.

2. Производительность прямоточных волочильных станов в основном снижается за счет обрывов проволоки в процессе волочения, частота которых в значительной мере определяется уровнем и стабильностью натяжения проволоки на всех блоках машины.

3. Наибольшая эффективность эксплуатации волочильных станов возможна при наличии информации об усилиях волочения.

4. Существующие САР прямоточными многократными волочильными станами не обеспечивают постоянство натяжений проволоки между блоками на оптимальном уровне как в установившемся, так и в переходном режимах. В станах с параллельными и индивидуальными схемами питания двигателей противонатяжение проволоки изменяется при переходе от одного режима к другому.

5. Необходимо исследовать возможность косвенного контроля и регулирования силовых параметров волочения.

В соответствии с изложенным актуальным является разработка системы стабилизации противонатяжений проволоки в многократных волочильных станах, позволяющей поддерживать натяжения проволоки на заданном оптимальном уровне и тем самым повысить производительность стана за счет снижения обрывности проволоки.

Глава 2. Основные принципы стабилизации противонатяжений проволоки и его оптимизация на прямоточных станах с разными схемами питания приводных электродвигателей

Как было отмечено в предыдущем разделе, технология процесса волочения требует создания усилия противонатяжения. Последнее может быть реализовано как с помощью различного вида конструктивных приемов,

так и путем создания специальных систем автоматического управления. Эти системы управления можно классифицировать следующим образом:

1) по характеру изменения во времени усилия противонапряжения: статистические, динамические.

2) по виду измерения усилия противонапряжения: прямое измерение, косвенное измерение.

Основной критерий качества управления автоматической системы противонапряжения совпадает с критерием, сформулированным для тяговых приводов - минимизация динамических усилий в проволоке при предельно допустимом быстродействии и минимуме энергетических затрат.

Проблема стабилизации противонапряжения в многоканальном стане представляет собой совокупность двух взаимосвязанных задач: во-первых, поддержание известного соотношения в β_i между силами T_i и Q_i , возникающими в отрезке проволоки, заключенном между $(i-1)$ -ым и i -ым барабанами, и во-вторых, синхронное поддержание этого соотношения β_i во всех n отрезках проволоки, где n - число волок.

На первой волоке многократного волочильного стана усилие противонапряжения Q_1 создается заправочным устройством. Во всех последующих волоках усилие противонапряжения Q_i ($i \in 2, \dots, n$; n - число волок) создается тяговым приводом предыдущего барабана. Таким образом, i -ый тяговый привод барабана одновременно выступает в двух функциях — создание силы волочения T_{i+1} и одновременно - усилия Q_i . Это обстоятельство значительно усложняет задачу синтеза системы управления приводного барабана. Поэтому ниже, в качестве самостоятельного вопроса рассматриваются особенности синтеза автоматической стабилизации противонапряжения проволоки в установившихся и переходных режимах.

2.1 Синтез законов управления противонапряжением в установившихся режимах

Для установившегося режима возникает необходимость решения следующей задачи: найти закон управления $U_{BK} = U_{BK}(U_k^0)$, обеспечивающий необходимое и достаточное условие абсолютной инвариантности проволоки от U_k^0 ($k=1, n$) при

$$F_k = F_k^0 = \text{const}, k=1, n$$

где U_{BK} – напряжение обмотки возбуждения;

U_k^0 – установившееся значение U питания цепи якоря;

F_k – усилие волочения;

F_k^0 – начальное усилие волочения.

Задачу решим следующим образом. Пусть выполнены условия стабилизации противонатяжения проволоки, т.е. $T_k = T_k^0 = \text{const}$, $k=2, n$, тогда для моментов нагрузки имеем:

$$M_{HK} = R_K j_K (T_k^0 + F^0 - T_{k-1}^0) = \text{const}, k=1, n \quad (2.1)$$

Из второй строки системы

$$\begin{cases} r_k i_k^0 + C_k \Phi_k^0 \omega_k^0 - U_k^0 = 0, k=1, n \\ C_k \Phi_k^0 i_k^0 - R_k j_k (T_k^0 + F^0 - T_{k+1}^0) = 0, k=2, n \\ T_1^0 \equiv T_{n+1}^0 \equiv 0 \\ R_k j_k \omega_k^0 - \mu_k \omega_{k-1}^0 R_{k-1} j_{k-1} = 0, k=2, n \\ r_{BK} f_k(\Phi_k^0) - U_{BK} = 0, k=1, n \end{cases} \quad (2.2)$$

Описывающей динамику электромеханического привода прямоточного волочильного стана, с учетом (2.1) и $\Phi_k^0 > 0$ имеем:

$$i_k^0 = M_{HK} / C_k \Phi_k^0, k=1, n \quad (2.3)$$

Подставляя третье уравнение системы (2.2.) в виде

$$\omega_k^0 = \alpha_k \omega_1^0 = 0, k=2, n \quad (2.4)$$

где

$$\alpha_k = \prod_{j=2}^k \mu_k \frac{R_1 j_1}{R_k j_k}, k=2, n \quad (2.5)$$

и выражение (2.3) в первую строку систему (2.2), получим уравнения с неизвестными Φ_k^0 , $k=1, n$, содержащие параметр ω_1^0 :

$$\alpha_k I_k^2 \omega_1^0 \Phi_k^0{}^2 - C_k U_k^0 \Phi_k^0 + r_k M_{HK}, k=1, n \quad (2.6)$$

Эти уравнения имеют действительное решение, если дискриминанты

$$D_k = U_k^2 - 4\omega_k^0 M_{HK} r_k \geq 0, k=1, n$$

Откуда

$$\omega_k^0 \leq \frac{U_k^0{}^2}{4r_k M_{HM}}, k = 1, n \quad (2.7)$$

Введем параметры $\xi \in (0;1)$ такие, что при условиях (2.7) имеют место неравенство:

$$\omega_k^0 \leq \frac{U_k^0{}^2}{4r_k M_{HM}} (1 - \xi_k^2), k = 1, n \quad (2.8)$$

Тогда решения уравнений (2.6) запишется в виде:

$$\Phi_k^0 = \frac{(1 \pm \xi_k) U_k^0}{2C_k \omega_k^0}, k = 1, n \quad (2.9)$$

Подставляя (2.8) в (2.9), окончательно имеем:

$$\Phi_k^0 = \frac{2r_k M_{HM}}{C_k (1 \pm \xi_k) U_k^0}, k = 1, n \quad (2.10)$$

Покажем обратное. Пусть магнитные потоки $\Phi_k^0, k = 1, n$ изменяются в зависимости от U_k по закону (2.10). Тогда в силу условий $\xi_k \in [0;1]$ скорости двигателей определяются формулами (2.7), причем они должны удовлетворять соотношениям (2.4), вытекающим из третьей строки уравнений статики, откуда

$$\frac{U_k^2}{4r_k M_{HM}} (1 - \xi_k^2) = \prod_{j=1}^k \mu_j \frac{R_1 j_1 U_1^2}{R_k j_k 4r_1 M_{HM}} (1 - \xi_1^2), k = 2, n \quad (2.11)$$

или

$$\frac{M_{H1}}{M_{HK}} = \beta'_k, \beta'_k = \prod_{j=1}^k \beta_j \frac{R_1 j_1 (1 - \xi_1^2) U_1^2}{R_k j_k (1 - \xi_k^2) U_k^2}, k = 2, n \quad (2.12)$$

Подставляя значение моментов нагрузки из (2.1) в (2.11), получим систему линейных уравнений относительно $T_k, k = 2, n$

$$T^{0_2} + \beta_k (T^{0_k} - T^{0_{k+1}}) = F^{0_1} - \beta_k F^{0_k}, k = 2, n \quad (2.13)$$

где

$$\beta_k = \frac{(1 - \xi_k^2) U_k^2}{(1 - \xi_k^2) U_k^2} \prod_{j=1}^k \mu_j \quad (2.14)$$

Эта система при известных значениях усилий волочения $F_k, k = 1, n$ имеет единственное решение, которое по правилу Крамера можно записать в виде:

$$T_k^0 = \alpha_k / \alpha, k = 2, n$$

где

$$\alpha_k^n = \sum_{j=2}^n \prod_{j=1}^{k-1} \beta_j \sum_{j=i}^n F_j^0 - \left(\sum_{i=2}^{k-1} \prod_{j=2}^n \beta_j + \prod_{j=2}^n \beta_j \right) \sum_{j=k}^n F_j^0 \quad (2.15)$$

$$\alpha = \sum_{i=2}^n \prod_{j=2}^n \beta_j + \prod_{j=2}^n \beta_j \neq 0$$

Очевидно, при постоянных усилиях волочения $F_k, k = 1, n$ и $\beta_k, k = 1, n$ решение системы (2.13) также представляет совокупность по постоянных чисел $T_k, k = 2, n$.

Рассмотрим далее, какое из двух положительных решений (2.9) следует использовать на практике. Для этого подставим (2.3) с учетом (2.10) и (2.7) в первую строку системы (2.2)

$$r_k i_k^0 + C_k \Phi_k^0 \omega_k^0 - U_k^0 = 1/2(1 + \xi_k) U_k^0 + 1/2(1 \pm \xi_k) U_k^0 - U_k^0 = 0, k = 1, n \quad (2.16)$$

Первое слагаемое соответствует падению напряжения на активном сопротивлении цепи якоря, а второе — против э.д.с. двигателя. Отсюда очевидно, что для снижения тепловых потерь в двигателе из двух решений уравнений (2.10) необходимо брать большее, а именно:

$$\Phi_k^0 = \frac{2r_k M_{HM}}{C_k (1 \pm \xi_k) U_k^0}, k = 1, n \quad (2.17)$$

Наконец оптимальный закон управления напряжением обмотки возбуждения найдем, подставив (2.17) в четвертую строку системы (2.2):

$$U_{BK}^0 = r_{BK} f_k (\gamma_k / U_k^0), k = 1, n \quad (2.18)$$

где

$$\gamma_k = \frac{2r_k M_{HM}}{C_k (1 - \xi_k)}, k = 1, n$$

Таким образом доказано утверждение: для абсолютной инвариантности статистического противонатяжения проволоки между блоками по отношению к изменению режима волочения необходимо и достаточно, чтобы напряжения обмотки возбуждения и цепи якоря каждого двигателя были связаны соотношением (2.18).

2.2 Возможные режимы регулирования силовых параметров волочения

Процесс волочения с прямонатяжением применяется на прямоточных станах многократного волочения. На рисунке 2.1 приведена схема силовых параметров волочения трехкратного волочильного стана. Силовые параметры процесса определяются соотношением (16):

$$N_n = T_n + Q_n = P_n + Q_{n-1}, \quad (2.19)$$

- где T – тяговое усилие на барабане;
 P – давление на волоку;
 Q – противонатяжение;
 N – переднее натяжение;
 n – номер блока.

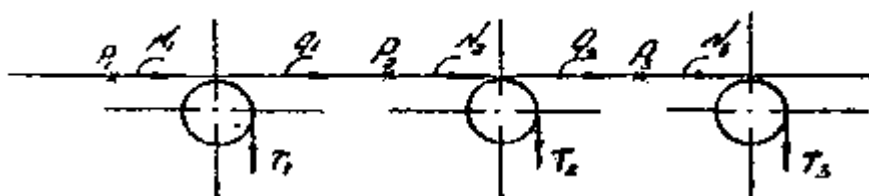


Рисунок 2.1 - Схема силовых параметров волочения 3-кратного прямоточного стана

Каждый из параметров соотношения (2.19) существенно влияет на ход процесса волочения, а выбор того или другого параметра, в качестве регулируемого, определяет как конструктивную, так и технологическую сторону вопроса. Давление на волоку P связано с процессом деформации металла в волоке и является сложной функцией от многих факторов (температура, прочность и диаметр проволоки, качество поверхности проволоки, состояние канала волоки и т.п.). Вследствие перечисленных причин, зависимость давления на волоку P от противонатяжения или любого другого параметра определяется семейством характеристик. На рисунке 2.2

приведен примерный характер зависимости $P=f(Q)$ (кривые 1,3, 5). Здесь же приводятся зависимости усилия волочения (переднего натяжения) от противонатяжения $N=f(Q)$ (кривые 2, 4, 6). Зависимость $N=f(Q)$ может быть получена из зависимости $P=f(Q)$ по соотношению

$$N_n = P_n + Q_{n-1}. \quad (2.20)$$

Заштрихованная область соответствует отклонениям характеристик в зависимости от факторов, перечисленных выше. Нахождение рабочей точки в области разброса носит статистический характер. Исследования показали, что разброс параметров относительно усредненной кривой находится в пределах до $\pm 40\%$ [18].

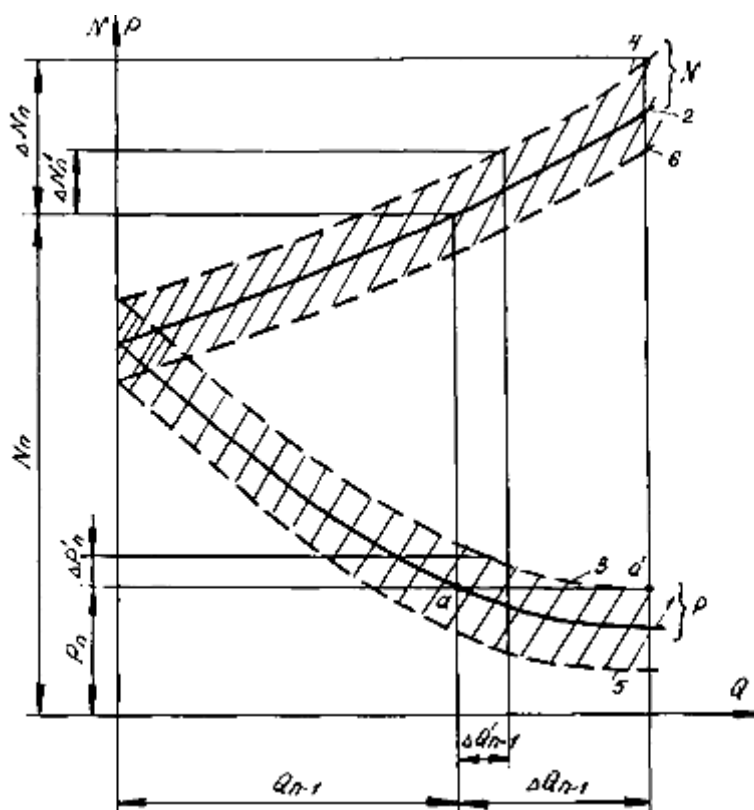


Рисунок 2.2 – Графики зависимостей $P_1N=f(Q)$ в режиме стабилизации давлений на волоку

Тяговое усилие на барабане также может являться сложной функцией нескольких параметров в зависимости от типа применяемого привода. В современных волочильных станах с противонатяжением с числом блоков три-шесть применяется электропривод постоянного тока. При двух блоках обычно - электропривод переменного тока. В случае применения электропривода постоянного тока выражение для тягового усилия

$$T = \frac{C_m \cdot \Phi \cdot I}{R_\delta} \cdot i - \frac{M_{xx}}{R_\delta} \cdot i - j \frac{d\omega}{dt}; \quad (2.21)$$

где C_m – постоянная двигателя;
 Φ – поток возбуждения;
 I – ток якоря двигателя;
 M_{xx} – момент холостого хода привода, приведенный к валу двигателя;
 j – момент инерции двигателя;
 ω – угловая скорость двигателя;
 R_δ – радиус барабана;
 i – передаточное число редуктора.

Возмущения в технологический процесс волочения поступают по двум параметрам: давлению на волоку и тяговому усилию. Противонатяжение определяет внутренние взаимосвязи. Как уже отмечалось [19], оно играет роль синхронизирующей связи между тяговыми барабанами и, кроме того, обеспечивает стабильность процесса волочения, исключая проскальзывание проволоки по барабану. Не менее важным параметром является усилие волочения (переднее натяжение) N

$$N_n = P_n + Q_{n-1} = T_n + Q_n \quad (2.22)$$

Обрывы проволоки, как правило, происходят в зоне приложения переднего натяжения при его чрезмерном увеличении. На рисунке 2.2 приведен примерный характер зависимости $N = f(Q)$ (кривые 2, 4, 6). Таким образом, противонатяжение ограничено, с одной стороны, минимальным значением Q_{min} , исключая проскальзывание проволоки по барабану, и, с другой стороны, максимальным значением, определяемым пределом прочности проволоки.

Существующие системы автоматического регулирования конструируются с использованием в качестве регулятора процесса волочения тягового органа, т.е. воздействием на тяговое усилие T . При этом изменяется величина противонатяжения, меняя как давление на волоку P , так и величину переднего натяжения N . Техническая реализация регуляторов с прямым воздействием на очаг деформации, как, например, это выполняется в прокатных станах с помощью нажимных винтов, составляет известные трудности, хотя и имеются исследования прямого воздействия на волоку посредством ультразвука, позволяющим снизить усилия волочения. В соответствии с зависимостями, изображенными на рисунке 2.2, противонатяжение можно использовать для регулирования давления на волоку. При жесткой стабилизации давления на волоку переднее натяжение в приращениях

$$\Delta N_n \approx \Delta Q_{n-1} \approx \Delta T_n + \Delta Q_n \quad (2.23)$$

Под жесткой стабилизацией здесь и далее следует понимать стабилизацию параметра, допускающую приближенное равенство, например (2.23).

Приращение ΔQ_{n-1} определяется по рисунку 2.2. При переходе с характеристики 1 на характеристику 3 необходимое приращение равно отрезку $\alpha-\alpha'$ при жесткой стабилизации P_n . Наклон характеристик на рабочем участке от Q_{min} до Q_{max} незначительный. Поэтому приращение ΔQ_{n-1} может иметь недопустимую величину и резко сократить возможности этого способа регулирования. При мягкой стабилизации давления на волоку выражение для переднего натяжения

$$\Delta N'_n = \Delta P'_n + \Delta Q'_{n-1} = \Delta T'_n + \Delta Q'_n. \quad (2.24)$$

Под мягкой стабилизацией здесь и далее следует понимать стабилизацию параметра, не допускающую приближенного равенства (2.24).

В этом случае можно расширить возможности регулирования давления на волоку, так как приращение $\Delta N'_n$ и $\Delta Q'_{n-1}$ меньше, чем при жесткой стабилизации давления на волоку. Приращение $\Delta T'_{n-1}$ можно получить, изменяя величину тягового усилия предыдущего барабана T_{n-1} . Характер передачи последующим блокам будет определяться выражением

$$\Delta N_n = \Delta T_n + \Delta Q_n. \quad (2.25)$$

Если выполнить электропривод таким, что

$$\Delta N_n \approx \Delta T_n,$$

то передачи последующим блокам не будет. В другом случае, т.е. при $T = \text{Const}$,

$$\Delta N_n \approx \Delta Q_n.$$

и возмущение передается полностью последующим блокам. В зависимости от характеристики тягового устройства последующим блокам будет передаваться определенная величина возмущения. Для локализации возмущения необходимо выполнять условие $\Delta N_n \approx \Delta T_n$.

Минимальное приращение переднего натяжения может быть получено, если увеличивать приращение давления на волоку и снижать приращение противонатяжения. Предельный случай приводит к жесткой стабилизации противонатяжений. Тогда приращение переднего натяжения

$$\Delta N_n \approx \Delta P_n \approx \Delta T_n.$$

Как при стабилизации давления наволоку, так и при стабилизации противонатяжения происходит приращение переднего натяжения. Минимальное приращение – при жесткой стабилизации противонатяжений, однако с максимальным приращением давления на волоку. При жесткой стабилизации переднего натяжения

$$\Delta P_n + \Delta Q_{n-1} = \Delta T_n + \Delta Q_n \approx 0, \quad (2.26)$$

т.е. при переходе с характеристик 1,2 на характеристику 3,4 (рисунок 2.3) переднее натяжение остается постоянным. Для этого необходимо изменить противонатяжение Q_{n-1} изменением T_{n-1} и изменить тяговое усилие T_n так, чтобы выполнялось равенство (2.26). При этом получает приращение давления на волоку ΔP_n , и возмущения через ΔQ_n передается последующим блокам, а через изменение тягового усилия T_{n-1} – предыдущим блокам. При мягкой стабилизации переднего натяжения

$$\Delta N'_n = \Delta P'_n + \Delta Q'_{n-1} = \Delta T'_n + \Delta Q'_n. \quad (2.27)$$

В этом случае приращение давления на волоку меньше, чем в предыдущем. В предельном случае, уменьшая приращение противонатяжения с целью уменьшения приращения давления на волоку, можно прийти к регулированию с жесткой стабилизацией противонатяжений.

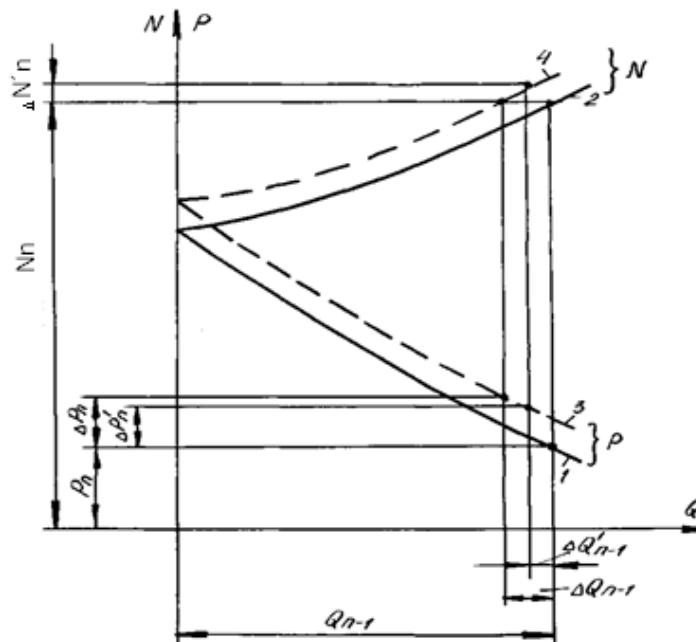


Рисунок 2.3 – Графики зависимостей $P_1N=f(Q)$ в режиме стабилизации передних натяжений

Решение системы уравнений (2.19) для m блоков исключением противонатяжения Q дает следующее соотношение между тяговыми усилиями и давлениями на волоку

$$\sum_1^m T_n = \sum_1^m P_n. \quad (2.28)$$

Из соотношения (2.28) следует возможность регулирования силовых параметров волочения посредством стабилизации усилий. При жесткой стабилизации тяговых усилий переднее натяжение в приращениях для блоков с n до m

$$\Delta N_n = \Delta P_n + \Delta Q_{n-1} = \Delta Q_n. \quad (2.29)$$

Для блока, на котором происходит приращение давления на волоку ΔP_n , приращение противонатяжения ΔQ_{n-1} равно нулю. Последующие противонатяжения увеличиваются. Если для m блока не будет выполнено равенство

$$\Delta P_m + \Delta Q_{m-1} = 0, \quad (2.30)$$

стан получает ускорение, т.е. либо остановится, либо начнет увеличивать скорость до восстановления равенства (2.30). При мягкой стабилизации тяговых усилий

$$\Delta N_n = \Delta P_n + \Delta Q_{n-1} = \Delta T_n + \Delta Q_n \quad (2.31)$$

Этот случай аналогичен мягкой стабилизации давлений на волоку или передних натяжений.

Таким образом, из проведенного анализа можно заключить, что наибольшее предпочтение следует отдать режиму мягкой стабилизации тяговых усилий.

2.3 Анализ многодвигательных электроприводов волочильных станов при различных схемах питания якорных цепей

В настоящее время электропривод прямоточных волочильных станов комплектуется в основном электродвигателями постоянного тока, якорные цепи которых соединены последовательно и подключены к общему источнику напряжения. В [19, 34] показано, что такая схема отвечает требованиям технологического процесса волочения с точки зрения обеспечения синхронизации секундных объемов обрабатываемого металла (волочимой проволоки).

Однако в литературе отсутствует подобный анализ для электроприводов с параллельным и блочным соединением приводных электродвигателей, применение которых в условиях дальнейшей интенсификации производства проволоки, с учетом развития силовой полупроводниковой техники, может оказаться экономически и технически более целесообразным.

Анализ причин малоэффективного использования волочильного оборудования показал, что в их основе лежат низкие регулировочные динамические и эксплуатационные свойства существующего электропривода, отсутствие автоматического регулирования силовых параметров, ограничивающие внедрение современных технологий волочения в специфических условиях производства (наличие токопроводящей пыли, вибрации и т.п.), при всевозрастающих требованиях к охране труда и технике безопасности. Помимо удовлетворения более высоких и качественно новых технологических требований, электропривод волочильного оборудования нового поколения должен обладать повышенными свойствами экономичности, надежности и парирования вредных явлений, возникающих из-за передачи динамических нагрузок на приводные механизмы.

Рассматриваем схемы при параллельном и блочном соединении якорей приводных электродвигателей. Анализ проводится в сравнении со схемой с последовательным соединением электродвигателей, как наиболее широко исследованной. На рисунке 2.4 приведены все три типа структурных схем соединения электроприводов: а - последовательное, б - параллельное, в - блочное.

Для электроприводов по схемам рисунки 2.4 б и в, также как и для схемы рисунок 2.4а справедливы уравнения [15], отражающие взаимосвязь электропривода и технологического процесса:

$$\begin{aligned} \omega_{j-1}\varphi_{j-1} &= \omega_j, \\ -J_j \frac{d\omega_j}{dt} - \frac{M_{Qj-1}}{\gamma_{j-1}} + M_{Qj} &= M_{Oj} - K_{Mj}i_j, \\ U_j &= i_j r_j + \alpha \frac{di_j}{dt} + K_{Ej}\omega_j, \end{aligned} \quad (2.32)$$

где ω – угловая скорость электродвигателя;

φ – коэффициент связи по скорости между блоками;

J –приведенный к валу электродвигателя момент инерции одного блока;

M_Q – момент, определяемый противонатяжением, приведенный к валу электродвигателя;

M_O –момент волочения без противонатяжения, приведенный к валу электродвигателя;

K_M – коэффициент пропорциональности между током и моментом;

γ – коэффициент, определяющий приращение тягового усилия на барабане в зависимости от противонапряжения [16,17];

i –якорный ток электродвигателя;

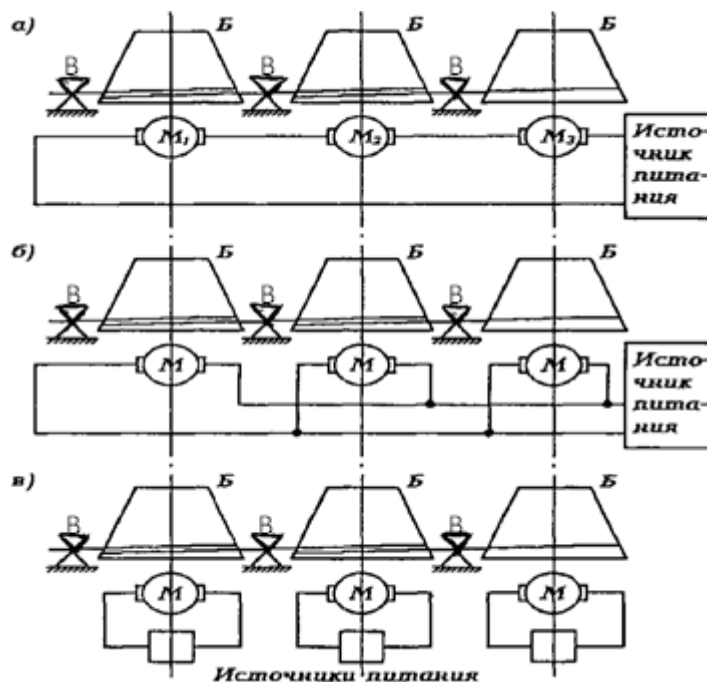
U – напряжение на зажимах якоря электродвигателя;

r – активное сопротивление якорной обмотки;

α – индуктивность якорной обмотки;

K_E – коэффициент пропорциональности между напряжением и угловой скоростью;

j – порядковый номер блока.



а – последовательное, б – параллельное, в – блочное

Рисунок 2.4 – Три типа структурных схем соединения электроприводов

Для схемы 2.4, б необходимо ввести дополнительное условие

$$U_j = U_n, \tag{2.33}$$

где U_n - напряжение источника питания.

Решение системы уравнений, составляющих приближенную математическую модель электромеханического движения многодвигательного прямоточного волочильного стана, относительно скоростей в установившемся режиме, дает уравнение механической характеристики

$$\omega_j = \left(\frac{U}{K_{En}^\vartheta} - \frac{M_{on}^\vartheta R_\vartheta}{K_{En}^\vartheta K_{Mn}^\vartheta} \right) \prod_{\varepsilon=1}^{j-1} \Pi\varphi_\varepsilon; \tag{2.34}$$

M_{On}^{ϑ} - эквивалентный момент волочения без противонапряжений;

K_{En}^{ϑ} - эквивалентный коэффициент пропорциональности между ЭДС и угловой скоростью;

K_{Mn}^{ϑ} - эквивалентный коэффициент пропорциональности между электромагнитным моментом и током.

Полученное выражение аналогично уравнению механической характеристики по схеме 2.4, а для схемы рисунка 2.4, а

$$K_{En}^{\vartheta} = \sum_{\varepsilon=1}^n K_{E\varepsilon} \prod_{i=\varepsilon-1}^{n-1} \varphi_i \quad ;(2.35)$$

$$K_{Mn}^{\vartheta} = \sum_{\varepsilon=1}^n K_{M\varepsilon} \prod_{i=n-1}^{\varepsilon-1} \gamma_i \quad ;(2.36)$$

для схемы рисунка 2.4, б

$$K_{En}^{\vartheta} = \sum_{\varepsilon=1}^n K_{E\varepsilon} K_{M\varepsilon} \prod_{i=\varepsilon-1}^{n-1} \varphi_i \prod_{i=n-1}^{\varepsilon-1} \gamma_i / \sum_{\varepsilon=1}^n K_{M\varepsilon} \prod_{i=n-1}^{\varepsilon-1} \gamma_i ; \quad (2.37)$$

$$K_{Mn}^{\vartheta} = \sum_{\varepsilon=1}^n K_{M\varepsilon} \prod_{i=n-1}^{\varepsilon-1} \gamma_i \quad (2.38)$$

для схемы рисунка 2.4, в

$$K_{En}^{\vartheta} = \sum_{\varepsilon=1}^n K_{E\varepsilon} K_{M\varepsilon} \prod_{i=\varepsilon-1}^{n-1} \varphi_i \prod_{i=n-1}^{\varepsilon-1} \gamma_i / \sum_{\varepsilon=1}^n \frac{U_{\varepsilon}}{U} K_{M\varepsilon} \prod_{i=n-1}^{\varepsilon-1} \gamma_i ; \quad (2.39)$$

$$K_{Mn}^{\vartheta} = \sum_{\varepsilon=1}^n \frac{U_{\varepsilon}}{U} K_{M\varepsilon} \prod_{i=n-1}^{\varepsilon-1} \gamma_i ; \quad (2.40)$$

$R_3 = r$ – если $r_1 = r_2 = r_3 = r_n$;

$$M_{On}^{\vartheta} = \sum_{\varepsilon=1}^n M_{O\varepsilon} \prod_{i=n-1}^{\varepsilon-1} \gamma_i ; \quad (2.41)$$

По полученным выражениям механическая характеристика многодвигательного электропривода стана с жесткой связью по проволоке, независимо от схемы соединения, приводится к механической характеристике однодвигательного при соответствующем приведении коэффициентов $K_{M\varepsilon}$ и $K_{E\varepsilon}$.

Закономерности системы многодвигательного электропривода по схемам 2.4, а, 2.4, б, 2.4, в, можно проследить на примере двухдвигательного

электропривода с последующей заменой значений моментов и потоков на эквивалентные. Для упрощения коэффициент синхронной связи φ , принимается равным 1, что означает равенство кинематической $(ij-1)/ij$ и технологической μ_{i-1} вытяжек. Тогда привод сводится к системе с общим жестким валом, в которой последующий по ходу волочения, второй двигатель является ведущим, т.е. имеет избыточный электромагнитный момент в отличие от обычной системы. Кроме того, коэффициент γ , определяющий приращение тягового усилия на барабане, в зависимости от противонатяжения, принимается равным 1, что соответствует работе привода при противонатяжении 40-50% [16,17] от тягового усилия.

Так как в связанной жестким валом системе угловые скорости равны, то в точке холостого хода для схемы 2.4 а $\omega_0 = \omega_{01} = \omega_{02}$. На рисунке 2.5 показаны механические характеристики двухдвигательного электропривода при таком соединении: 1 и 2 - характеристики отдельных приводов при совместной работе; 3 - характеристика всего привода. Из построений следует:

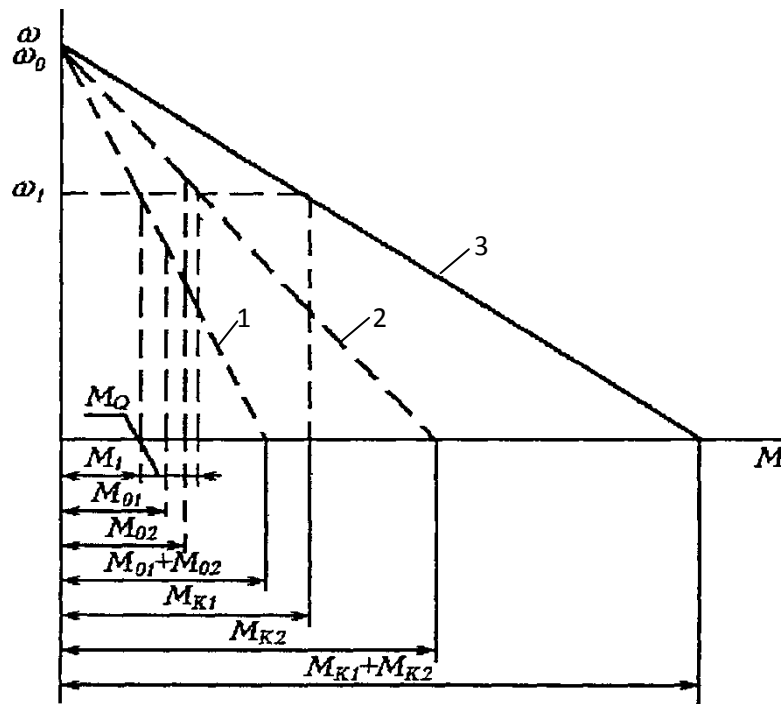
$$M_Q = M_{01} - M_1. \quad (2.42)$$

Здесь M_1 - электромагнитный момент, развиваемый первым двигателем, определяется из построений отношением момента короткого замыкания при совместной работе и суммарной нагрузкой. Так как моменты пропорциональны магнитным потокам [34], то

$$M_1 = (M_{01} + M_{02}) \frac{\Phi_1}{\Phi_1 + \Phi_2}. \quad (2.43)$$

Момент противонатяжения M_Q зависит от углов наклона соответствующих механических характеристик и увеличивает скорость ведомого двигателя до общей, т.е. жесткая синхронизация скоростей обеспечивается моментом противонатяжения M_Q .

При изменении подводимого напряжения произойдет параллельное смещение характеристик. Очевидно, что момент противонатяжения при этом сохранит свое значение. Подробно влияние приращений напряжений рассмотрено в [34]. При изменении момента нагрузки соответственно меняется и момент противонатяжения, поддерживая соотношение скоростей. Таким образом, противонатяжение не только стабилизирует технологический процесс, но и действует в роли синхронизирующего. Это накладывает определенные ограничения на весь привод.



1 и 2 – характеристики отдельных приводов при совместной работе;
3 – характеристика всего привода

Рисунок 2.5 – Механические характеристики двухдвигательного электропривода

Решение системы уравнений относительно противонапряжения j -го блока аналогично выражению (2.42)

$$M_{Qj} = M_{0j}^{\vartheta} - M_j^{\vartheta} \quad (2.44)$$

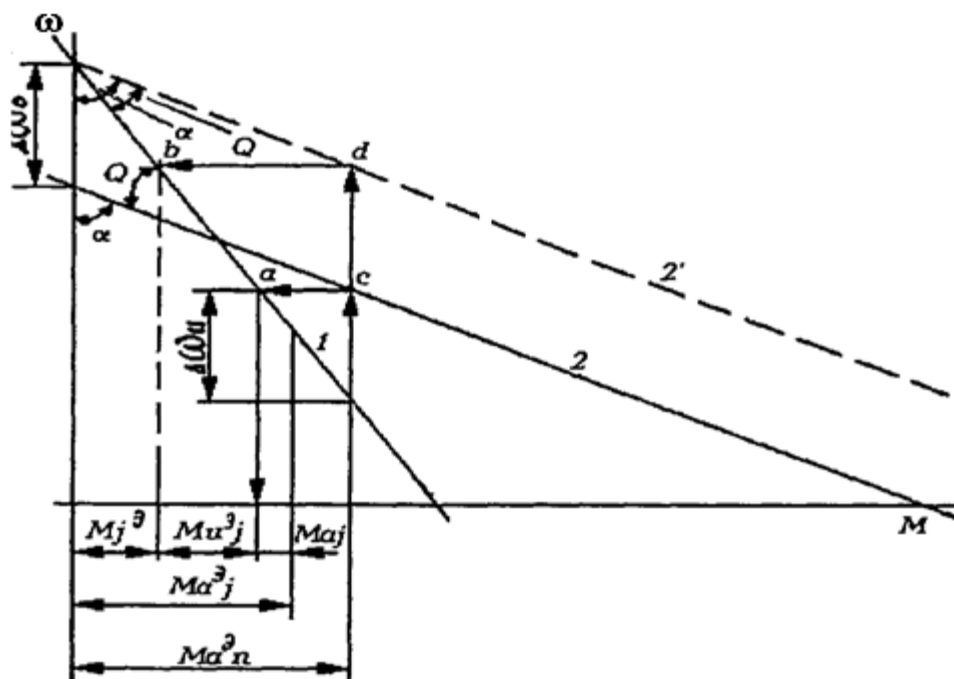
где M_{0j}^{ϑ} - эквивалентный нагрузочный момент j -го блока;

M_j^{ϑ} - эквивалентный электромагнитный момент, определяемый углом между механическими характеристиками j - блоков и n -блоков,

$$M_j^{\vartheta} = M_{on}^{\vartheta} K_{mj}^{\vartheta} / K_{mn}^{\vartheta} \quad (2.45)$$

На рисунке 2.6 показаны механические характеристики по выражению (2.34) для схем 2.4, б и в: 1 - механическая характеристика j -блоков, 2 - механическая характеристика n -блоков. Точка С на характеристике 2 определяется эквивалентным моментом волочения n -блоков и дает значение скорости всего стана. M_{0j}^{ϑ} - эквивалентный момент волочения j -блоков. Электромагнитный момент, развиваемый эквивалентным двигателем j -блоков, определяется отрезком по оси абсцисс от точки d до оси ординат. Момент

противонапряжения M_{Qj} представляет разницу между эквивалентным моментом волочения M_{Qj}^{ϑ} для j -блоков и действительным электромагнитным моментом эквивалентного двигателя, имеющим две составляющие: M_j^{ϑ} и M_{nj}^{ϑ} , где M_j^{ϑ} - эквивалентный момент, определяемый углом между механическими характеристиками блоков n и j -блоков, аналогичный электромагнитному моменту при последовательном соединении якорей; M_{nj}^{ϑ} - эквивалентный электромагнитный момент, определяемый разностью угловых скоростей идеального холостого хода n и j -блоков. Момент M_{nj}^{ϑ} изменяется пропорционально приложенному к якорю напряжению.



- 1 – механическая характеристика i блоков;
- 2 – механическая характеристика n -блоков.

Рисунок 2.6 – Механические характеристики двухдвигательного электропривода

В соответствии с построениями рисунка 2.6

$$M_{Qj}^{\vartheta} = M_{0j}^{\vartheta} - M_j^{\vartheta} - M_{nj}^{\vartheta}. \quad (2.46)$$

Это равенство получится при решении уравнений (2.32) и (2.33)

$$M_j^{\vartheta} = M_{0n}^{\vartheta} \frac{K_{Ej}^{\vartheta} K_{Mj}^{\vartheta}}{K_{En}^{\vartheta} K_{Mn}^{\vartheta}}; \quad (2.47)$$

$$M_{nj}^{\vartheta} = \frac{K_{En}^{\vartheta} K_{Mn}^{\vartheta}}{R_{\vartheta}} \left(\frac{U}{K_{Ej}^{\vartheta}} - \frac{U}{K_{En}^{\vartheta}} \right). \quad (2.48)$$

При неизменных углах α и θ составляющая момента M_j^{ϑ} постоянна. Если напряжение на якоре U не изменяется, то и составляющая M_{nj}^{ϑ} постоянна. Отсюда следует, что приращение момента противонапряжения ΔM_Q равно приращению момента волочения $\Delta M_0 - \Delta M_j$. Этот вывод соответствует полученному в [35]. Таким образом, реакция системы на изменение момента волочения аналогична для рассмотренных схем.

2.4 Критерии оптимального управления и регулирования прямоточными волочильными станами

Правильный выбор критериев оптимального управления и регулирования процессом волочения необходим для разработки системы автоматического управления и регулирования. В данном разделе выбор основан на определении технических характеристик стана в зависимости от показателей экономической эффективности: производительности и эксплуатационных расходов.

Производительность стана в значительной степени определяется обрывностью обрабатываемого материала.

Рассмотрим зависимость обрывности от сил, действующих на проволоку, при волочении на прямоточном волочильном стане (рисунок 2.7).

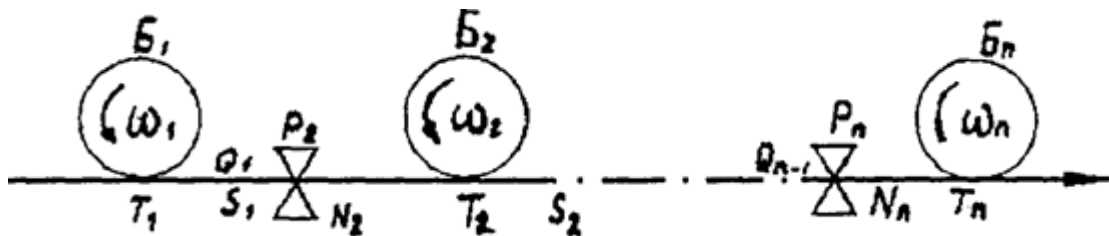


Рисунок 2.7 – Кинематическая схема волочения

Равновесие этих сил в установившемся процессе описывается системой:

$$\left. \begin{aligned} N_i &= P_i + Q_{i-1} \\ N_i &= T_i + Q_i \end{aligned} \right\} \quad (2.49)$$

где N_i - сила волочения после волоки i ($i = T, \dots, n$),

P_i - давление на нее;

Q_i - противонапряжение перед волокой $(i + T)$;

n - число переходов;

$T_i = M_i/R_i$ - тяговая сила барабана i с радиусом R_i ;
 M_i - момент тяговой силы.

При анализе первого уравнения системы (2.49) допустим, что противонатяжение отсутствует ($Q_{i-1} = 0$). Тогда сила волочения становится равной давлению на волоку i , и вероятность обрыва после нее будет наибольшей, так как сечение проволоки здесь меньше, чем до волоки i , а натяжение соответственно больше. Если допустить, что $P_i = 0$, тогда уравниваются сила волочения и противонатяжение, и вероятность обрыва также большая после волоки i . Во всех остальных случаях сила волочения N_i равна сумме составляющих ее сил и приложена в зоне наибольшей вероятности возникновения обрыва проволоки. Следовательно, для того чтобы волочение с противонатяжением протекало с минимальной обрывностью, необходимо стремиться к наименьшим значениям силы волочения.

Критерием безобрывного многократного волочения может служить минимум суммы сил волочения заданного маршрута:

$$I_1 = \sum_{i=1}^n N_i = \min, \quad (2.50)$$

достижение которого возможно путем минимизации всех слагаемых. $\sum_{i=1}^n N_i$

Как ранее установлено и видно из графиков на рисунке 2.8, рисунке 2.9, рисунке 2.10, при волочении проволоки из стали 08кп на стане ВС-6-7/550 противонатяжение Q_{i-1} может меняться до величины 30% силы волочения N_i , при этом не повышается уровень самой силы N_i . Критерий I_1 можно считать критерием оптимального управления по производительности стана.

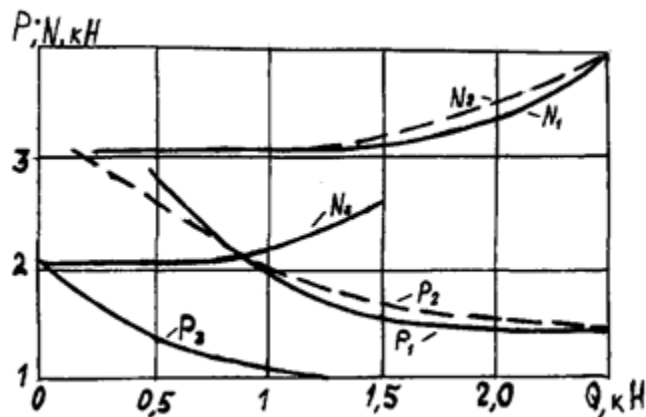


Рисунок 2.8 – Зависимость силы волочения от противонатяжения при волочении проволоки из стали 08 кп на стане ВС-6-7/550 на проходах 1, 2 и 3

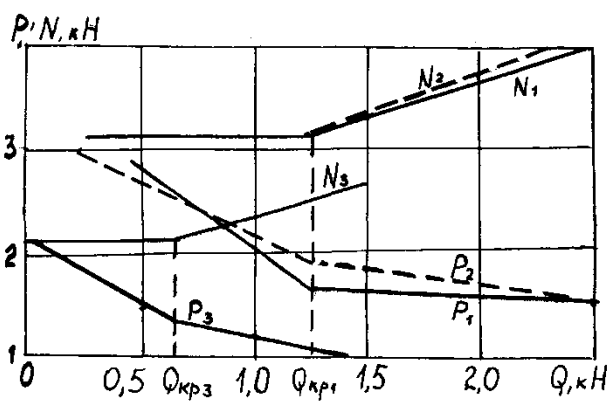


Рисунок 2.9 – Зависимость силы волочения, давления на волоку и тягового усилия от противонатяжения

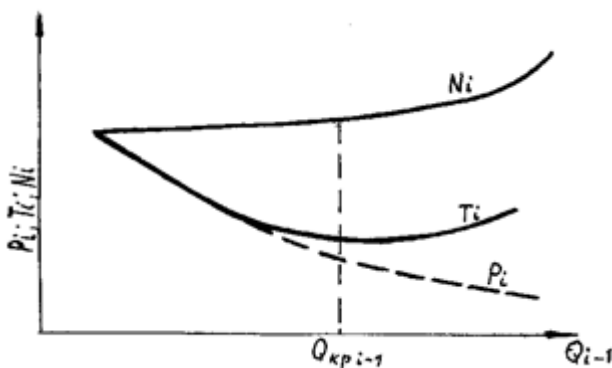


Рисунок 2.10 – Зависимость силы волочения и давления на волоку в аппроксимированном виде

Рассмотрим процесс волочения с противонатяжением относительно тяговой силы барабана. Из системы (2.49) T_i определяется выражением:

$$T_i = P_i + Q_{i-1} - Q_i,$$

или в общем виде:

$$\sum_{i=1}^n T_i = \sum_{i=1}^n P_i + Q_0 - Q_n. \quad (2.51)$$

Допустим, что проволока наматывается в бунт на последний барабан и входное противонатяжение отсутствует, т.е. $Q_0 = Q_n = 0$. Тогда уравнение (2.51) примет вид:

$$\sum_{i=1}^n T_i = \sum_{i=1}^n P_i, \quad (2.52)$$

т.е. сумма тяговых усилий равна сумме давлений на волокнах. Это возможно, когда каждое из слагаемых суммы левой части уравнения (2.52) равно соответствующему слагаемому суммы правой части:

$$T_i = P_i. \quad (2.53)$$

Умножим левую и правую части уравнения (2.53) на соответствующее значение скорости волочения v_i и определим суммарную мощность $F_{\delta i}$, необходимую для волочения проволоки заданного маршрута:

$$\sum_{i=1}^n F_{\delta i} = \sum_{i=1}^n P_i v_i, \quad (2.54)$$

По формуле (2.50) суммарная мощность может быть также определена:

$$\sum_{i=1}^n F_{\delta i} = \sum_{i=1}^n P_i^o v_i - \sum_{i=1}^n Q_i v_i \left(\frac{1}{\mu_i} + \frac{P_i^o}{P_{pi}} - 1 \right), \quad (2.55)$$

где P_i^o – давление на волоку i без противонатяжения;

P_{pi} – усилие разрыва проволоки;

μ_i – коэффициент вытяжки.

Решение уравнения (2.54) и (2.55) дает:

$$\sum_{i=1}^n P_i v_i = \sum_{i=1}^n P_i^o v_i - \sum_{i=1}^n Q_i v_i \left(\frac{1}{\mu_i} + \frac{P_i^o}{P_{pi}} - 1 \right). \quad (2.56)$$

Из этого уравнения видно, что чем больше противонатяжение, тем меньше текущее значение давления наволоку, тем меньше расход электроэнергии. Кроме того, уменьшение давления наволоку, как известно, способствует увеличению срока службы волочильного инструмента. Следовательно, критерием оптимального управления по эксплуатационным расходам можно считать достижение минимума суммы давлений на волокна:

$$I_2 = \sum_{i=1}^n P_i = \min, \quad (2.57)$$

что возможно при минимальном значении каждого слагаемого из этой суммы:

$$P_i = \min. \quad (2.58)$$

Задача оптимизации управления прямоточным волочильным станом сводится к выбору такого критерия, при котором обеспечивается безобрывное волочение с наименьшими эксплуатационными расходами. Таким критерием может служить сумма критериев I_1 и I_2 достижение минимума которой - необходимое условие выбора силовых параметров волочения при разработке и синтезе системы управления.

В каждом случае следует решить, что наиболее важно для волочильного производства: увеличение производительности стана, сопровождающееся ростом эксплуатационных затрат, или уменьшением эксплуатационных затрат, связанных со снижением производительности стана. Это определяется из условия наибольшего значения экономической эффективности системы, выраженной в рублях. Поэтому, весовые коэффициенты при критериях I_1 и I_2 в каждом случае рассматриваются отдельно.

Если выбрать критерии I_1 и I_2 с равными весовыми коэффициентами, тогда суммарный критерий составит:

$$I_y = I_1 + I_2 = \sum_{i=1}^n N_i + \sum_{i=1}^n P_i. \quad (2.59)$$

Суммарное значение критерия I_y может достигать минимума, когда каждая сумма слагаемых будет минимальна;

$$I_{yi} = N_i + P_i = \min. \quad (2.60)$$

Для определения минимума критерия I_{yi} , воспользуемся элементами математического анализа исследования функции на экстремум с помощью производных. Найдем значения противонапряжения, при котором производная критерия $I_{yi}(Q_{i-1})$ обращается в ноль:

$$I'_i(Q_{i-1}) = [N_i(Q_{i-1}) + P_i(Q_{i-1})]' = N'_i(Q_{i-1}) + P'_i(Q_{i-1}) = 0 \quad (2.61)$$

Из системы (2.49) с учетом преобразований (2.51), где

$$\begin{cases} Q_i = \sum_{j=1}^i P_j - \sum_{j=1}^i T_j + Q_0; \\ N_i = \sum_{j=1}^i P_j - \sum_{j=1}^{i-1} T_j + Q_0; \end{cases} \quad (2.62)$$

и условия $Q_0 = Q_n = 0$, определим Q_{i-1} и N_i в установившемся режиме:

$$\begin{cases} Q_{i-1} = \sum_{j=1}^{i-1} P_j - \sum_{j=1}^{i-1} T_j; \\ N_i = \sum_{j=1}^i P_j - \sum_{j=1}^{i-1} T_j. \end{cases} \quad (2.63)$$

В приращениях эта система будет иметь вид:

$$\begin{cases} \Delta Q_{i-1} = \sum_{j=1}^{i-1} \Delta P_j - \sum_{j=1}^{i-1} \Delta T_j; \\ \Delta N_i = \sum_{j=1}^i \Delta P_j - \sum_{j=1}^{i-1} \Delta T_j. \end{cases} \quad (2.64)$$

Из последнего уравнения и уравнения (2.60) определим $I'_{yi}(Q_{i-1}) = 0 = d\Delta I_{yi} / d\Delta Q_{i-1}$ и продифференцируем по ΔQ_{i-1} .

$$2 \frac{d\Delta P_i}{d(\sum_{j=1}^{i-1} \Delta P_j - \sum_{j=1}^{i-1} \Delta T_j)} + 1 = 0; \quad (2.65)$$

$$\sum_{j=1}^{i-1} \Delta T_j = 2\Delta P_i + \sum_{j=1}^{i-1} \Delta P_j.$$

Выразим $\sum_{j=0}^{i-1} \Delta T_j$ через $\sum_{j=1}^{i-1} \Delta T_j = \Delta T_{i-1} + \sum_{j=1}^{i-2} \Delta T_j$.

Величину $\sum_{j=1}^{i-2} \Delta T_j$ определим из уравнения (2.65)

$$\sum_{j=1}^{i-2} \Delta T_j = 2\Delta P_{i-1} + \sum_{j=1}^{i-2} \Delta P_j. \quad (2.66)$$

Решив совместно последние три уравнения, получим:

$$\Delta T_{i-1} = 2\Delta P_i - \Delta P_{i-1} \quad (2.67)$$

Это уравнение показывает, в какой зависимости от изменения смежных силовых параметров волочения находится изменение тягового усилия каждого барабана при достижении критерием (2.60) минимума.

Определим, в какой части характеристик, представленных на рисунке 2.8 будет минимизироваться критерий I_y . Для этого аппроксимируем характеристики (рисунок. 2.9), как это показано в работе и решим математически:

1. При $Q_i < Q_{кр}$; $N_i = P_i^\circ$ и $P_i = P_i^\circ - Q_{i-1}$ система (2.49) примет вид:

$$\begin{cases} N_i = P_i^\circ; \\ T_i = P_i^\circ - P_{i+1}^\circ + P_{i+1}; \end{cases} \quad (2.68)$$

или, в приращениях:

$$\Delta T_i = \Delta P_{i+1}. \quad (2.69)$$

2. При $Q_i > Q_{кр}$ выражение для силы волочения примет вид

$$N_i = P_i^\circ + \beta_i Q_{i-1}, \quad (2.70)$$

где β_i – коэффициент пропорциональности.

С учетом этого, система (2.49) приобретет вид:

$$\begin{cases} P_i^\circ + \beta_i Q_{i-1} = P_i + Q_{i-1}; \\ P_i^\circ + \beta_i Q_{i-1} = T_i + Q_i \end{cases} \quad (2.71)$$

$$T_i = \frac{P_{i+1}}{1 - \beta_{i+1}} - \frac{\beta_i P_i}{1 - \beta_i} + \frac{P_i^\circ}{1 - \beta_i} - \frac{P_{i+1}^\circ}{1 - \beta_{i+1}};$$

или в приращениях:

$$\Delta T_i = \frac{\Delta P_{i+1}}{1 + \beta_{i+1}} - \frac{\beta_i}{1 - \beta_i} \Delta P_i. \quad (2.72)$$

Отсюда видно, что характер изменения уравнения (2.72) соответствует характеру изменения тяговых усилий (2.67), при которых I_y достигает минимума. Следовательно, противонапряжения, при которых критерий достигает минимума, лежат правее критических значений.

Определим, при каких значениях коэффициентов β_i критерий I_y достигает минимума, если весовые коэффициенты при N_i и P_i равны. Для

этого приравняем коэффициенты в системе (2.72) к коэффициентам в системе (2.67).

$$\frac{1}{1-\beta_{i+1}} = 2; \quad \frac{\beta}{1-\beta_{i+1}} = 1; \quad \beta_{i+1} = 0,5; \quad \beta_i = 0,5. \quad (2.73)$$

Следовательно, точка характеристики $N_i (Q_{i-1})$, в которой тангенс угла наклона касательной равен 0,5 является оптимальной точкой выбора силовых параметров волочения в соответствии с критерием I_y .

Решим совместно системы (2.68) и (2.71). Получим тяговые усилия, при которых противонапряжения принимают критические значения:

$$T_i = P_i \frac{\beta_i(1-\beta_{i+1})}{\beta_{i+1}(1-\beta_i)} - P_i^o \frac{\beta_i - \beta_{i+1}}{\beta_{i+1}(1-\beta_i)}. \quad (2.74)$$

или в приращениях:

$$\Delta T_i = \frac{\beta_i(1-\beta_{i+1})}{\beta_{i+1}(1-\beta_i)} \cdot \Delta P_i. \quad (2.75)$$

Из уравнения (2.75) видно, что для критических значений противонапряжения изменение тяговых усилий пропорционально приращениям давлений в соответствующей волоке.

Анализ взаимовлияния силовых параметров волочения из системы (2.68), (2.71) и (2.74) показывает, что при увеличении противонапряжений от нуля до критических значений тяговые усилия уменьшаются от величины силы давления наволоку без противонапряжения до минимального значения, а при дальнейшем усилении влияния противонапряжения они увеличиваются (рис.2.10). В рабочем режиме, на рабочих скоростях силы волочения меняются пропорционально изменениям противонапряжений с коэффициентом передачи (например, $\beta_i = 0,5$), определенным в зависимости от выбранного критерия оптимальности. Причем, коэффициент передачи с увеличением противонапряжения растет. При изменении предела упругости проволоки после предварительной деформации, меняется критическое значение противонапряжений, а, следовательно, меняются оптимальные значения силовых параметров волочения и требуется новая установка тяговых усилий.

Допустим, тяговые усилия T_i установлены в соответствии с выбранным критерием и I_y (см. формулу 2.60). Рассмотрим, как меняются силовые параметры волочения при нарушении главного условия стабильной бесперебойной работы прямоточного волочильного стана - равенства секундных объемов [16].

$$v_1 S_1 = \dots = v_{i-1} S_{i-1} = v_i S_i = v_{i+1} S_{i+1} = \dots = v_n S_n = \text{const.}$$

При увеличении, сечения S_i проволоки на выходе волокна i , возрастает сила противонапряжения Q_{i-1} на величину

$$\Delta Q_{i-1} = \frac{E_{i-1} S_{i-1}}{l_{i-1}} \int_0^{T_k} \Delta v dt, \quad (2.76)$$

где E_{i-1} —модуль упругости;

l_{i-1} — длина проволоки между барабаном и волоком;

T_k — время существования рассогласования скоростей, так как

$$\Delta v = v_i - \frac{S_{i-1}}{S_i} v_{i-1}, \quad (2.77)$$

где v_{i-1} , v_i — линейная скорость движения проволоки до и после волокна i ;

S_{i-1} , S_i —сечение проволоки соответственно до и после волокна i .

Увеличение противонапряжения Q_{i-1} , несмотря на снижение давления P_i наволоку, приведет к соответствующему увеличению силы волочения N_i . Для восстановления равновесия сил на новом уровне соответственно должно измениться тяговое усилие на данном переходе, однако при этом нарушится равенство секундных объемов. Для сохранения равенства необходимо чтобы линейная скорость волочения изменилась обратно пропорционально изменению сечения, т.е. $v_i = v_{i-1} (S_{i-1} / S_i)$. Это приведет к восстановлению значения противонапряжения. Следовательно, критерием оптимального регулирования системы при нарушении равенства секундных объемов, является достижение минимума отклонения противонапряжения от установившегося значения. Для удобства при математическом моделировании это может быть квадратичный критерий качества, в котором минимизируется квадрат отклонения противонапряжения от заданных или желаемых значений:

$$I_p = \int_0^{\infty} \sum_{i=1}^n [q_i (Q_i - Q_i^{\circ})^2] dt, \quad (2.78)$$

где q_i — коэффициент пропорциональности.

Непосредственное измерение противонапряжения в объекте трудновыполнимо. Поэтому, если тяговое усилие меняется пропорционально изменению противонапряжения, то его можно считать переменной величиной, контролирующей силы противонапряжения. Поддержание постоянства тягового усилия - косвенный критерий оптимального регулирования, при котором обеспечивается минимум отклонения противонапряжения.

Следовательно, можно сделать следующие выводы:

- критерий оптимального управления является достижением минимума тяговых усилий для данного маршрута;
- критерий оптимального регулирования - достижение минимума отклонения противонапряжения от установленных значений;
- косвенный критерий оптимального регулирования - поддержание постоянства выбранных значений тяговых усилий.

2.5 Оценка точности и надежности систем с полной и неполной информацией

Технологические возмущающие воздействия являются одними из основных, определяющих производительность волочильных станов. Рассмотрим их взаимосвязь с параметрами стана и влияние на работу многократного прямоточного волочильного стана без скольжения.

Как уже говорилось выше многократный прямоточный волочильный стан состоит из волочильных блоков, соединенных между собой и оснащенных электроприводом. Прием готовой проволоки осуществляется намоточным аппаратом. Связь между блоками стана, намоточным аппаратом и размоточным устройством осуществляется через проволоку (рисунок 2.11.).

На проволоку после волоки действуют следующие силы (рисунок 2.12): противонапряжение Q_{i-1} и давление на волоку P_i в одну сторону и в другую - тяговое усилие T_i , и противонапряжение Q_i . Следовательно можно записать

$$Q_{i-1} + P_i = T_i + Q_i \quad (2.79)$$

Наиболее общее выражение, описывающее статический режим прямоточного стана, имеет вид

$$T_i = P_i - Q_i + Q_{i-1} \quad (2.80)$$

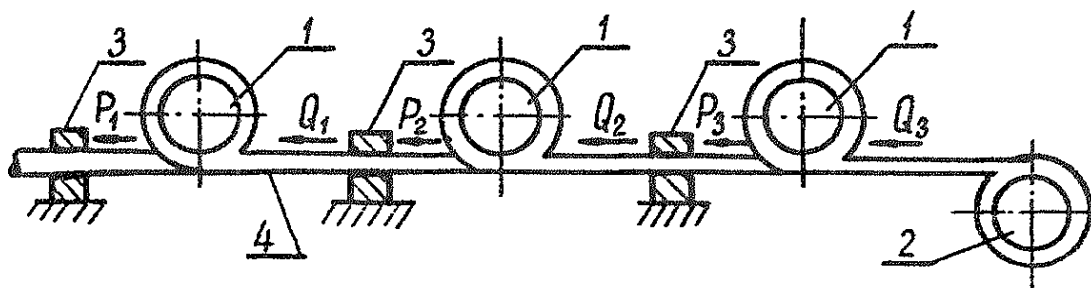


Рисунок 2.11 – Связь между блоками стана и намоточным аппаратом

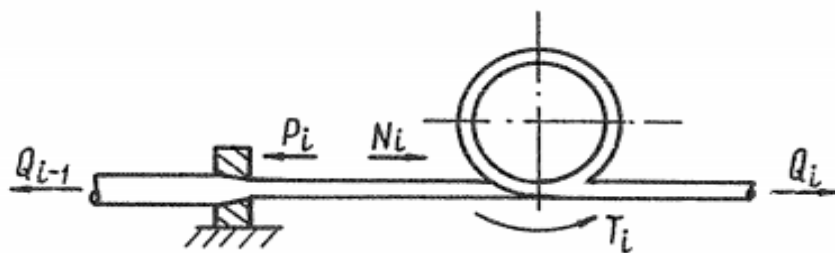


Рисунок 2.12 – Силы действующие на проволоку

В уравнениях (2.79) и (2.80) для первого блока Q_0 определяется натяжением проволоки между размоточным устройством и первой волокой, а для последнего блока Q_n – натяжением проволоки между чистовым блоком и приемной катушкой.

Величина T_i может быть найдена из выражения

$$T_i = \frac{C_M}{R} \alpha_i \Phi_i J_{Я} \quad (2.81)$$

где C_M – конструктивный коэффициент двигателя;
 $J_{Я}$ – общий ток якоря.

Подставляя значения тяговых усилий (2.81) в уравнение (2.80) получим систему уравнений, определяющую связь параметров процесса волочения с параметрами привода.

$$\frac{C_M}{R} \alpha_i \Phi_i J_{Я} = P_i - Q_i + Q_{i-1} \quad (2.82)$$

Сила волочения N_i в стане связана с давлением на волоку, противонапряжением и тяговым усилием соотношений [35].

$$\left. \begin{aligned} N_i &= P_i + Q_{i-1} \\ N_i &= T_i + Q_i \end{aligned} \right\} \quad (2.83)$$

Решая уравнение (2.82) и (2.83) можно найти значения $J_{Я}$, Q_i и N_i в установившемся режиме

$$J_{Я} = \frac{R \sum_{i=1}^n P_i + Q_0 - Q_n}{C_M \sum_{i=1}^n (\alpha_i \cdot \Phi_i)} \quad (2.84)$$

$$Q_i = \frac{\sum_{j=i+1}^n (\alpha_j \cdot \Phi_j)}{\sum_{j=1}^n (\alpha_j \cdot \Phi_j)} \left(\sum_{j=1}^i P_j + Q_0 \right) - \frac{\sum_{j=1}^i (\alpha_j \cdot \Phi_j)}{\sum_{j=1}^n (\alpha_j \cdot \Phi_j)} \left(\sum_{j=i+1}^n P_j - Q_n \right) \quad (2.85)$$

$$N_i = \frac{\sum_{j=1}^n (\alpha_j \cdot \Phi_j)}{\sum_{j=1}^n (\alpha_j \cdot \Phi_j)} \left(\sum_{j=1}^i P_j + Q_0 \right) - \frac{\sum_{j=1}^{i-1} (\alpha_j \cdot \Phi_j)}{\sum_{j=1}^n (\alpha_j \cdot \Phi_j)} \left(\sum_{j=i+1}^n P_j - Q_n \right) \quad (2.86)$$

Сила волочения N_i в стане, оснащенном обычной системой саморегулирования определяется выражением [36]:

$$N_i = P_i + Q_{i-1} = \sum_{j=1}^i P_j - \frac{c_M}{R} \cdot J_{Я} \cdot \sum_{j=1}^{i-1} (\alpha_j \cdot \Phi_j) + \sum_{j=1}^{i-1} \left(\frac{\alpha_j}{R} \cdot J_j \cdot \frac{d\omega_j}{dt} \right) \quad (2.87)$$

Величина P_i , и Q_i в системе могут меняться значительно [36] в переходных режимах возникает еще и дополнительное, приводящее к обрывам проволоки, изменение на величину $\frac{\alpha_i}{R} J_i d\omega_i / dt$ отрицательную при торможении и положительную при разгоне.

Система саморегулирования обладает низким качеством регулирования, а технологические параметр (сила волочения и противонатяжение) меняются пропорционально величине возмущения - давлению на волоку P_i , которое связано с регулируемой величиной (противонатяжением) по нелинейному закону (квадратичная парабола) [35,36], что может приводить к колебательному режиму и вызывает обрыв проволоки [3] (рисунок 2.13).

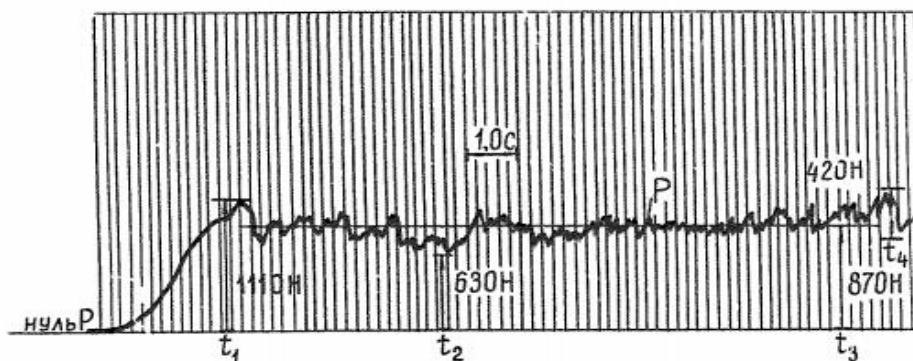


Рисунок 2.13 – Сила волочения с системой саморегулирования при наличии возмущающего воздействия на прямоточном стане

Система регулирования стана [36], предложенная взамен системы саморегулирования не учитывает в переходных процессах колебания силы волочения, вызванные динамической составляющей момента на валу барабана. Из уравнений [34,36], описывающих работу управляемого стана:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\alpha_i \cdot J_i \cdot \omega_i \cdot p}{R} &= \frac{\alpha_i \cdot c_M \cdot \Phi_i \cdot J_{\text{я}i} - P_i + Q_i - Q_{i-1}}{R} \\ pQ_i &= \xi_{i+1} \cdot \omega_{i+1} - \xi_i \cdot \omega_i \\ \Phi_i &= \Phi_{0i} + \frac{K_{\text{yi}}(1 + \lambda_i P)}{1 + T_{\text{Bi}} P} \cdot \Delta N_i \\ \Delta N_i &= \Delta Q_{i-1} + \Delta P_i \end{aligned} \right\} \quad (2.88)$$

где $\Delta \Phi_i$ – регулирующее воздействие потока возбуждения;
 p – оператор;
 λ_i – коэффициент форсировки;
 T_{Bi} – постоянная времени обмотки возбуждения;
 ξ_i – коэффициент;
 K_{yi} – коэффициент усиления величины ΔN_i ;

Сила волочения здесь определяется по формуле

$$N_i = \sum_{j=1}^i P_j - \sum_{j=1}^{i-1} T_j + \sum_{j=1}^{i-1} \frac{\alpha_j}{R} \cdot J_j \cdot \omega_j \cdot p + Q_0 \quad (2.89)$$

Подставляя в формулу (2.89) значения T_i и Φ_i можно найти силу волочения

$$N_i = N_{0i} - \sum_{j=1}^n b_{ij} P_j + \sum_{j=i+1}^n c_{ij} \cdot \omega_j \cdot p \quad (2.90)$$

где n – кратность стана;
 b_{ij}, c_{ij} – коэффициенты $[b_{ij} = f(\alpha_j, \Phi_j, k_j); c_{ij} = f(\alpha_j, \Phi_j, J_j, k_j)]$;
 K_j – коэффициент усиления контура системы управления.

Коэффициенты b_{ij}, c_{ij} пропорциональны $k_i^{-(i+j+2)}$ при $j \leq i$ и $k_i^{-(n-j+1)}$ при $j > i$.

Сравнение выражений (2.87) и (2.90) показывают, что величины отклонения силы волочения ΔN_i для стана системы регулирования не превышает

$$\Delta N \leq \frac{P_{i+1} + \frac{\alpha_i}{R} \cdot J_i \cdot \omega_i p}{K_i + 1} \quad (2.91)$$

во всех его режимах работы стана и чем больше коэффициент усиления контура системы, тем меньше статическая и динамическая погрешности. На стане с системой саморегулирования величина отклонения силы регулирования волочения составляет в установившемся режиме

$$\Delta N_i = \sum_{j=1}^i \Delta P_j - \sum_{j=1}^{i-1} \Delta T_j + \Delta Q_0 \quad (2.92)$$

И в динамических (переходных) режимах

$$\Delta N_i = \sum_{j=1}^i \Delta P_j - \sum_{j=1}^{i-1} \Delta T_j + \sum_{j=1}^{i-1} \frac{\alpha_j}{R} \cdot J_j \cdot \omega_j \cdot p + \Delta Q_0 \quad (2.93)$$

и имеет тот же порядок, что и величина изменения давления на волоку P_i , которая зависит от величины противонапряжения, допуска на заготовку, смазки, качества волок и т.д. Поэтому изменение давления наволоку на одном из блоков или на нескольких вызывает существенное отклонение величины силы волочения от допустимого значения, что в большинстве случаев приводит к обрыву проволоки. Значительно сократить число обрывов проволоки и время переходных процессов можно при оснащении волочильных станов и линий системой управления.

Для построения систем регулирования необходимы датчики величин $J_{яi}, \Phi_i, N_i$ и ω_i . Датчики тока и скорости выпускаются серийно. Для измерения величин N_i , требуются специальные датчики. В целях упрощения силу волочения целесообразно измерять косвенно.

Величина N_i связана с давлением, наволоку, противонапряжением и тяговым усилием соотношениями [35] (рисунок.2.12)

$$\left. \begin{aligned} N_i &= P_i + Q_{i-1} \\ N_i &= T_i + Q_i \\ Q_i &= \sum_{j=1}^i P_j - \sum_{j=1}^i T_j + Q_0 \\ T_i &= \frac{c_M}{R} \cdot \alpha_i \cdot \Phi_i \cdot J_{яi} - \frac{\alpha_i}{R} \cdot J_i \cdot \omega_i \cdot p \end{aligned} \right\} \quad (2.94)$$

Величина T_i , определяется моментом на валу двигателя и может быть найдена по току якоря $J_{яi}$ и потоку возбуждения. На петлевых станах противонатяжение можно измерить петлерегулятором, в который устанавливается, например серийно выпускаемый датчик давления типа 1778 ДСТ с вторичным блоком типа ПА-I (силоизмерительная установка УСТП-1). На прямоточных станах противонатяжение можно определять прибором, конструкция и схема которого доказана в [35]. В нем в качестве чувствительного элемента используется такой датчик типа 1778 ДСТ. Достаточно удобен для построения системы и датчик давления на волоку, встраиваемый в волокодержатель [35,36].

При использовании датчика давления сила волочения определяется из выражения

$$N_i = \sum_{j=1}^i P_j - \sum_{j=1}^{i-1} T_j + Q_0, \quad (2.95)$$

а при измерении противонатяжения - по второму уравнению системы (2.94).

Система регулирования, построенная по уравнениям (2.88), (2.94) и (2.95), представляет собой систему с полной информацией и обеспечивает необходимое качество регулирования (см. формулу (2.90)).

Однако на практике реализация такой системы регулирования связана с установкой n датчиков давления на волоку или противонатяжения, что, учитывая тяжелые условия работы датчиков (высокая температура, повышенный уровень вибрации, забивание смазкой зоны контакта волоки с датчиком), приводит к снижению надежности системы регулирования, увеличению времени обслуживания.

В связи с этим предпочтительнее следует отдать системам с неполной информацией, в которой текущие значения N_i заменяются постоянной величиной N_{0i} , а регулируемая величина должна быть стабилизирована и равна

$$T_{0i} = N_{0i} - Q_{0i} = B_i = const \quad (2.96)$$

Значения N_{0i} и Q_{0i} выбираются из условий прочности проволоки и режимов волочения.

В волочильном стане с системой регулирования с неполной информацией, построенной по уравнениям (2.88), (2.94) и (2.96), регулируемые величины принимают следующие значения

$$\begin{aligned}
Q_i &= \sum_{j=1}^i P_j - \sum_{j=1}^i B_j - \sum_{j=1}^i \frac{1}{K_j} \Delta T_j + Q_0 \\
N_i &= \sum_{j=1}^i P_j - \sum_{j=1}^{i-1} B_j - \sum_{j=1}^{i-1} \frac{1}{K_j} \cdot \Delta T_j + Q_0
\end{aligned}
\tag{2.97}$$

где $\Delta T_i = T_i - T_{0i}$ - отклонение тягового усилия от заданного,

$$T_i = \frac{M_i}{R} = \frac{\alpha_i \cdot M_{\text{дв}i}}{R}
\tag{2.98}$$

$M_{\text{дв}i}$ – момент на валу электродвигателя.

Как видно из уравнения (2.97) величины Q_i и N_i являются функциями установок B_i и возмущающих воздействий P_i и могут принимать различные значения в определенных пределах. Выбирая значения величин B_i так, чтобы усилия волочения не выходили из допускаемых пределов при изменении возмущающего воздействия P_i , можно обеспечить работу стана без обрывов.

В системе с неполной информацией отсутствуют нестандартные датчики силовых параметров волочения, что обеспечивает ее достаточно высокую надежность. При этом необходимо отметить, что современные средства вычислительной техники позволяют расширить область применения систем с косвенной оценкой силовых параметров, в которых необходимое соотношение скоростей поддерживается за счет обратной связи по скорости току или моменту с учетом взаимосвязи технологических и электромеханических параметров стана. Аналогичные системы разрабатываются в прокатном и бумагоделательном производстве.

Глава 3. Аналитическое конструирования регулятора и исследования автоматизированного электропривода стана на математической модели в системе MATLAB

Обзор информационных источников, результаты которого изложены в первой главе, показывает, что существующие системы автоматического регулирования силовыми параметрами волочения малоэффективны, поскольку обрывность проволоки все еще остается на высоком уровне как в статическом, так и в переходных режимах работы стана. В основном, данные системы неэффективны из-за отсутствия простых и надежных датчиков силовых параметров, способных работать в экстремальных условиях волочильного производства.

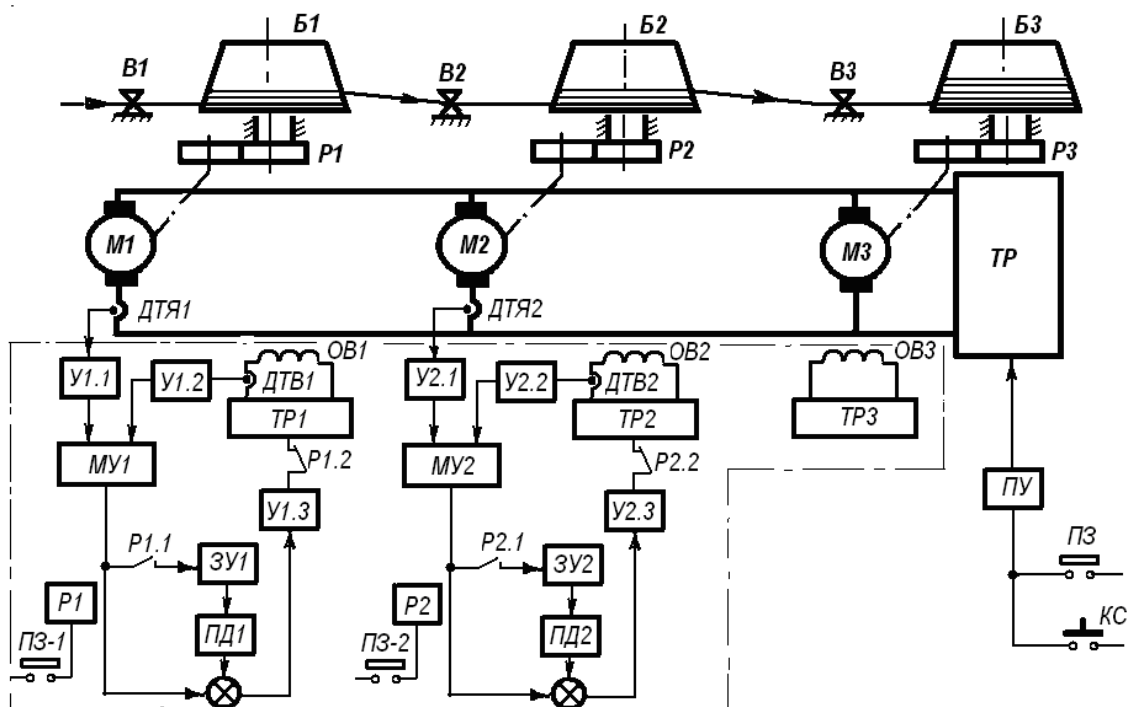


Рисунок 3.1 – Структурная схема электропривода с системой автоматической настройки и стабилизацией противонатяжений по цепи возбуждения

Наряду с этим сокращение числа трудоемких операций в производстве проволоки является важнейшим средством повышения производительности и улучшения условий труда. Наиболее сложная и трудоемкая операция при производстве проволоки на прямоточных станах многократного волочения – заправка ее на тянущие барабаны при смене маршрута и при обрывах проволоки. Однажды настроенный стан может запускаться с незначительной подрегулировкой, только при неизменном маршруте и при свойствах проволоки остающимися одинаковыми. Изменение маршрута волочения, свойств проволоки и износ волок приводят к изменению усилий волочения и величин противонатяжений проволоки, что вызывает необходимость новой регулировки крутящих моментов на рабочих барабанах. При этом существенное значение приобретают квалификация и интуиция волочильщика, необходимые для настройки противонатяжений проволоки между волочильными блоками с помощью ручных регуляторов потоков возбуждения приводных электродвигателей при большом числе оперативных переключений. Точность установки противонатяжений проволоки между волочильными барабанами в пределах 30-50% от величины давлений на волоки во многом определяет безобрывную работу стана в статическом и переходных режимах. Поэтому, по данным Магнитогорского метизно-металлургического завода, время подготовки волочильщика прямоточного стана составляет 3-5 месяцев, а магазинного фирмы Кратос 2-3 недели. Тем не менее, исследованиями, проведенными в промышленных условиях,

установлено, что величины противонапряжений, полученные во время заправки стана, могут достигать недопустимых значений и свидетельствуют о бесконтрольности процесса волочения на отдельных маршрутах. Потери времени связанные с заправкой и настройкой стана на заданный маршрут волочения, а так же на дополнительные заправки и настройку стана вследствие повышенной обрывности проволоки, существенно снижают коэффициент технического использования стана, который находится в пределах 0,44-0,5.

Исследование существующих систем автоматического регулирования также показывает, что в них не решена задача автоматической настройки противонапряжений проволоки между волочильными барабанами в режиме заправки стана и нахождения исходных уставок моментов приводных электродвигателей на заданных маршрутах волочения, что является одним из определяющих условий уменьшения обрывности.

Кроме того, на основе анализа особенностей технологического процесса и способов регулирования электроприводов прямоточных волочильных станов, рассмотренных в предыдущих главах, установлено, что одной из основных причин обрывности проволоки является изменение силовых параметров в процессе волочения вследствие износа волочильного инструмента.

Возмущения, возникающие из-за износа волок, являются медленно изменяющимися и постоянно действующими на электромеханическую систему стана, поскольку износ волок происходит в течение определенного времени.

Стабилизация давлений на волокнистые структуры путем прямого воздействия на очаг деформации, как, например, в прокатных станах с помощью нажимных винтов невозможна, так как волока является монолитной, а установка датчиков, контролирующих давления на волокнистые структуры в непосредственной близости от очага деформации, в зоне действия высоких температур и повышенного уровня вибрации, где наряду с этим происходит забивание смазкой контактной поверхности между волоком и датчиком, практически, на сегодняшний день, исключает данный способ контроля величины давления на волоку. К тому же, создание таких датчиков требует учета многих факторов и дополнительных капитальных вложений, что является нецелесообразным.

Проверка на соответствие получаемой проволоки необходимому диаметру, осуществляется волочильщиком или технологом по конечному диаметру за последней волокой и зачастую без замеров их промежуточных значений на заданных маршрутах волочения. При этом время между очередными замерами может оказаться значительно больше времени за которое произойдет износ волоки из-за чего изменение величин давлений на волокнистые структуры, вследствие их износа, остается бесконтрольным и влечет за собой изменение величины противонапряжений, а задиры проволоки и не соответствие необходимому диаметру приводят к увеличению брака.

Поэтому, контроль и коррекция величин давлений на волокни также необходимы для уменьшения обрывности проволоки.

Анализ режимов регулирования силовых параметров волочения в прямоточных станах с противонатяжением, представленный ранее, выполненный на основе схемы замещения действующих сил, дает возможность построения регуляторов без применения на информационном входе сигнала с датчиков прямого измерения параметров неэлектрических величин. При этом также показано, что оптимальное регулирование силовых параметров возможно с использованием мягкой стабилизации тяговых усилий развиваемых приводными электродвигателями и определяемых по соотношению.

В соответствии с вышеизложенным представляется возможность создания автоматизированных систем с косвенным контролем и регулированием силовых параметров на базе бесконтактных датчиков тяговых усилий. Решение данной задачи облегчается не строгостью требований технологии к отклонению силовых параметров от заданной величины (до 15-20%). Следовательно, точность равенства может быть ограничена в этих пределах. Таким образом, выражение может быть преобразовано к виду:

$$T \approx \frac{C_m \Phi I}{R_B} i; \quad (3.1)$$

где T – тяговое усилие волочильного блока, Н;
 C_m – постоянная электродвигателя;
 Φ – поток возбуждения электродвигателя, Вб;
 I – ток якоря электродвигателя, А;
 i – передаточное число редуктора;
 R_B – радиус барабана, м.

Момент холостого хода M_{xx} , при принятых в промышленном производстве маршрутах волочения не превышает 5%, а динамическая составляющая $j \frac{d\omega}{dt}$ при существующем режиме волочения мала, потому что время разгона и торможения составляет ничтожную долю в общем цикле, а в квазистационарном режиме отклонение скорости незначительно.

Принцип действия датчика тягового усилия основан на измерении величины, пропорциональной электромагнитному моменту по выражению. Для реализации этой задачи достаточно получить произведение якорного тока проводного электродвигателя на ток в его обмотке возбуждения. Поскольку из практики эксплуатации прямоточных станов известно, что работа стана происходит при заниженных потоках возбуждения на линейной части кривой намагничивания, то нет необходимости применять нелинейный преобразователь для технической реализации сигнала, пропорционального магнитному потоку.

В соответствии с вышеизложенным, в настоящей главе рассматривается система автоматической настройки и стабилизации противонатяжений с косвенным контролем тяговых усилий и давлений на волокни, без использования датчиков непосредственного измерения силовых параметров. Известен способ синхронизации скоростей при настройке многоклетевых станов непрерывной прокатки, исключаящий как натяжение, так и сжатие прокатываемого металла в промежутке между клетями. Этот способ заключается в определении и запоминании значения электромагнитного момента, развиваемого электродвигателем каждой клетки, которое затем сравнивают с текущим значением и корректируют скорость приводного электродвигателя последующей клетки до тех пор, пока разностный сигнал между текущим и хранящимся в блоке памяти значениями электромагнитных моментов не станет равным нулю.

В прямоточном волочильном стане для обеспечения нормального процесса волочения необходимо создание нормированного противонатяжения, т. е. натяжения проволоки между предыдущим по ходу волочения тянущим барабаном и последующей волокон, для устранения продольного проскальзывания проволоки по барабану, приводящего, как правило, к обрывам проволоки.

Наиболее близким к изобретению по технической сущности и достигаемому результату является способ настройки непрерывных станов, включающий определение и запоминание тяговых усилий каждой клетки и подачу некоторого напряжения в узел сравнения текущего и заданного значений электромагнитного момента от дополнительного источника питания. Это позволяет получить некоторое натяжение прокатываемого металла в промежутке между клетями.

Способ осуществляют устройством для настройки стана, содержащим регулятор момента, узел задания скорости, блоки измерения и запоминания момента электродвигателя, узел сравнения заданного с блока памяти и текущего значений электромагнитного момента предыдущего электропривода, выход которого подключен к его регулятору момента, и узел задания опорного напряжения, выход которого подключен к узлу сравнения моментов.

Однако при таком способе выбор величины натяжения осуществляется вручную оператором и устанавливается в соответствии с его опытом и интуицией. Величина противонатяжения в прямоточных волочильных станах регламентируется в пределах 5-30% от тягового усилия в зависимости от выбранного маршрута волочения и материала проволоки. Ошибки в выборе противонатяжения при ручной настройке сверх предела приводят к увеличению вероятности обрывов проволоки, а ниже предела - к петлеобразованию и последующему обрыву при затяжке проволоки на барабане, что в целом снижает производительность стана.

Кроме того, необходимо предусматривать дополнительно выключатель для останова предыдущего тянущего барабана при заправке последующего,

что необходимо для обязательной выборки образовавшейся петли. Таким образом, при этом способе увеличивается число оперативных переключений при заправке прямоточного волоочильного стана. Например, для шестикратного волоочильного стана число дополнительных оперативных переключений составляет не менее десяти и увеличивается, если в процессе заправки происходят обрывы проволоки.

Целью изобретения является автоматизация процесса настройки и сокращение числа оперативных переключений при заправке.

Это достигается тем что устанавливают значение тягового усилия каждого барабана, за исключением последнего, равным определенному процентному отношению от значения, полученного при заправке.

Устройство для осуществления способа настройки прямоточного стана, содержащее регулятор момента, узел задания скорости, блоки измерения и запоминания момента электродвигателя, узел сравнения заданного с блока памяти и текущего значений электромагнитного момента предыдущего электропривода, выход которого подключен к его регулятору момента, дополнительно содержит программное устройство заданного процентного отношения от значения момента, хранящегося в блоке памяти, каждого электродвигателя, вход которого подключен к выходам блоков памяти электромагнитного момента соответствующих электродвигателей, а выход подключен к узлу сравнения заданного и текущего значений электромагнитного момента.

На рисунке 3.2 приведена структурная схема устройства для осуществления способа для трехкратного прямоточного волоочильного стана с блочным соединением якорей.

Трехкратный прямоточный стан состоит из тянущих барабанов 1, приводимых электродвигателями 2, создающих тяговое усилие, необходимое для волочения проволоки через волокна 3. Вращающий момент от электродвигателей 2 на тянущие барабаны 1 передается через редуктор 4. Якори электродвигателей запитаны по индивидуальной схеме от управляемого источника 5 питания.

Устройство для осуществления способа настройки прямоточного стана содержит регулятор 6 момента, представляющий управляемый источник питания, обмотки 7 возбуждения, блок 8 измерения момента, представляющий множительное устройство, на вход которого подаются сигналы, пропорциональные току якоря и соответствующим токам возбуждения, блок 9 памяти, программное устройство 10, представляющее, например, набор последовательно соединенных резисторов, узел 11 сравнения заданного с программного устройства 10 и текущего значений момента с блока 8, узел 12 задания скорости. Выход узла 11 сравнения подключен к входу регулятора 6 момента. Вход программного устройства 10 заданного процентного отношения подключен к выходу блока 9 памяти, а выход - к входу узла 11 сравнения.

Установка заданного процентного отношения устанавливается переключателями 13-16 контакты конечных выключателей педалей заправочной скорости соответственно первого, второго и третьего барабанов. Устройство содержит нормально открытые контакты 17 и 18 реле-повторителей, нормально закрытые контакты 19 и 20 реле-повторителей оперативный ключ 21 разгона и торможения стана и нормально открытые контакты 22, 23 и 24 контакторов питания якорей электродвигателей.

Перед заправкой стана оператор по заданной технологом цеха программе для конкретного маршрута волочения программными переключателями 13 ввода уставок в программное устройство 10 первого, второго и так далее блоков независимо от их числа заведомо выставляет необходимый уровень противонапряжения проволоки на каждом блоке в процентном отношении от его тягового усилия без противонапряжения. Для заправки первого по ходу волочения барабана 1 конец проволоки после заострения пропускают через волоку 3 и захватывают клещами, закрепляемыми на барабане. При нажатии на педаль заправочной скорости первого блока в узел 12 задания скорости подается задающее напряжение, соответствующее заправочной скорости первого барабана. Одновременно, при нажатии педали заправочной скорости контакт 17 в цепи управления электроприводом первого блока замыкается, а контакт 19 размыкается. Контакт 22 контактора питания первого блока замыкается. С выхода узла 12 задания скорости линейно-нарастающее напряжение подается в обмотку управления источника 5 питания. Напряжение на якоре первого блока плавно нарастает. Контакт 19, размыкаясь, разрывает цепь отрицательной связи по моменту, что позволяет первому электродвигателю развить тяговый момент, необходимый для преодоления нагрузки. Первый барабан разгоняется до заправочной скорости. Величина нагрузки на первом блоке пропорциональна электромагнитному моменту приводного двигателя. Через замкнутый контакт 17 сигнал, пропорциональный электромагнитному моменту, с выхода блока 8 измерения момента подается в блок 9 памяти и хранится в нем до следующей заправки данного барабана. Оператор отпускает педаль заправочной скорости. Контакт 17 размыкается, а контакт 19 замыкается.

Из практики эксплуатации прямоточных станов известно, что работа стана происходит при пониженных потоках возбуждения линейной части кривой намагничивания электродвигателя. Поэтому нет необходимости применять нелинейный преобразователь для технической реализации сигнала, пропорционального магнитному потоку.

Для заправки второго барабана с первого барабана снимают верхние ветки, конец заостряют, проволоку пропускают через волоку 3 второго блока, захватывают клещами и закрепляют на барабане 1. Далее оператор нажимает педаль заправочной скорости второго блока, в узел 12 задания скорости подается задающее напряжение, соответствующее заправочной скорости второго барабана. При нажатии педали заправочной скорости второго блока в цепи управления электроприводом этого блока контакт 18 замыкается, а

контакт 20 размыкается. Контакты 22 и 23 контакторов питания первого и второго блоков замыкаются. С выхода узла 12 задания скорости линейно нарастающее напряжение подается в обмотку управления источника 5 питания. Напряжение на якорях электродвигателей первого и второго блоков начинает плавно нарастать. Второй электродвигатель развивает тяговый момент, необходимый для преодоления нагрузки, поскольку при нажатии педали заправочной скорости контактом 20 разрывается цепь его отрицательной обратной связи по электромагнитному моменту. Второй барабан разгоняется до заправочной скорости. По мере разгона барабана до заправочной скорости выбирается петля проволоки между первым и вторым барабанами. Поскольку натяжение проволоки между барабанами создается избытком электромагнитного момента последующего по ходу волочения электродвигателем, часть нагрузки первого электродвигателя принимает на себя второй электродвигатель, так как в цепи управления электроприводом первого блока сигнал с блока 8 измерения момента, пропорциональным электромагнитному моменту первого двигателя, сравнивается с сигналом, пропорциональным электромагнитному моменту, полученным ранее при заправке первого барабана 1, хранящимся в блоке 9 памяти и взятым в процентном отношении от осевого значения программным устройством 10, а сигнал разности, пропорциональный величине противонатяжения на первом блоке, с узла 11 сравнения через замкнутый контакт 19 подается в регулятор 6. Это не позволяет первому электродвигателю преодолеть собственный момент нагрузки, поскольку на первом блоке начинает действовать отрицательная обратная связь по его электромагнитному моменту с тех его значений, которые оператор ввел в программное устройство 10.

Первый барабан начинает вращаться при появлении натяжения проволоки между барабанами, которое соответствует выставленному оператором по программному устройству 10 первого блока. Значение нагрузки на втором блоке во время заправки второго барабана снимается с выхода блока измерения момента второго блока 8 и вводится в блок 9 памяти, где хранится до следующей заправки данного барабана. Оператор накапливает проволоку на втором барабане и отпускает педаль заправочной скорости. Контакт 18 в цепи управления электроприводом второго блока размыкается, а контакт 20 замыкается. Контакты 22 и 23 контакторов питания размыкаются. Стан останавливается. Аналогично проводится заправка всех последующих по ходу волочения барабанов стана, независимо от их числа.

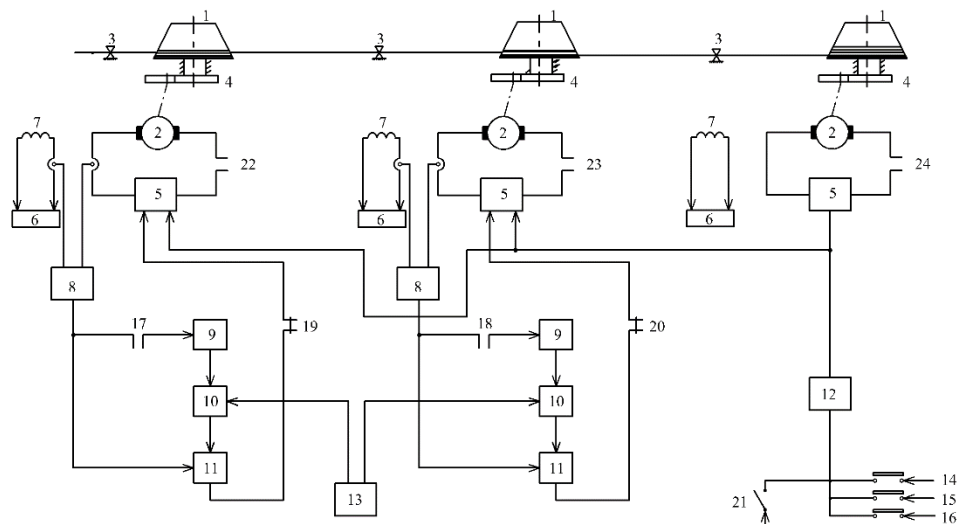


Рисунок 3.2 – Структурная схема электропривода с системой автоматической настройки и стабилизации противонатяжений

Таким образом, система управления обеспечивает ограничение тяговых усилий, а следовательно, и противонатяжений на каждом блоке на том уровне, который оператор ввел в программное устройство перед заправкой.

В режиме разгона и рабочем режиме система управления работает аналогично системам с ограничением момента.

Предлагаемый способ может быть использован на станах беспетлевого волочения с индивидуальным электроприводом постоянного тока с питанием от общего источника как при параллельном, так и последовательном соединении приводных электродвигателей, а также при питании от индивидуальных источников по блочной схеме. В случае питания электропривода от общего источника с последовательным соединением электродвигателей в контактах 22, 23 и 24 контакторов питания нет необходимости.

Известно, что время простоя прямоточных волочильных станов на ликвидацию обрывов достигает 15% от продолжительности смены. Предлагаемый способ и устройство позволяет снизить ориентировочно время простоя вдвое. Так, на прямоточном стане ВС – 3/4 – 550 при норме выработки 3 – 4 т проволоки за смену использование предлагаемого способа заправки и устройства дополнительно позволит выпустить до 300 кг готовой продукции за смену. Расчет данной экономической эффективности выполнен без учета сокращения времени на заправку стана.

3.1 Аналитическое конструирование регулятора многодвигательного электропривода прямоточного волочильного стана

Одним из основных режимов работы прямоточного волочильного стана является установившейся режим волочения проволоки, где стабилизация противонатяжений между блоками стана является необходимостью, согласно требованиям технологического процесса.

Стабилизация противонатяжений на стане осуществляется применением электрической схемы с последовательным соединением якорей двигателей постоянного тока (схема электрического дифференциала). Однако такая стабилизация противонатяжений не является оптимальной. В связи с этим стабилизацию противонатяжений, рассмотрим как задачу конструирования оптимального регулятора многодвигательного электропривода стана, на основе метода динамического программирования, который позволяет определить закон управления оптимального регулятора и обеспечить соответствующую стабилизацию противонатяжений.

Рассмотрим математическую модель 3-х кратного прямоточного стана (ВС $\frac{3}{4}$ – 550) построенную на основе математического описания технологического процесса волочения проволоки, динамики переходных процессов двигателя постоянного тока независимого возбуждения и динамических процессов проволоки между блоками стана [38].

Математическое описание динамики переходных процессов 3-х кратного прямоточного волочильного стана может быть представлено следующей системой дифференциальных уравнений:

уравнением движения

$$J_i \frac{d\omega_i}{dt} = k_{mi} I - \frac{R_B}{\eta_i \alpha_i} \left[P_{0i} \left(1 - \frac{Q_{i-1}}{\sigma_{B(i-1)} s_{i-1}} \right) + Q_{i-1} - Q_i \right], \quad (3.2)$$

уравнением э.д.с. в цепи якоря

$$3L \frac{dI}{dt} = k_p u - \sum_{i=1}^3 c_{ei} \omega_i - 3rI, \quad (3.3)$$

и уравнением поведения проволоки на участке растяжения между волочильным барабаном и волокой по ходу волочения

$$\frac{dQ_i}{dt} = \frac{ES_i R_B}{l} \left(\frac{\omega_{i+1}}{\alpha_{i+1} \mu_{i+1}} - \frac{\omega_i}{\alpha_i} \right) - \frac{R_B}{\alpha_i l} \omega_i Q_i \quad (3.4)$$

где ω – скорость вращения якоря;

I – ток якоря;

u – напряжение якоря;

r – сопротивление якорной цепи;
 k_m, k_p, c_e – коэффициенты пропорциональности;
 J – момент инерции двигателя;
 i – порядковый номер волочильного блока;
 μ – коэффициент вытяжки проволоки в волоке;
 R_B – радиус волочильного барабана;
 α – передаточное отношение редуктора;
 η – КПД передачи и двигателя;
 P_{0i} – сила воздействия металла на волоку при отсутствии противонатяжения;
 Q – противонатяжение перед i -ой волокой;
 S_i – площадь поперечного сечения проволоки на входе в i волоку;
 σ – средняя величина временного сопротивления материала проволоки по длине очага деформации;
 E – модуль упругости проволоки;
 l – длина проволоки на участке противонатяжения.

Система уравнений (3.2), (3.3) и (3.4) является нелинейной, из-за наличия произведения переменных $Q_i \omega_i$, поэтому данную систему уравнений, после несложных преобразований, линеаризируем согласно с допущением, что электромагнитная постоянная якорной цепи и постоянная времени уравнения натяжения малы по отношению электромеханической постоянной времени. Линеаризованная система уравнений (3.2), (3.3) и (3.4) будет иметь вид:

$$\begin{aligned}
 \frac{d\Delta\omega_1}{dt} &= \frac{k_{m1}k_p}{3j_1r_\alpha} \Delta u - \left(\frac{R_B(ES_1 + Q^0)}{j_1\alpha_1\omega_1^0} + \frac{k_{m1}c_{e1}}{3j_1r_\alpha} \right) \Delta\omega_1 + \left(\frac{ES_1R_B}{j_1\mu_2\omega_1^0\alpha_2} - \frac{k_{m1}c_{e2}}{3r_\alpha j_1} \right) \Delta\omega_2 - \frac{c_{e3}k_{m1}}{3r_\alpha j_1} \Delta\omega_3, \\
 \frac{d\Delta\omega_2}{dt} &= \frac{k_{m2}k_p}{3r_\alpha j_2} \Delta u + \left(\frac{R_B}{j_2\alpha_2} \left(1 - \frac{P_{02}}{\sigma_1 s_1} \right) \left(\frac{ES_1 + Q_1^0}{\omega_1^0} \right) - \frac{c_{e1}k_{m2}}{3r_\alpha j_3} \right) \Delta\omega_1 - \\
 &- \left(\frac{R_B}{j_2\alpha_2} \left(1 - \frac{P_{02}}{\sigma_1 s_1} \right) \frac{ES_1 j_1}{j_2\mu_2\omega_1^0} + \frac{R_B(ES_2 + Q_2^0)}{j_2\alpha_2\omega_2^0} \right) \Delta\omega_2 + \left(\frac{R_B ES_2}{j_2\mu_3\alpha_3\omega_2^0} - \frac{c_{e3}k_{m2}}{3r_\alpha j_2} \right) \Delta\omega_3 \quad (3.5) \\
 \frac{d\Delta\omega_3}{dt} &= \frac{k_{m3}k_p}{3j_3r_\alpha} \Delta u - \frac{k_{m3}c_{e1}}{3r_\alpha} \Delta\omega_1 + \left(\frac{R_B}{j_3\alpha_3} \left(1 - \frac{P_{03}}{\sigma_2 s_2} \right) \left(\frac{ES_2 + Q_2^0}{\omega_2^0} \right) - \right. \\
 &\left. - \frac{k_{m3}c_{e2}}{3j_3r_\alpha} \right) \Delta\omega_2 - \frac{R_B}{j_3\alpha_3} \left(1 - \frac{P_{03}}{\sigma_2 s_2} \right) \frac{j_2 ES_2}{j_3\mu_3\omega_2^0} \Delta\omega_3.
 \end{aligned}$$

С позиции удобства, применения метода динамического программирования, для определения закона управления оптимального регулятора, систему уравнений (3.5) можно представить в следующем виде:

$$\begin{aligned}
\frac{dx_1}{dt} &= a_1 u - a_2 x_1 + a_3 x_2 - a_4 x_3; \\
\frac{dx_2}{dt} &= a_5 u + a_6 x_1 - a_7 x_2 + a_8 x_3; \\
\frac{dx_3}{dt} &= a_9 u - a_{10} x_1 + a_{11} x_2 - a_{12} x_3,
\end{aligned} \tag{3.6}$$

здесь $x_i = \Delta \omega_i$, $u = \Delta u$, $a_1 = \frac{k_{m1} k_p}{3 j_1 r_\gamma}$, $a_2 = \left(\frac{R_B (ES_1 + Q^0)}{j_1 \alpha_1 \omega_1^0} + \frac{k_{m1} c_{e1}}{3 j_1 r_\gamma} \right)$,

$$a_3 = \left(\frac{ES_1 R_B}{j_1 \mu_2 \omega_1^0 \alpha_2} - \frac{k_{m1} c_{e2}}{3 r_\gamma j_1} \right), \quad a_4 = \frac{c_{e3} k_{m1}}{3 r_\gamma j_1}, \quad a_5 = \frac{k_{m2} k_p}{3 r_\gamma j_2},$$

$$a_6 = \left(\frac{R_B}{j_2 \alpha_2} \left(1 - \frac{P_{02}}{\sigma_1 s_1} \right) \left(\frac{ES_1 + Q^0}{\omega_1^0} \right) \right), \quad a_7 = \left(\frac{R_B}{j_2 \alpha_2} \left(1 - \frac{P_{02}}{\sigma_1 s_1} \right) \frac{ES_1 j_1}{j_2 \mu_2 \omega_1^0} + \frac{R_B (ES_2 + Q^0)}{j_2 \alpha_2 \omega_2^0} \right),$$

$$a_8 = \left(\frac{R_B ES_2}{j_2 \mu_3 \alpha_3 \omega_2^0} - \frac{c_{e3} k_{m2}}{3 r_\gamma j_2} \right), \quad a_9 = \frac{k_{m3} k_p}{3 j_3 r_\gamma}, \quad a_{10} = \frac{k_{m3} c_{e1}}{3 r_\gamma},$$

$$a_{11} = \left(\frac{R_B}{j_3 \alpha_3} \left(1 - \frac{P_{03}}{\sigma_2 s_2} \right) \left(\frac{ES_2 + Q^0}{\omega_2^0} \right) - \frac{k_{m3} c_{e2}}{3 j_3 r_\gamma} \right), \quad a_{12} = \frac{R_B}{j_3 \alpha_3} \left(1 - \frac{P_{03}}{\sigma_2 s_2} \right) \frac{j_2 ES_2}{j_3 \mu_3 \omega_2^0}.$$

Критерий оптимальности запишем в виде

$$J(u) = \int_0^\infty \left(\sum_1^3 x_i^2 + u^2 \right) dt. \tag{3.7}$$

Для определения закона управления $u = f(x_i)$ составим функциональные уравнения Белмана:

$$\begin{aligned}
&x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + u^2 + (a_1 u - a_2 x_1 + a_3 x_2 - a_4 x_3) \frac{\partial s}{\partial x_1} + \\
&+ (a_5 u + a_6 x_1 - a_7 x_2 + a_8 x_3) \frac{\partial s}{\partial x_2} + (a_9 u - a_{10} x_1 + a_{11} x_2 - a_{12} x_3) \frac{\partial s}{\partial x_3} = 0, \tag{3.8} \\
&2u + \left(a_1 \frac{\partial s}{\partial x_1} + a_5 \frac{\partial s}{\partial x_2} + a_9 \frac{\partial s}{\partial x_3} \right) = 0.
\end{aligned}$$

Из второго уравнения системы (3.8) определяем закон управления $u = f(x_1, x_2, x_3)$

$$u = -\frac{1}{2} \left(a_1 \frac{\partial s}{\partial x_1} + a_5 \frac{\partial s}{\partial x_2} + a_9 \frac{\partial s}{\partial x_3} \right). \tag{3.9}$$

Функцию S представим в виде

$$S = A_{11}x_1^2 + A_{12}x_1x_2 + A_{22}x_2^2 + A_{13}x_1x_3 + A_{33}x_3^2 + A_{23}x_2x_3. \quad (3.10)$$

Частные производные $(\partial S / \partial x_i)$ функции S можно записать следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{\partial S}{\partial x_1} &= 2A_{11}x_1 + A_{12}x_2 + A_{13}x_3; \\ \frac{\partial S}{\partial x_2} &= A_{12}x_1 + 2A_{22}x_2 + A_{23}x_3; \\ \frac{\partial S}{\partial x_3} &= A_{13}x_1 + A_{23}x_2 + 2A_{33}x_3. \end{aligned} \quad (3.11)$$

Подставляя уравнения (3.9) и (3.11) в первое уравнение (8), получим следующее уравнение

$$\begin{aligned} &\sum_1^3 x_i^2 - a_2x_1(2A_{11}x_1 + A_{12}x_2 + A_{13}x_3) + a_3x_2(2A_{11}x_1 + A_{12}x_2 + A_{13}x_3) - \\ &- a_4x_3(2A_{11}x_1 + A_{12}x_2 + A_{13}x_3) + a_6x_1(A_{12}x_1 + 2A_{22}x_2 + A_{23}x_3) - \\ &- a_7x_2(A_{12}x_1 + 2A_{22}x_2 + A_{23}x_3) + a_8x_3(A_{12}x_1 + 2A_{22}x_2 + A_{23}x_3) - \\ &- a_{10}x_1(A_{13}x_1 + A_{23}x_2 + 2A_{33}x_3) + a_{11}x_2(A_{13}x_1 + A_{23}x_2 + 2A_{33}x_3) - \\ &- a_{12}x_3(A_{13}x_1 + A_{23}x_2 + 2A_{33}x_3) - \\ &- (a_1a_5/2)(2A_{11}x_1 + A_{12}x_2 + A_{13}x_3)(A_{12}x_1 + 2A_{22}x_2 + A_{23}x_3) - \\ &- (a_1a_9/2)(2A_{11}x_1 + A_{12}x_2 + A_{13}x_3)(A_{13}x_1 + A_{23}x_2 + 2A_{33}x_3) - \\ &- (a_5a_9/2)(A_{12}x_1 + 2A_{22}x_2 + A_{23}x_3)(A_{13}x_1 + A_{23}x_2 + 2A_{33}x_3) = \\ &= (a_1^2/4)(2A_{11}x_1 + A_{12}x_2 + A_{13}x_3)^2 + (a_5^2/4)(A_{12}x_1 + 2A_{22}x_2 + A_{23}x_3)^2 + \\ &+ (a_9^2/4)(A_{13}x_1 + A_{23}x_2 + 2A_{33}x_3)^2. \end{aligned} \quad (3.12)$$

После несложных вычислений в уравнении (3.12) приравнявая нулю коэффициенты при x_1x_2, x_1x_3, x_2x_3 и коэффициенты при соответствующих степенях x_1, x_2, x_3 , получим систему алгебраических уравнений для определения коэффициентов $A_{11}, A_{12}, A_{13}, A_{22}, A_{23}$ и A_{33} .

Система алгебраических уравнений будет иметь вид:

$$\begin{aligned} &1 - 2a_2A_{11} + a_6A_{12} - a_{10}A_{13} - a_1a_5A_{11}A_{12} - a_1a_9A_{11}A_{13} - (a_5a_9/2)A_{12}A_{13} - \\ &- (a_1^2A_{11}^2 + (a_5^2/4)A_{12}^2 + (a_9^2/4)A_{13}^2) = 0, \\ &1 + a_3A_{12} - 2a_7A_{22} + a_{11}A_{22} - a_1a_5A_{12}A_{22} - (a_1a_9/2)A_{12}A_{23} - (a_5a_9)A_{22}A_{23} - \\ &- ((a_1^2/4)A_{12}^2 + a_5^2A_{22}^2 + (a_9^2/4)A_{23}^2) = 0, \\ &1 - a_4A_{13} + a_8A_{23} - 2a_{12}A_{33} - (a_1a_5/2)A_{13}A_{23} - a_1a_9A_{13}A_{33} - a_5a_9A_{23}A_{33} - \\ &- ((a_1^2/4)A_{13}^2 + (a_5^2/4)A_{23}^2 + a_9^2A_{33}^2) = 0, \\ &- a_2A_{12} + 2a_3A_{11} + 2a_6A_{22} - a_7A_{12} - a_{10}A_{23} + a_{11}A_{13} - (a_1a_5/2)(4A_{11}A_{22} + A_{12}^2) - \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& - (a_1 a_9 / 2)(2A_{11}A_{23} + A_{12}A_{13}) - (a_5 a_9 / 2)(A_{12}A_{23} + 2A_{13}A_{22}) - (3.13) \\
& - (a_1^2 A_{11}A_{12} + a_5^2 A_{12}A_{22} + (a_9^2 / 2)A_{13}A_{23}) = 0, \\
& - a_2 A_{13} - 2a_4 A_{11} + a_6 A_{23} + a_8 A_{12} - 2a_{10} A_{33} - a_{12} A_{13} - (a_1 a_5 / 2)(2A_{11}A_{23} + A_{12}A_{13}) - \\
& - (a_1 a_9 / 2)(4A_{11}A_{33} + A_{13}^2) - (a_5 a_9 / 2)(2A_{12}A_{33} + A_{13}A_{23}) - \\
& - (a_1^2 A_{11}A_{13} + (a_5^2 / 2)A_{12}A_{23} + a_9^2 A_{13}A_{33}) = 0, \\
& a_3 A_{13} - a_4 A_{12} - a_7 A_{23} + 2a_8 A_{22} + 2a_{11} A_{33} - a_{12} A_{23} - (a_1 a_5 / 2)(A_{12}A_{23} + 2A_{13}A_{22}) - \\
& - (a_1 a_9 / 2)(2A_{12}A_{33} + A_{13}A_{23}) - (a_5 a_9 / 2)(4A_{22}A_{33} + A_{23}^2) - \\
& - (a_1^2 A_{12}A_{13} + a_5^2 A_{22}A_{23} + a_9^2 A_{23}A_{33}) = 0.
\end{aligned}$$

Коэффициенты a_i рассчитываются на основе технологических параметров волочильного стана ВС $\frac{3}{4}$ -550 и параметров его многодвигательного электропривода.

Решение системы нелинейных алгебраических уравнений (3.13), для определения коэффициентов $A_{11}, A_{12}, A_{13}, A_{22}, A_{23}, A_{33}$, осуществляется на основании численного метода в среде Matlab. На рисунке 3.3 в М - Файле Matlab представлены нелинейные уравнения (3.13).

```

function f= fun9(x)
f(1)=162.715*x(1)^2+45.02*x(2)^2+57.15*x(3)^2+101.455*x(2)*x(3)+192.87*x(1)*x(3)+
171.185*x(1)*x(2)+0.345*x(3)-176.2*x(2)+450.68*x(1)-1;
f(2)=40.678*x(2)^2+180.09*x(4)^2+57.15*x(5)^2+202.91*x(4)*x(5)+96.43*x(2)*x(5)+
171.18*x(2)*x(4)-162.37*x(5)+771.3*x(4)-219.66*x(2)-1;
f(3)=40.678*x(3)^2+40.02*x(5)^2+228.61*x(6)^2+202.9*x(5)*x(6)+196.7*x(3)*x(6)+
85*x(3)*x(5)+323.3*x(6)-210.46*x(5)+0.355*x(3)-1;
f(4)=505.11*x(1)*x(2)+180.1*x(2)*x(4)+114.3*x(3)*x(5)+101.45*x(2)*x(5)+
202.9*x(3)*x(4)+192.86*x(1)*x(5)+96.43*x(2)*x(3)+342.37*x(1)*x(4)+
+85.6*x(2)^2-162.37*x(3)+0.345*x(5)-352.4*x(4)-439.32*x(1)+611*x(2);
f(5)=162.7*x(1)*x(3)+90.05*x(2)*x(5)+228.6*x(3)*x(6)+202.9*x(2)*x(6)+
101.45*x(3)*x(5)+96.43*x(3)^2+385.72*x(1)*x(6)+85.6*x(2)*x(3)+171.2*x(1)*x(5)+
386.99*x(3)+0.69*x(6)-210.66*x(2)-176.2*x(5)+0.71*x(1);
f(6)=81.36*x(2)*x(3)+180.1*x(4)*x(5)+228.6*x(5)*x(6)+101.45*x(5)^2+405.8*x(4)*x(6)+
96.43*x(3)*x(5)+192.86*x(2)*x(6)+85.6*x(2)*x(5)+171.2*x(3)*x(4)+547.3*x(5)-
324.74*x(6)-420.92*x(4)+0.355*x(2)-219.66*x(3);
end;

```

Рисунок 3.3 – Нелинейные уравнения в М - Файле Matlab

Следует отметить, что в М – Файле

$$: x(1) = A_{11}, x(2) = A_{12}, x(3) = A_{13}, x(4) = A_{22}, x(5) = A_{23}, x(6) = A_{33}.$$

Запуск на счет осуществляется командной строкой в следующем виде >>

```
[x,f,ex]=fsolve(@fun9,[0.0001233654 0.000321456 0.000456321
0.000321456 0.00023654 0.000354654]).
```

Так как закон управления определяется уравнением

$$u = -\frac{1}{2}(a_1(2A_{11}x_1 + A_{12}x_2 + A_{13}x_3) + a_5(A_{12}x_1 + 2A_{22}x_2 + A_{23}x_3) + a_9(A_{13}x_1 + A_{23}x_2 + 2A_{33}x_3)), \quad (3.14)$$

то в результате решения поставленной задачи оптимальное управление будет иметь вид

$$u = -(0.4\Delta\omega_1 + 0.54\Delta\omega_2 + 0.68\Delta\omega_3).$$

Структурная схема многодвигательного электропривода волочильного стана приведена на рисунке 3.4

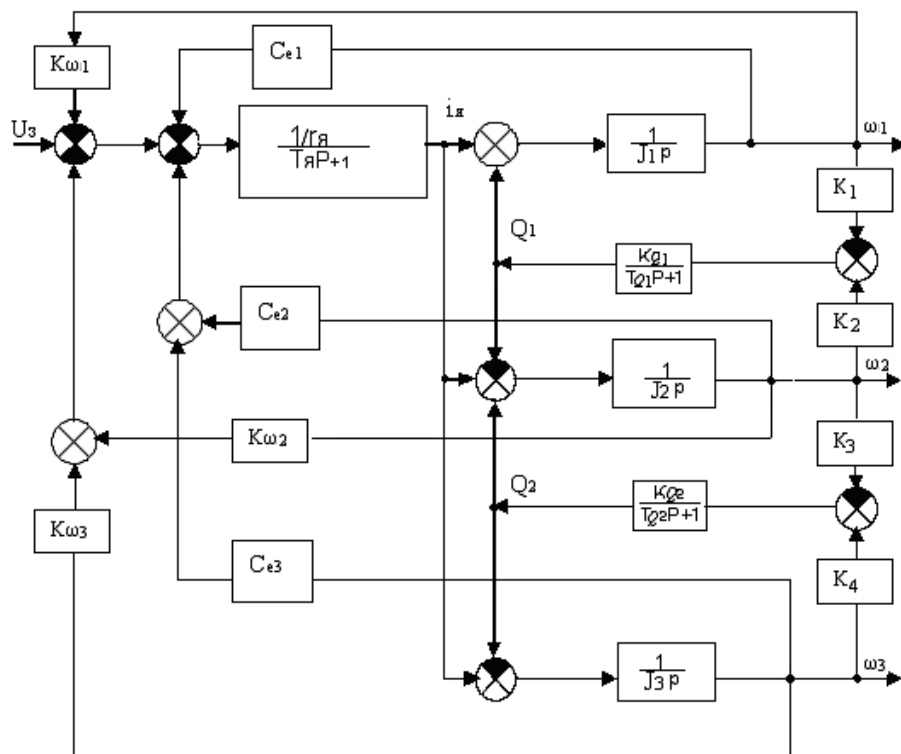


Рисунок 3.4– Структурная схема многодвигательного электропривода волочильного стана

3.2 Исследование электропривода стана ВПЦ-3-4-550 с системой стабилизации противонатяжений на компьютерной модели

Для исследования характера зависимости противонатяжения проволоки и других параметров стана от режима и усилий волочения было проведено численное моделирование статики и динамики 3-х кратного прямоточного волочильного стана ВПЦ-3-4-550 блочными схемами питания двигателя. Численные значения параметров волочильного стана ВПЦ-3-4-550 приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1-Численные значения параметров волочильного стана ВПЦ-3-4-550

№	Параметры	Идентификаторы	Численные значения	Фор
п/п ппи	Стана			
1.	C-электромагнитная постоянная	C	77.3	F4.1
2.	L[Гн] — индуктивность цепи якоря	DLL	0.0012	F6.4
3.	r[Ом]—сопротивление цепи якоря	R	0.031	F5.3
4.	R[м] — радиус барабана	RR	0.275	F5.3
5.	l[м]—длина проволоки от барабана до следующего барабана	DL	0.56	F4.2
6.	W— число витков обмотки	W	850	F4.0
7.	r _B [Ом]—сопротивление цепи	RB	41	F3.0
8.	E[Па] — модуль Юнга	E	0.2 + E12	E7.1
9.	J _k [кг*м ²] — момент инерции масс	DJJ(K)	0.683 0.705 0.745	3F5.3
10.	j _k — передаточное число редуктора	DJ _k	0.150 0.193 0.244	3F5.3
11	F _k ^o [Н] — усилие волочения	FU1(K)	13590 9712 7308	3F6.0
12.	Q _{k-1} [М ²] — площадь сечения проволоки	Q(k)	0.406-E04,0.258- 0.1962-E04	3F10. 4
13.	μ _e —коэффициент обжатия	DM (к)	1.67 1.32 1.23	3F4.2

Моделирование этого 3-х кратного волочильного стана основывается на численном решении его уравнений движения:

а)Индивидуальная и параллельная схемы питания. Уравнения динамики электропривода ПВС в этом случае принимают вид:

$$\begin{cases} L_k di_k / dt = -r_k i_k - c_k \Phi_k \omega_k + U_k, & k = 1,3 \\ J_k d\omega_k / dt = c_k \Phi_k \omega_k - R_k j_k (T_k + F_k - T_{k+1}) - M_{sk}, & k = 1,3, \\ T_1 \equiv T_4 \equiv 0 \\ l_k dT_k / dt = EQ_{k-1} (R_k j_k \omega_k / \mu_k - R_{k-1} j_{k-1} \omega_{k-1}) - l_{2k} dF_k / dt, & k = 2,3 \\ W_k d\Phi_k / dt = -r_{Bk} f_k (\Phi_k) = U_{Bk}, & k = 1,3 \end{cases} \quad (3.15)$$

Соответственно, уравнения статики принимают вид:

$$\begin{cases} r_k i_k^0 + C_k \Phi_k^0 \omega_k^0 - U_k^0 = 0, & k = 1, 3 \\ C_k \Phi_k^0 i_k^0 - R_k j_k (T_k^0 + F_k - T_{k+1}^0) = 0, & k = 1, 3 \\ T_1 \equiv T_4 \equiv 0 \\ R_k j_k \omega_k^0 - \mu_k \omega_{k-1}^0 R_{k-1} = 0, & k = 2, 3 \\ r_{Bk} f_k (\Phi_k^0) - U_{Bk}^0 = 0, & k = 1, 3 \end{cases} \quad (3.16)$$

где $i_k^0, \omega_k^0, \Phi_k^0, (k = 1, 3), T_k^0, k = 2, 3$ - установившиеся значения токов i_k , угловых скоростей ω_k , магнитных потоков Φ_k и противонапряжений T_k ; U_k^0, U_{Bk}^0 — установившиеся значения напряжений питания цепи якоря $U_k (k=1, 3)$ и обмотки возбуждения $U_{Bk} (k=1, 3)$.

Как отмечалось уравнения для параллельной схемы питания являются частным случаем уравнений индивидуальной схемы питания (3.15) и (3.16) при условиях

$$U_1 = U_2 = U_3 \quad (3.17)$$

При оценке свойств спроектированной САР прежде всего выясняют ее устойчивость. Понятие устойчивости САР, как и всякой динамической системы, связано с ее поведением после прекращения внешнего воздействия, т.е. с ее свободным движением под влиянием начальных условий. При этом система устойчива, если после прекращения внешнего воздействия она по истечению некоторого времени возвращается к тому состоянию равновесия или вынужденного движения, в котором находилась до начала воздействия. Иначе, устойчивость линейной системы - это свойство затухания ее переходных процессов.

Оценка устойчивости есть оценка принципиальной способности осуществлять регулирование (управление), поэтому с оценкой устойчивости и начинают исследование всякой САР.

Применение современных средств вычислительной техники снимает трудности, связанные с непосредственным решением дифференциальных уравнений и построением переходных процессов.

В основу модели заложены структурные схемы электропривода и их взаимосвязей [21,22] и укрупненная структурная схема модели прямоточного волоочильного стана как электромеханической системы, а также параметры прямоточного стана ВПЦ-3-4-550 которые представлены в таблице 3.1.

Модель реализована в виде программных модулей для пакета визуального программирования SIMULINK математического пакета MATLAB 7.0.

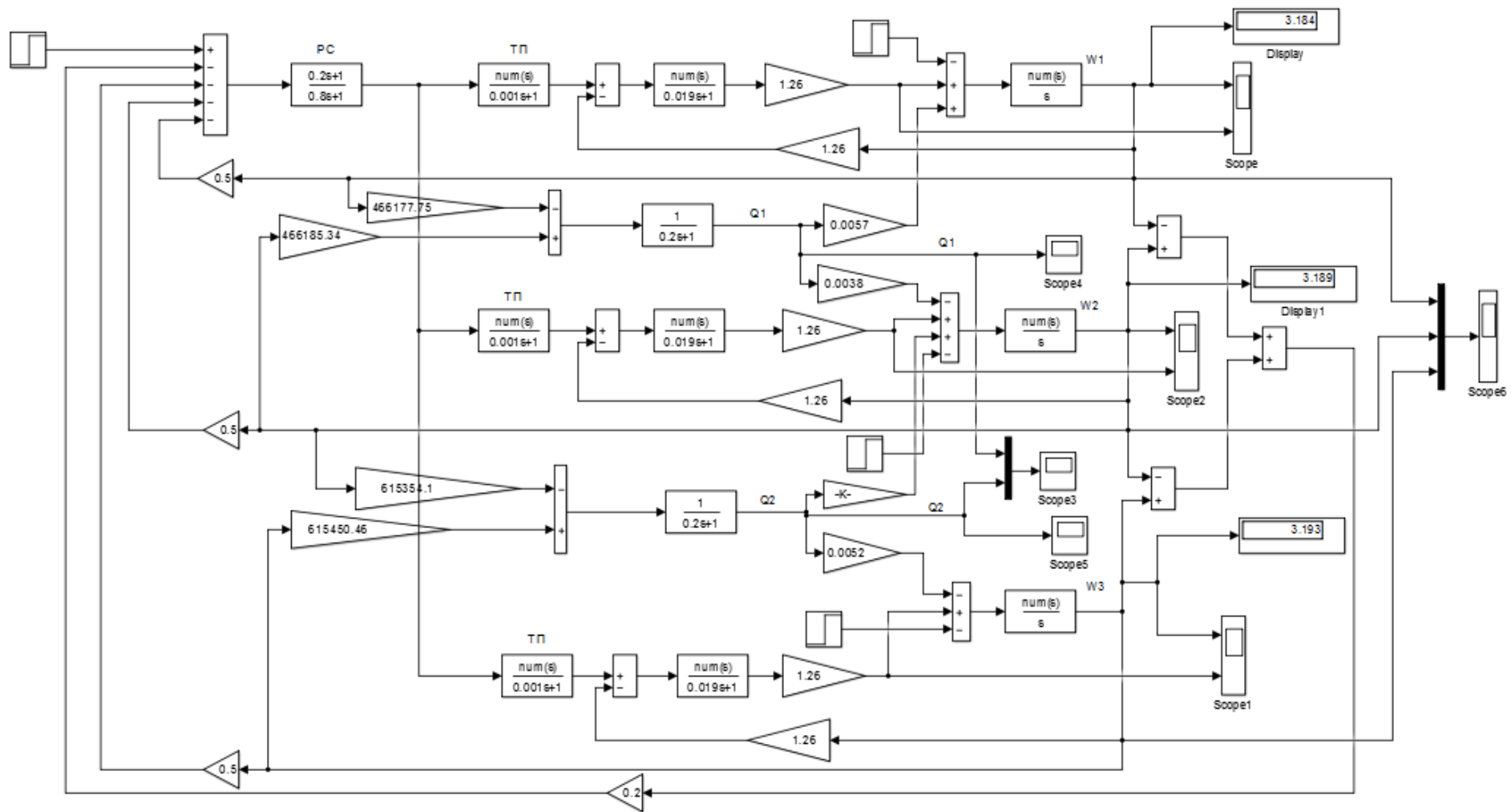


Рисунок 3.5 – Компьютерная модель стана ВПЦ-3-4-550 в среде Simulink математического пакета MATLAB 7.0

На рисунках ниже приведены результаты моделирования процесса пуска стана в работу, причем показаны координаты основных регулируемых величин: скорости вращения двигателей барабанов (рисунок 3.5), моментов всех электродвигателей (рисунок 3.6) и величины противонатяжений (рисунок 3.7). За время $t=4$ с стан разгоняется до рабочей скорости.

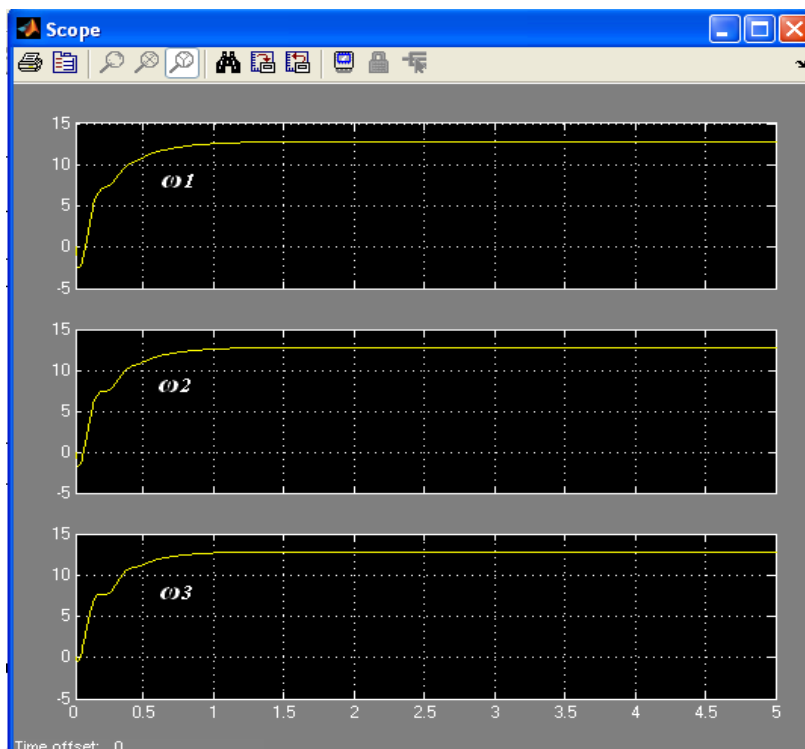


Рисунок 3.5 - Скорости вращения двигателей барабанов при пуске стана

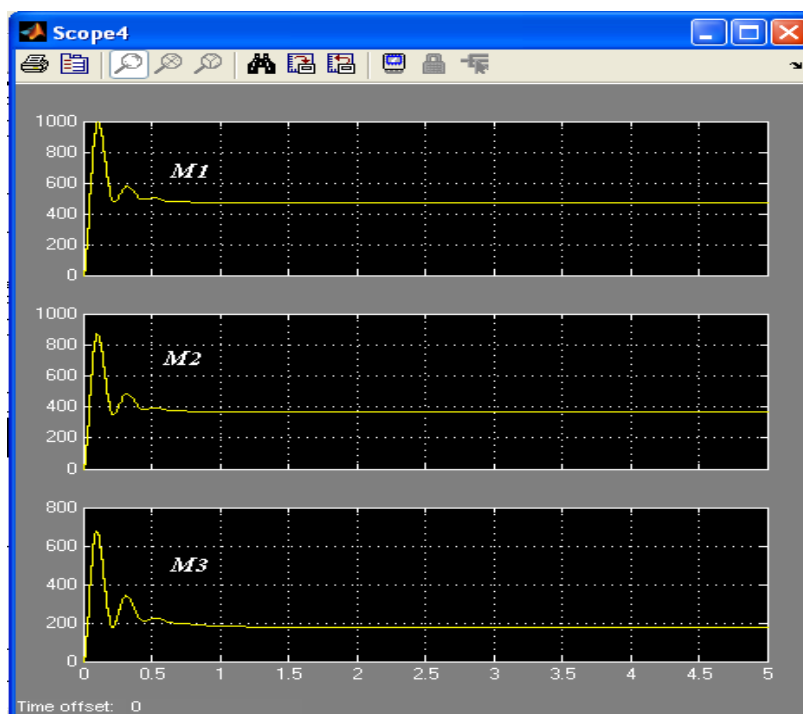


Рисунок 3.6 - Моменты приводных электродвигателей при пуске стана



Рисунок 3.7 – Противонапряжения между первым и вторым, вторым и третьим межбарабанными промежутками при пуске стана

Поскольку технологические вытяжки равны кинематическим, то динамические моменты, а следовательно и токи во всех двигателях одинаковые. Характер формирования всех противонапряжений колебательный. Затухания вынужденных колебаний происходят за 2...3с. Амплитуда не превышает 4 % от установившегося значения.

Результаты моделирования подтверждают работоспособность предложенной системы регулирования электроприводом. Ошибка поддержания скорости волочения не более 0,3 м/с, что не превышает максимально допустимого значения по технологическими требованиям. Ошибка поддержания противонапряжения во всех режимах работы также меньше максимально допустимой и составляет 0,1 кН - для статического режима и 0,23кН - для динамического режима работы при значениях $Q1=5кН$, $Q2=2,5кН$. Качество переходных процессов представляется удовлетворительным.

Разработана структурная схема многодвигательного электропривода прямоточного волочильного стана и его компьютерная модель для исследования качества переходных процессов технологических параметров.

Результаты моделирования и анализ режимов взаимосвязанной работы электроприводов волочильных блоков стана подтверждают что разработанные принципы управления электроприводами, а также предложенные настройки контуров регулирования обеспечивают регулирование скорости волочения с максимальной ошибкой, не превышающей $\pm 5 \%$, регулирование натяжения с

погрешностью не более $\pm 15\%$. Таким образом, обеспечивается выполнение заданных технологических требований во всех режимах.

Заключение

1. Получены законы управления, обеспечивающие стабилизацию статистических противонатяжений проволоки между блоками стана независимо от изменения режима и усилий волочения.

2. Сравнительный анализ индивидуальной и параллельной схем питания электроприводов с системой стабилизации противонатяжений проволоки в волочильном стане показывает, что в первом случае можно добиться стабилизации при любом заданном значении противонатяжений проволоки, а во втором случае это достигается в ограниченном диапазоне из – за ограниченных диапазонов изменения потоков двигателей.

3. Синтезирован закон управления в переходных режимах волочения, который позволяет поддерживать заданные значения противонатяжений и осуществить переходной процесс за заданное время. Показано, что найденный закон стабилизации противонатяжений проволоки в переходном режиме можно использовать и в установившемся режиме, т.е. можно использовать одно и тоже программное устройство для стабилизации противонатяжений проволоки во всех режимах работы стана.

4. Синтезирован закон стабилизации противонатяжений проволоки в волочильном стане при линейном разгоне и останове. Техническая реализация предлагаемого закона управления, обеспечивающего стабилизацию противонатяжений при использовании современной техники достаточно проста и надежна.

5. Предлагаемая система стабилизации противонатяжения в режиме мягкой стабилизации тяговых усилий обеспечивает постоянство статистических противонатяжений проволоки для всех систем питания по отношению к изменению режима и усилий волочения.

6. Система стабилизации натяжения проволоки в переходном режиме обеспечивает постоянство оптимальных значений противонатяжений, по отношению к изменению напряжения цепи якоря двигателей.

Список литературы

1. Тарнавский А.Л. Эффективность волочения с противонапряжением. //М.: Металлургия, 1959.
2. Пальмов Е.В., Гурьянов М.К. Современные скоростные волочильные станы. //В сб. "Расчет и конструирование заводского оборудования" - М.: Машгиз, 1950 - с.195.
3. Пальмов Е.В. Определение усилий волочения с учетом вязкопластических свойств деформируемого тела. //В сб."Расчет и конструирование заводского оборудования" - М.: Машгиз, 1950, вып.1.
4. Дружинин Н.Н. Непрерывные станы - как объект автоматизации. М.: Металлургия, 1967.
5. Шустов А.Д. Процессы деформации бумажного полотна. М.: Легкая промышленность, 1969.
6. Егоров В.Н., Шестаков В.М. Динамика систем электропривода. Ж: Энергоатомиздат, 1983.
7. Джолдасбеков У.А., Бияров Т.Н., Молдабеков М.М. Устойчивость системы автоматического управления прямоточным волочильным станом. //Вестник АН КазССР, N12, Алма-Ата, 1982 - с.47-51.
8. Волочильное оборудование (каталог в/о Машинэкспорт), - М.: Машинэкспорт СССР - 93 с. с иллюстр.
9. Развитие сухового волочения проволоки //The trend development of drawing. "Wird Jnd" 1975, v.6, N354 - pp.594-598.
10. Красильщиков Л.А., Соколов Н.В. Влияние закручивания при волочении на механические свойства проволоки. //Сталь, 1964, N2 - с.43.
11. Зудкин С.М., Пружак А.Г., Алалыкин Г.С. Электропривод и автоматика волочильных станов. //М.: Металлургия, 1977. - 208 с.
12. Юхвец И.А. Волочильное производство. - М.: Металлургия, 1965.
13. Недовизий И.Н., Тарнавский А.Л. Скоростное волочение низкоуглеродистой стальной проволоки. - М.: Металлургия, 1954 - 188 с.
14. Клубина Т.Г., Виницкий А.А. Об эффективности использования противонапряжения на прямоточных волочильных станах. //Изв.вузов, черн.металлургия, 1972, N4 - с.95-98.
15. Перлин И.Л., Ерманок М.З. Теория волочения - М.: Металлургия, 1971 - 448 с.
16. Бородавкин И.Т., Михайлов А.С. Влияние скорости волочения на качество проволоки. //М.: Металлургия, N9, 1976.
17. Пранько Н.М., Истомина Б.С. Проблема шума в метизных цехах и пути борьбы с ним. //М., "Черметинформация", 1980, N1088, с.75-77.
18. Johansson S.A. Chutzeinrichtungen an Drahtziehmaschinen. //"Draht Welt" 1980, N2 - pp.46-47.
19. Исследование рабочих режимов волочильного стана ВСП-11 намоточного аппарата фирмы "Малмери" и электромеханические связи электропривода стана ВСКТ-10. //Отчет КазПТИ им.В.И.Ленина.

Научн.рук.темы АЛ.Виницкий - N ГР: 80029176.Ннв.N: 0282 60 50499. -Алма-Ата, 1982. - 117 с.

20. Павлов И.М., Шевченко А.Л. Исследования и освоение скоростного волочения проволоки. //М.: Сталь, 1947, N12. - с.1096- 1102.

21. Тарнавский А.Л. Элементы теории и практики высокоскоростного волочения - М.: Сталь, N6,1974.

22. Соколовский М.В. Исследование высокоскоростного волочения стальной низкоуглеродистой проволоки с целью создания технологии и оборудования. Канд.дисс. - г.Свердловск, 1980 - с. И 8.

23. Барсуков В.Ф. Анализ технологических и энергетических режимов намоточных аппаратов волочильных станов и разработка электропривода, повышающего эффективность и качество процесса намотки. Канд.дисс. - г.Свердловск, 1980 - с.118.

24. Рябинин А.И. Исследование и разработка электропривода волочильного стана с учетом упругих связей. Канд.дисс. - Алма-Ата, 1984 - с.178-188.

25. Silder Staphen. Upgarding the qality and productivity of fine Wire. //"*Wire an Wire Product*". 1972,47, N8 - pp.47-50.

26. Недовизий И.Н., Иванов В.П. В сб. "Метизное производство". - М.: Metallургия, 1976, N5 (Мум СССР) - с.28-32.

27. Павлов А.М. Влияние качества металлов и технологических факторов на устойчивость процесса волочения. - М.: Сталь, 1972, N2. - с.152-155.

28. Анализ комплексных испытаний опытных установок по замеру сил противонатяжения, сил волочения и тягового усилия на станах ВС6-7/550 и ВПМ6-7/750. //Отчет КазПТИ им .В .И.Ленина, N ГР68036748 - Алма-Ата, 1968.

29. Ватрушин Л.С. О точности расчета напряжения волочения по номограммам. //"*Цвет.мет.*" N5, М., 1980 - с.90-93.

30. Пальмов' Ё.В. Влияние скорости волочения на усилие волочения. //В сб. "Расчет ' и конструирование заводского оборудования" - М.: Машгиз, 1950 - с.30-43.

31. Фольмер Х., Павельеки О. Влияние скорости волочения на усилие волочения и механические свойства проволоки. //*StahlundEisen*, N8, 1976.

32. Малахов Ю.И., Иванов Г.К., Цыба Ю.А. Режим регулирования силовых параметров волочения в прямоточных станах с противонатяжением. //"*Технич. науки*", вып.9, Алма-Ата, КазПТИ, 1975 - с.67-76.

33. Беспалов Б.В., Пусгильников В.М. О влиянии связи между противонатяжением и давлением наволоку на процесс стабилизации усилий волочения в прямоточном волочильном стане. /Мзвесця АНКазССР, N6 - Алма-Ата, 1969 - с.35.

34. Bruhe R. Drahtzeihen mit Jegenzug. //"*Draht-Welt*", 1966, N4 |с.62.

35. Беспалов Б.В., Рябинин А.И. Совершенствование систем регулирования волочильными станами. //М.: Metallургия, N10, 1982 - с.54-56.

36. Алексеев Г.П., Беспалов Б.В., Малахов Ю.И., Рябинин А.И. Прибор для измерения давления на волоку, //В реф.сб.НИИИНФОРМТЯЖМАШ, 1-77-16, СШ-17.
37. А.С. 182787 (СССР). Способ настройки много двигательного электропривода петлевого волочильного стана многократного волочения. /Колесов В.М., Волков В.Е., Егай А.Г. и др. - Оpubл. в Б.И. 1966, N12.
38. Цыба Ю.А. К вопросу оптимального управления и регулирования прямоточными волочильными станами. Труды 3-й международной научно-технической конференции «Энергетика, телекоммуникации и высшее образование в современных условиях». – Алматы: АИЭС, 17-18 октября, 2002,. С. 205-207.