

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Российский государственный профессионально-педагогический
университет»

**ГЛАВНЫЙ ПРИВОД АВТОМАТ-СТАНА ТРУБОПРОКАТНОГО
АГРЕГАТА**

Выпускная квалификационная работа бакалавра
по направлению подготовки 44.03.04 Профессиональное обучение
(по отраслям)

Идентификационный код ВКР: 145

Екатеринбург 2016

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Российский государственный профессионально-педагогический
университет»
Институт инженерно-педагогического образования
Кафедра электрооборудования и энергоснабжения

К ЗАЩИТЕ ДОПУСКАЮ:
Заведующая кафедрой ЭС
_____ А.О. Прокубовская
« _____ » _____ 2016 г.

ГЛАВНЫЙ ПРИВОД АВТОМАТ-СТАНА ТРУБОПРОКАТНОГО АГРЕГАТА

Выпускная квалификационная работа бакалавра
по направлению подготовки 44.03.04 Профессиональное обучение
(по отраслям)
профиля подготовки «Энергетика»
специализации «Электропривод и автоматика»

Идентификационный код ВКР: 145

Исполнитель:
студент группы ЭП-401

О.А. Королев

Руководитель:

В.П. Чудновский

Нормоконтролер:
ст. преподаватель

Н.В. Шайхадарова

Екатеринбург 2016

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа выполнена на 75 страницах, содержит 21 рисунок, 5 таблиц, 20 источников литературы, а также 5 приложений.

Ключевые слова: ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС, АВТОМАТ-СТАН, ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРИВОД, ТИРИСТОРНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ, ДВУХЗОННАЯ САР.

Объектом исследования является электрооборудование автомат-стана трубопрокатного агрегата.

Предметом исследования является главный привод автомат-стана трубопрокатного агрегата.

Цель работы: выполнить проектирование главного привода автомат-стана трубопрокатного агрегата.

В данной работе рассмотрен технологический процесс автоматического стана ТПУ 140. Представлен план расположения основного механического оборудования трубопрокатного стана и кинематическая схема автоматического (автомат) стана ТПУ 140. Сформулированы требования к главному приводу. Произведен подбор главного привода, его проверка на нагрев и перегрузочную способность. Представлены нагрузочные диаграммы при прокате двух типоразмеров труб.

Разработана двухзонная система автоматического управления приводом.

В экономической части работы представлен расчет окупаемости капитальных вложений в модернизацию, а также результаты расчетов технико-экономических показателей.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
1 ОПИСАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА.....	8
1.1 Технологический процесс ТПУ 140.....	8
1.2 Описание конструкции. Кинематическая схема механизма	19
2 ВЫБОР ТИПА ЭЛЕКТРОПРИВОДА, ДВИГАТЕЛЯ И СИЛОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ	20
2.1 Требования к главному приводу автоматического стана	20
2.2 Выбор типа привода и рода тока.....	20
2.3 Проверочный расчет предварительно выбранного двигателя главного привода. Нагрузочная диаграмма.....	21
2.4 Выбор преобразователя.....	25
2.5 Технические данные тиристорного преобразователя	29
3 РАЗРАБОТКА ДВУХЗОННОЙ САР.....	31
3.1 Выбор системы управления электропривода.....	31
3.2 Анализ характеристик силовой части электропривода как объекта управления.....	32
3.3 Анализ характеристик датчиков информации	45
3.4 Синтез передаточных функций регуляторов САР скорости... ..	49
4 ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ РАБОТЫ	59
4.1 Обоснование выбранного варианта	59
4.2 Капитальные вложения	59
4.3 Эксплуатационные расходы	61
4.4 Расчет экономической эффективности.....	63
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	66
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	68
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	71
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	72

ПРИЛОЖЕНИЕ В	73
ПРИЛОЖЕНИЕ Г	74
ПРИЛОЖЕНИЕ Д	75

ВВЕДЕНИЕ

Современный электрический привод представляет собой электромеханическую систему, включающую в себя электрический двигатель, систему управления и механическую передачу от двигателя к рабочему органу производственного механизма. Кроме того, система электропривода содержит ряд вспомогательных устройств и аппаратов, с помощью которых обеспечивается связь отдельных частей электропривода, его защита, различные блокировки, коммутация цепей и так далее.

Развитие электропривода идет по пути упрощения механических передач и приближения электродвигателей к рабочим органам машин и механизмов, а также возрастающего применения электрического регулирования скорости приводов.

Применение тиристорных преобразователей позволило не только создать высокоэкономические регулируемые электроприводы постоянного тока, но и открыло большие возможности для использования частотного регулирования двигателей переменного тока, в первую очередь наиболее простых и надежных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором.

Современный электропривод является индивидуальным автоматизированным электроприводом. Это означает, что он всегда содержит в своем составе систему автоматического управления (САУ), которая в простейших случаях осуществляет пуск, отключение двигателя и его защиту, а в более сложных управляет технологическим процессом приводимого в движение механизма. Указанные особенности автоматизированного электропривода определяют тенденцию в развитии современного машиностроения – упрощение кинематических цепей при усложнении и совершенствовании систем управления их электроприводами.

Основные пути совершенствования и развития современного электропривода позволяют обеспечить наилучшие технико-экономические показатели работы электропривода:

Модернизация существующих серии электродвигателей. Цель процесса: выпуск серийных электрических двигателей с высокими техническими характеристиками и параметрами, малыми удельными расходами материалов, с применением новых материалов и прогрессивных технологий изготовления;

Создание и выпуск двигателей специального назначения: повышенного быстродействия, шаговые, линейные, тихоходные. При использовании двигателя специального назначения может быть исключена механическая передача, что упрощает систему электропривода, снижает массу и габариты;

Унификация элементов и устройств управления электрическими приводами. Это направление предусматривает сокращение числа схем и решений элементов привода, что позволяет осуществлять крупноблочное исполнение электрооборудования;

Объектом исследования является электрооборудование автомат-стана трубопрокатного агрегата.

Предметом исследования является главный привод автомат-стана трубопрокатного агрегата.

Цель работы: выполнить проектирование главного привода автомат-стана трубопрокатного агрегата.

Задачи выпускной квалификационной работы:

1. Рассмотреть технологический процесс обкатки трубы.
2. Описать конструкцию автомат стана.
3. Выбрать тип привода и силового преобразователя.
4. Разработать двухзонную систему автоматического регулирования.
5. Разработать технико-экономическое обоснование работы.

1. ОПИСАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

1.1 Технологический процесс ТПУ 140

Трубопрокатная установка ТПУ 140 предназначена для выпуска горячекатаных труб диаметром от 57 до 136 миллиметров с толщиной стенки от 3,6 до 18 миллиметров, а также труб из нержавеющей стали диаметров от 83 до 121 миллиметра и с толщиной стенки от 5 до 11,5 миллиметров. Самые ходовые марки стали 12Х18Н10Т и 08Х18Н10Т.

ТПУ 140 состоит из одной методической перекатной нагревательной печи, прошивного стана, автоматического стана, двух обкатных машин, нагревательной методической печи с шагающим подом, редукционного стана, который также выполняет функцию калибровочного стана, охладительного стола и оборудования для холодной отделки труб.

Технологический процесс участка заключается в нескольких операциях: подготовка металла к прокатке, нагрев заготовки, прошивка заготовки в гильзу, раскатка гильзы в трубу, обкатка трубы и редуцирование трубы, применяемое для получения труб малого диаметра и калибровки труб по нужному диаметру. Заготовка, сломанная на гидравлическом прессе, нагревается в методической печи с наклонным ходом (рисунок.1).

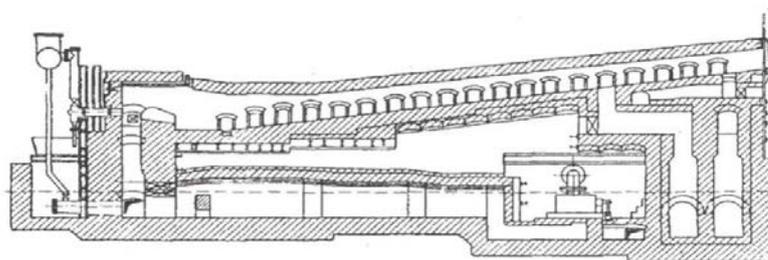


Рисунок 1 – Методическая перекатная печь для нагрева круглых заготовок

Схема расположения оборудования ТПУ 140 представлена в приложении Б.

Нагретая до заданной температуры заготовка выдается из печи фрикционным выталкивателем. По наклонной решетке заготовка скатывается на промежуточный рольганг. В конце рольганга имеется пневматический зацентровщик, центрующий заготовку в горячем состоянии. Далее оцентрированная заготовка передается сбрасывателем на наклонную решетку, по которой она поступает во вводной желоб прошивного стана. Чтобы избежать сильного биения заднего конца заготовки при прошивке, желоб закрывается специальной крышкой. Это особенно важно при прошивке заготовок большой длины. Чтобы процесс протекал правильно, ось заготовки, лежащей в приемном желобе, должна совмещаться с осью прошивки. Возможно регулирование желоба по высоте, что необходимо при переходе на прокатку труб другого диаметра.

Заготовка задается с валки прошивного стана пневматическим толкателем через вводную воронку, установленную между шпинделями на передней стороне рабочей клетки. Толкатель расположен в задней части желоба. Передвигаясь под действием толкателя, заготовка захватывается валками. Для ограничения предварительной подачи заготовок в воронке установлен убирающий упор.

Валки прошивного стана вращаются в одну сторону, сообщая заготовке вращательно-поступательное движение в сторону прокатного стержня с оправкой, установленного на выходе из валков, и заготовка прошивается в гильзу.

Главный привод прошивного стана состоит из электродвигателя постоянного тока серии П2-20/40-2,5 (2500 кВт, 750В) с регулируемым числом оборотов (250-500 об/мин), шестеренной клетки, муфт, соединительных валов и шпиндельного устройства.

После прошивки и извлечения из трубы прокатного стержня прошитая гильза по наклонной решетке перекачивается в приемный желоб автоматического(автомат) стана, который служит для раскатки гильзы в трубу с заданной толщиной стенки (рисунок 2).



Рисунок 2 – Автоматический стан

В комплекс механизмов автоматического стана входят: рабочая клеть, главный привод, передний и задний столы, механизм роликов обратной подачи с приводом и вспомогательное оборудование: пневматический сбрасыватель, вталкиватель, клиновое устройство подъема валка.

Передний стол (рисунок 3) имеет рамную конструкцию, перемещающуюся на катках по рельсам вдоль рабочих валков от самостоятельного электропривода.

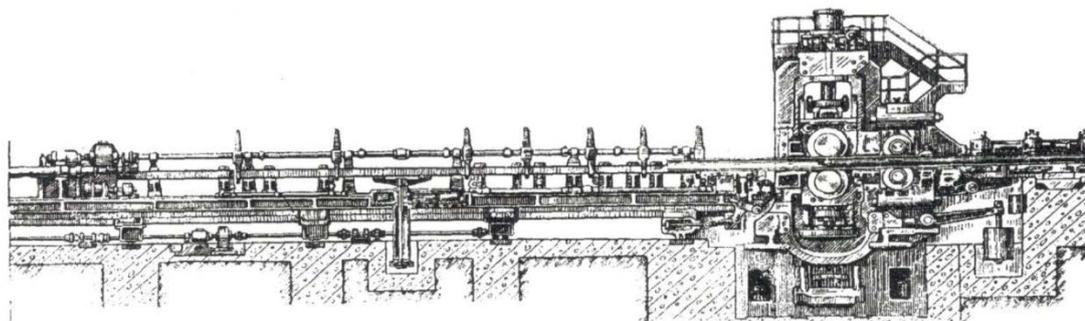


Рисунок 3– Продольный разрез автоматического стана (передний стол)

При переходе на прокатку в новом калибре стол передвигают так, чтобы входной желоб был бы установлен против этого калибра (рисунок 4).

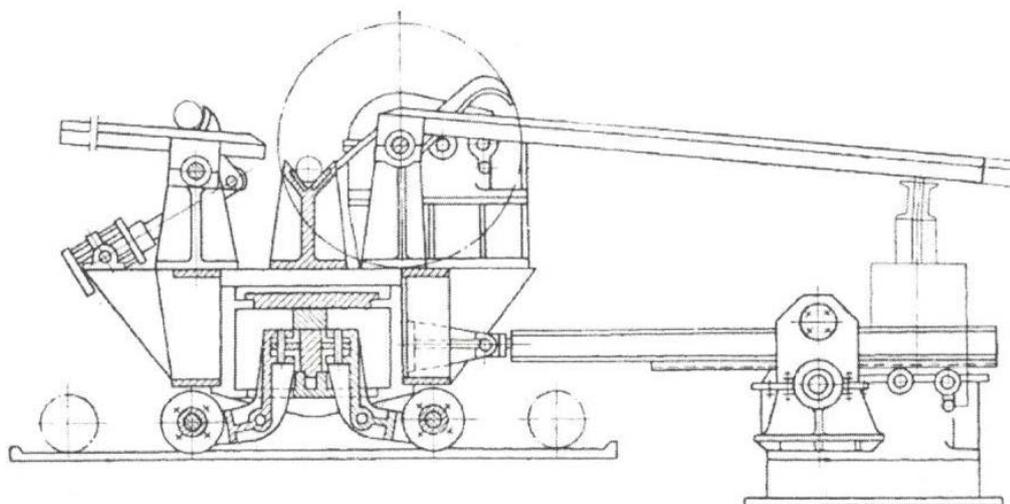


Рисунок 4 – Передний стол автоматического стана

Механизм передвижения стола состоит из реечных передач, размещенных по длине стола и соединенных между собой трансмиссионным валом. Зубчатые рейки приводятся в движение от шестерен, получающих вращение через трехступенчатый редуктор от асинхронного электродвигателя серии АР(4кВт).

На столе смонтирован задерживатель гильз, рычаги которого работают от пневмоцилиндров. Задерживатель предназначен для гашения кинетической энергии скатывающейся гильзы перед сбрасыванием ее в желоб автоматического стана. При задержках на автоматическом стане и невозможности подать очередную гильзу в приемный желоб, ее удерживают на решетке задерживателем до освобождения приемного желоба. Средняя секция желоба выполнена подъемно-поворотной для того, чтобы можно было задать трубу в рабочую клеть другим концом (в случае незахвата гильзы и заката оправки). Подъем этой секции вместе с трубой осуществляется вертикальным пневмоцилиндром, а поворот – горизонтальным

пневмоцилиндром, шток которого связан с зубчатой рейкой. На переднем столе размещен длинноходовый пневматический вталкиватель, с помощью которого гильза задается в рабочую клетку, перемещаясь по желобу переднего стола.

Рабочая клетка автоматического стана (рисунок 5) имеет два калибровочных валка, установленных на подушках, перемещающихся в окна станины.

С задней стороны клетки установлены ролики для возврата трубы на переднюю часть стана для повторного прохода. Во время прокатки рабочие валки вращаются в сторону движения трубы. При этом задние ролики неподвижны и раздвинуты. После выхода из валков автоматического стана труба попадает в проводки, установленные на заднем столе. Проводки выполняют движение трубы при ее выходе из валков, а также удерживают стержень от продольного изгиба. В конце заднего стола расположен упор для закрепления стержня.

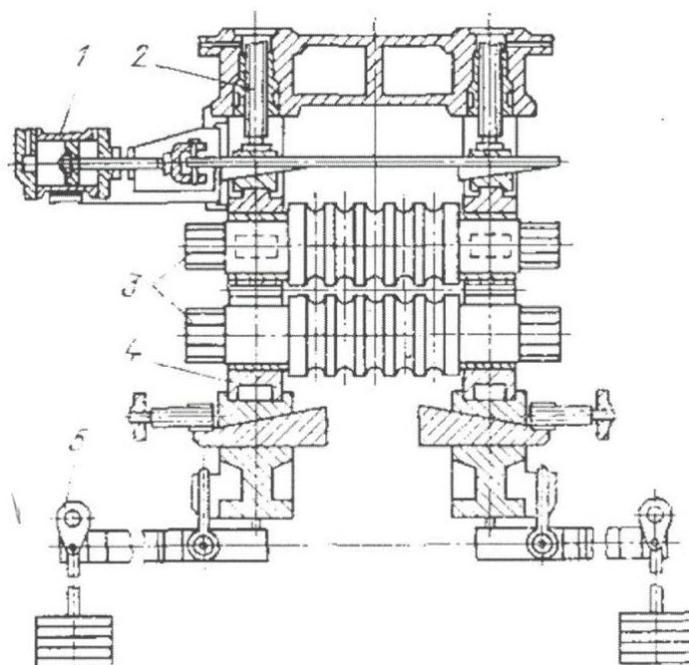


Рисунок 5 – Рабочая клетка автоматического(автомат) стана:
1 – привод нажимного устройства; 2 – винт нажимного устройства; 3 – рабочие валки; 4 – станина; 5 – уравнивающее устройство

Верхний и нижний валки (рисунок 6) устанавливают по высоте посредством нажимных винтов. Верхний валок с помощью тяг уравнивается грузом.

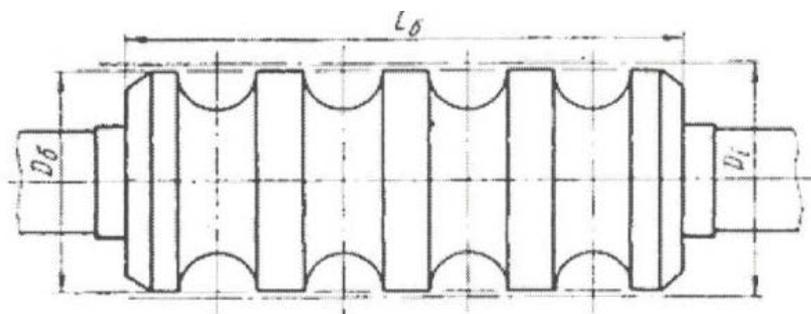


Рисунок 6 –Валок автоматического(автомат) стана

После каждого прохода оправка снимается со стержня вручную, а труба возвращается на переднюю сторону стана с помощью роликов обратной подачи, расположенных за рабочими валками и вращающимися в направлении, противоположном вращению рабочих валков. Для возврата трубы верхний рабочий валок несколько приподнимается, образуя увеличенный холостой калибр, а нижний ролик обратной подачи, поднимаясь с помощью пневматического цилиндра, прижимает трубу к верхнему ролику и вместе с последним сообщает трубе обратное движение. В результате труба (благодаря трению роликов о трубу) передается через увеличенный по высоте калибр рабочих валков на переднюю сторону стана. Привод обоих роликов осуществляется через универсальные шпиндели и цилиндрический зубчатый редуктор от электродвигателя постоянного тока серии Д808 (37 кВт) с регулируемым числом оборотов. Схема технологического процесса показана на рисунке 7. Верхний ролик обратной подачи во избежание трения о трубу при рабочем проходе установлен несколько выше выходящей трубы и в процессе работы по высоте не регулируется. Нижний ролик находится на коромысле и во время прокатки трубы опускается.

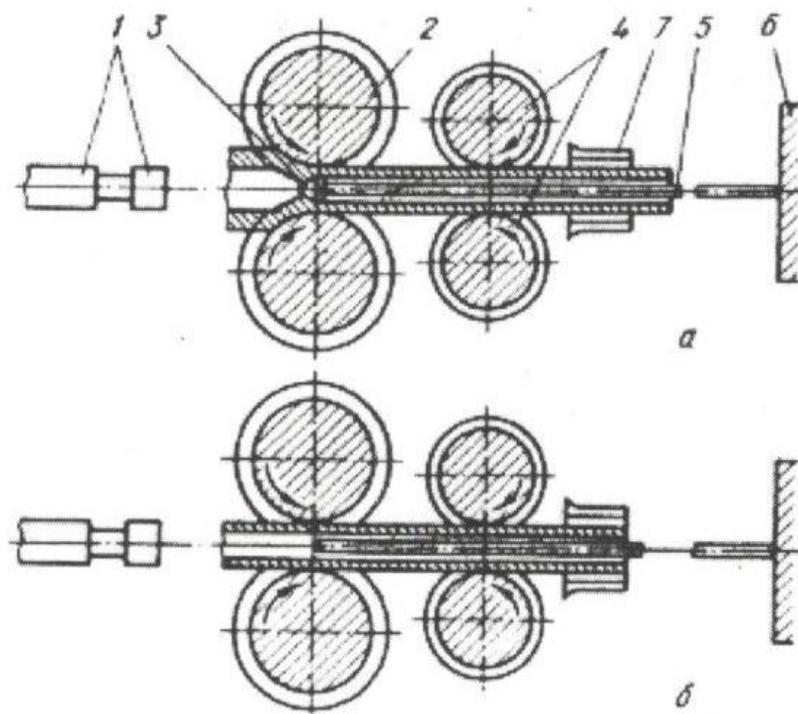


Рисунок 7 – Схема прокатки трубы в автоматическом стане:
 а – рабочий ход; б – возврат трубы; 1 – вталкиватель гильзы; 2 – рабочие валки; 3 – оправка; 4 – ролики обратной подачи; 5 – стержень; 6 – упор стержня; 7 – воронка

Подъем и опускание верхнего валка на определенную величину осуществляется клиновым механизмом, который состоит из сдвоенного клина, установленного между нажимным винтом и подушкой. Клин перемещается вдоль оси валков с помощью горизонтального пневматического цилиндра, укрепленного на кронштейне сбоку одной из станин. Работа клинового устройства автоматизирована, для чего имеются два фотореле на передней и задней стороне стана. Поочередное и противоположное в своей последовательности засвечивание этих двух фотореле при передвижении горячей трубы с переднего стола на задний и обратно поочередно включает командные реле управления электродистрибуторами (серии ВВ 60) обеих полостей пневматического цилиндра клинового устройства.

Внутри трубы перед прокаткой забрасывают поваренную соль, расплав которой является технологической смазкой, уменьшающей коэффициент

трения между трубой и оправкой. Перед вторым проходом трубу обязательно кантуют на 90° градусов для того, чтобы выпуски на трубе попадали в вершину калибра при последующей продольной раскатке. Недостаточно полная кантовка между проходами приводит к увеличению поперечной разностенности на готовых трубах. Второй проход производится на оправке с диаметром на 1-2 миллиметра большим, чем диаметр оправки первого прохода, а иногда на оправке равного диаметра.

На переднем столе стана установлены задающе-кантующие фрикционные ролики. Вращение роликов производится от асинхронного электродвигателя серии АО2-72-6 (22кВт, 970 об/мин) через конические передачи, а сближение или разведение их от пневматического цилиндра через систему рычагов. Ролики имеют профилированный калибр. При сближении роликов труба получает поступательное движение и вследствие возникающего крутящего момента поворачивается так, что большая ось ее поперечного сечения оказывается всегда в вертикальном положении. Кантовка таким механизмом производится только перед вторым проходом; при первом проходе, когда задается круглая гильза, механизм только подает ее в калибр автоматического стана.

На рисунке 8 показана схема крепления оправки к стержню. За более тонкий конец шпильки вальцовщик вручную извлекает оправку, а также вручную устанавливает другую оправку, насаженную на шпильку.

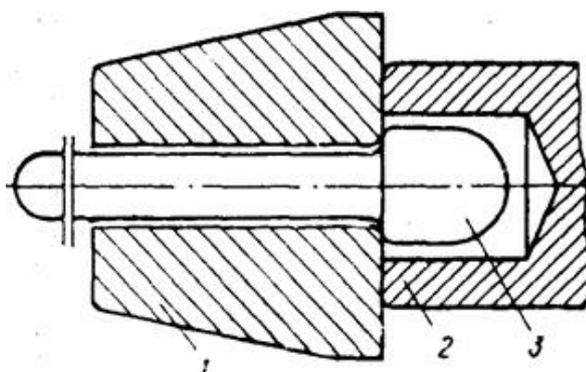


Рисунок 8 – Схема крепления оправки автоматического стана:
1 – оправка; 2 – наконечник стержня; 3 – шпилька

После каждого прохода, когда труба оказывается на заднем столе, оправку снимают со стержня, и труба передается роликами обратной подачи через раздвинутые рабочие валки на переднюю сторону. Оправку укладывают в ванну с водой для охлаждения. Затем вручную устанавливают другую оправку и после сближения валков в рабочее положение производят следующий проход ит.д.

Прокатанная на автоматическом стане труба круговым сбрасывателем, приводимым во вращение асинхронного двигателя серии АР53-6 (2.8 кВт) выдается на наклонную решетку и перекачивается к обратным станам.

В состав обкатного стана входят: рабочая клеть, главный привод, передний и задний столы и вспомогательные механизмы: вводной рольганг, упорный подшипник, центрователи, крышки проводок, сбрасыватель, приводной отталкивающий ролик, замковая клеть.

На вводной стороне обкатного стана установлены перекрыватель, приемные рычаги и вводной рольганг. Перекрыватель расположен над вводным рольгангом и служит для пропуска труб, перекачиваемых из автоматического стана ко второму стану, или для передачи недоката в карман брака. Приемные рычаги, предназначенные для планового укладки труб на вводной рольганг, закреплены на общем продольном валу, получающем качательное движение от пневматического цилиндра.

Труба, скатываясь по наклонной решетке, попадает на вводной приводной рольганг одного из станом, с помощью которого задается в валки. Подача труб в обкатные станы производится поочередно. Конструкция рабочей клетки аналогична рабочим клетям прошивного стана. Станина рабочей клетки открытого типа; она состоит из корпуса и крышки, скрепляемых откидными болтами на клиньях.

Рабочие валки в клетях наклонены один к другому и образуют с осью прокатки в вертикальной плоскости постоянный угол подачи от 6° до $8^{\circ}30'$. Оба валка установлены на четырехрядных роликовых подшипниках и состоят из кованных стальных осей и чугунных съемных бочек, насаженных

на ось горячей посадкой. Наклон рабочих валков обеспечивается соответствующим расположением гнезд подшипников в подушках.

Главный привод обкатных станов состоит из электродвигателя постоянного тока серии П2П-500-147-8 (500 кВт, 440В) с регулируемым числом оборотов (315-1000 об/мин), шестеренной клетки, муфт, соединительных валов и шпиндельного устройства. Регулировку обжатия на машине производят вручную по показаниям амперметра, измеряющего нагрузку двигателя главного привода.

После обкатки трубы с обеих машин выдаются выбрасыватели по решеткам на общий отводный рольганг, по которому она транспортируется к методической печи с шагающим подом (рисунок 9) калибровочного стана.



Рисунок 9 – Методическая печь с шагающим подом

На выходе из печи трубы поступают в калибровочный стан, где они калибруются по наружному диаметру и редуцируются, если требуется получить трубу меньшего цепного типа (рисунок 10).



Рисунок 10 – Охлаждающий стол цепного типа ТПУ 140

В процессе охлаждения необходимо, чтобы трубы укладывались параллельно оси прокатки, без перекосов, и чтобы избежать сильного искривления не допускается их скопление в одной секции стола.

Остывшие трубы укладываются в пакеты и при помощи крана транспортируются на участок холодной отделки труб.

Бесперебойный технологический цикл обеспечивает электрооборудование, одним из основных видов которого являются электродвигатели. Транспортировка заготовок и труб по участкам осуществляется при помощи роликов, имеющих привод асинхронных двигателей переменного тока серии АР, с мощностью 5,5 кВт. Сбрасыватели имеют привод от электродвигателей той же серии, но мощностью 2,5-2,8 кВт. Самым мощным (2500 кВт) на участке является двигатель главного привода прошивного стана, по технологии его мощность должна обеспечивать

прокатку труб с максимальным диаметром 136 миллиметров и толщиной стенки 18 миллиметров.

1.2 Описание конструкции. Кинематическая схема механизма

В комплекс механизмов автоматического стана входят: рабочая клеть, главный привод, передний и задний столы, механизм роликов обратной подачи с приводом и вспомогательное оборудование: пневматический сбрасыватель, вталкиватель, клиновое устройство подъема валка.

Рабочая клеть автоматического стана имеет два калибровочных валка, установленных в подушках, перемещающихся в окнах станины. Верхний и нижний валки устанавливаются по высоте посредством нажимных винтов. Верхний валок с помощью тяг уравнивается грузом, с задней стороны клетки установлены ролики для возврата трубы на переднюю часть стана повторного прохода. Во время прокатки рабочие валки вращаются в сторону движения трубы. При этом задние ролики неподвижны и раздвинуты. После выхода из валков автоматического стана труба попадает в проводки, установленные на заднем столе. Проводки направляют движение трубы при ее выходе из валков, а также удерживают стержень от продольного изгиба. В конце заднего стола расположен упор для закрепления стержня.

Кинематическая схема привода валков автоматического стана изображена в приложении Б.

2. ВЫБОР ТИПА ЭЛЕКТРОПРИВОДА, ДВИГАТЕЛЯ И СИЛОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

2.1 Требования к главному приводу автоматического стана

1. Режим работы – продолжительный нереверсивный.
2. Прокат производится на установившейся скорости.
3. Диапазон изменения скорости вращения электродвигателя – 1:6.
4. Реверс аварийный.
5. Ползучая скорость (для механомонтажных операций) – 10% основной частоты вращения двигателя.

Требования к скоростному режиму главного привода:

1. Точность поддержания заданной частоты вращения не ниже 0,5% заданного значения.
2. Время восстановления заданного значения частоты вращения при набросе и сбросе нагрузки равной номинальному моменту приводного двигателя не более 0,4 секунды.
3. Диапазон регулирования частоты вращения при прокате 100-400 об/мин.

2.2 Выбор типа двигателя и рода тока

В настоящее время в качестве электропривода автоматического стана используется привод постоянного тока от электродвигателя постоянного тока П2-800-177-8 (750В; 1250кВт; 200-400об/мин). Питание и управление электродвигателем осуществляется от комплексного тиристорного электропривода КТЭУ-2500/2500-750-УХЛ4 с двухзонной системой регулирования скорости, реализованной на элементной базе УБСР-АИ.

В выпускной квалификационной работе произведена модернизация элементной базы системы управления скоростью, замена существующей

системы автоматического регулирования скорость на микропроцессорную систему управления фирмы Siemens.

2.3 Проверочный расчет предварительно выбранного двигателя главного привода. Нагрузочная диаграмма

Для проверки принимаем двигатель постоянного тока независимого возбуждения П2-800-177-8 (рисунок 11). Паспортные данные указаны в таблице 1.

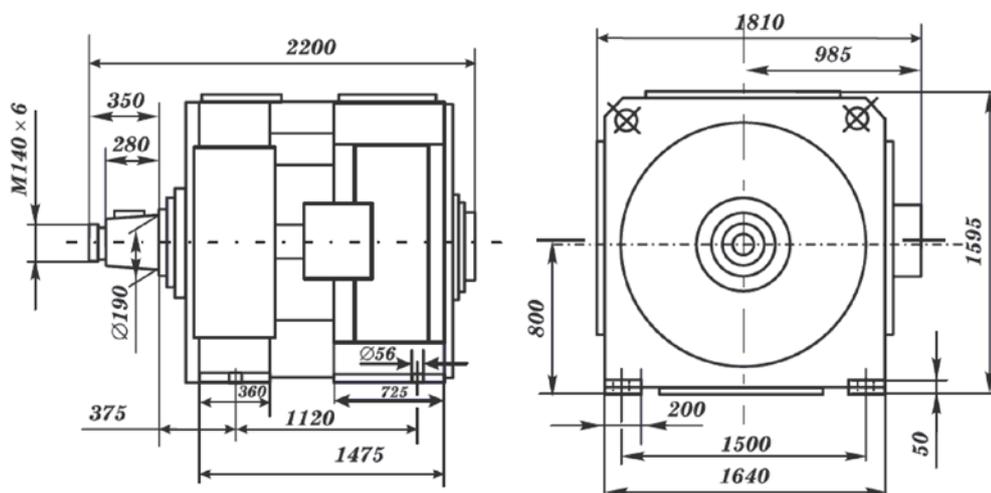


Рисунок 11 – Электродвигатель постоянного тока П2-800-177-8

Таблица 1 – Паспортные данные электродвигателя П2-800-177-8

Наименование параметра	Обозначение	Единица измерения	Значение
Мощность номинальная	$P_{\text{ном дв}}$	кВт	1250
Напряжение номинальное	$U_{\text{ном дв}}$	В	750
Ток номинальный	$I_{\text{ном дв}}$	А	1795
Частота вращения номинальная	$n_{\text{ном дв}}$	об/мин	200
Частота вращения максимальная	$n_{\text{макс дв}}$	об/мин	400
Угловая скорость двигателя номинальная	$\omega_{\text{ном дв}}$	1/с	21
Угловая скорость максимальная	$\omega_{\text{макс дв}}$	1/с	42
Момент двигателя номинальный	$M_{\text{ном дв}}$	кН*м	59,5

Окончание таблицы 1

Напряжение возбуждения	U_B	В	220
Ток возбуждения	I_B	А	55
КПД	η	%	92,6
Перегрузочный коэффициент	λ	-	2
Момент инерции двигателя	$J_{дв}$	кг*м ²	750
Сопротивление обмотки якоря, при t=20 ⁰ С	$R_я$	Ом	0,0048
Сопротивление добавочных полюсов, при t=20 ⁰ С	$R_{дп}$	Ом	0,00132
Сопротивление обмотки возбуждения, при t=20 ⁰ С	R_B	Ом	0,825
Сопротивление компенсирующей обмотки, при t=20 ⁰ С	$R_{ко}$	Ом	0,00348
Температурный коэффициент	K_T	-	1,32
Сопротивление якорной цепи, при рабочей t ^o	$R_{яд} = K_T(R_я + R_{дп} + R_{ко})$	Ом	0.0174
Сопротивление обшивки	$R_{ш} = 0,1 * R_{яд}$	Ом	0,00174
ЭДС двигателя номинальная	$E_{дн} = U_{дн} - I_{дн} * R_{яд} - \Delta U_{ш}$	В	763
Индуктивность якоря двигателя	$L_{яд}$	мГн	0,58
Номинальный магнитный поток	$\Phi_{ном дв}$	Вб	0,167
Завод изготовитель	ХЭМЗ		

Для построения нагрузочной диаграммы используем технологические данные при прокате наиболее энергоемкой трубы диаметром 134 мм и толщиной стенки 6 мм, указанные в таблице 2.

Таблица 2 – Параметры работы двигателя при прокате Ø134x6 МС20

Наименование параметра	Обозначение	Единица измерения	Значение
Время первого прохода	t_1	с	3
Время второго прохода	t_2	с	3
Время технологической паузы перед вторым проходом	$t_{п1}$	с	9
Время технологической паузы между циклами	$t_{п2}$	с	15
Рабочая частота вращения	$n_{дв раб}$	об/мин	135
Угловая скорость рабочая	$\omega_{дв раб}$	1/с	14,1
Частота вращения при прокате	$n_{дв пр}$	об/мин	115
Угловая скорость при прокате	$\omega_{дв пр}$	1/с	12
Момент проката двигателя	$M_{пр}$	кН*м	104,17

Проверим двигатель на нагрев.

Условие проверки двигателя на нагрев

$$M_{\text{ЭКВ}} \approx 0,8 * M_{\text{ДВ НОМ}},$$

где $M_{\text{ЭКВ}}$ – среднеквадратичный (эквивалентный) момент цикла проката одной трубы, кН*м;

$M_{\text{ДВ НОМ}}$ – номинальный момент двигателя, кНм;

$$M_{\text{ДВ НОМ}} = \frac{P_{\text{ДВ НОМ}}}{\omega_{\text{ДВ НОМ}}},$$

где $\omega_{\text{ДВ НОМ}}$ – номинальная частота вращения двигателя, с⁻¹;

$P_{\text{ДВ НОМ}}$ – номинальная мощность двигателя, кВт.

$$\omega_{\text{ДВ НОМ}} = \frac{n_{\text{ДВ НОМ}}}{9,55};$$

$$\omega_{\text{ДВ НОМ}} = \frac{200}{9,55} = 21 \text{ с}^{-1};$$

$$M_{\text{ДВ НОМ}} = \frac{1250}{21} = 59,5 \text{ кН} * \text{м}.$$

Найдем эквивалентный момент цикла проката одной трубы

$$M_{\text{ЭКВ}} = \sqrt{\frac{M_1^2 * t_1 + M_2^2 * t_2 + M_{\text{ХХ}}^2 * (t_{\text{П1}} + t_{\text{П2}})}{T_{\text{Ц}}}},$$

где M_1 – момент проката двигателя при первом проходе, кН*м;

M_2 – момент проката двигателя при втором прокате, кН*м;

$M_{\text{ХХ}}$ – момент холостого хода, кН*м;

$T_{\text{Ц}}$ – время цикла проката одной трубы, с;

t_1 – время первого прохода, с;

t_2 – время второго прохода, с;

$t_{\text{П1}}$ – время технологической паузы перед вторым проходом, с;

$t_{\text{П2}}$ – время технологической паузы между циклами, с.

Определим время цикла проката одной трубы

$$T_{\text{Ц}} = t_1 + t_{\text{П1}} + t_2 + t_{\text{П2}};$$

$$T_{\text{Ц}} = 3 + 9 + 3 + 15 = 30 \text{ с}.$$

Рассчитаем момент холостого хода

$$M_{xx} = 0,1 * M_{дв ном};$$

$$M_{xx} = 0,1 * 59,5 = 5,95 \text{ кН*м.}$$

Рассчитаем моменты проката двигателя при первом и втором проходах

$$M_1 = M_2 = \frac{P_{ном дв}}{\omega_{дв пр}},$$

где $\omega_{дв пр}$ – частота вращения двигателя, при прокате, c^{-1} .

$$\omega_{дв пр} = \frac{n_{дв пр}}{9,55};$$

$$\omega_{дв пр} = \frac{115}{9,55} = 12 \text{ c}^{-1};$$

$$M_1 = M_2 = \frac{1250}{12} = 104,17 \text{ кН * м.}$$

Отсюда эквивалентный момент цикла проката одной трубы

$$M_{эkv} = \sqrt{\frac{104,17^2 * 3 + 104,17^2 * 3 + 59,5^2 * (9 + 15)}{30}} = 47 \text{ кН * м};$$

$$M_{эkv} = 47 \text{ кН * м} \approx 0,8 M_{дв ном} = 47,6 \text{ кН*м.}$$

Таким образом, условие проверки двигателя на нагрев $M_{эkv} \approx 0,8 M_{дв ном}$ выполняется.

Проверим двигатель на перегрузочную способность.

Условие проверки двигателя на перегрузочную способность

$$M_{макс пр} < M_{дв ном} * \lambda,$$

где λ – перегрузочный коэффициент;

$M_{макс пр}$ – максимальный момент двигателя при прокате, кН*м.

$$\lambda = 2;$$

$$M_{макс пр} = M_1 = M_2 = 104,17 \text{ кН * м.}$$

Условие перегрузочной способности выполняется

$$104,17 \text{ кН*м} < 59,5 * 2 = 119 \text{ кН*м.}$$

Принятый двигатель (П2-800-177-8) удовлетворяет условиям проверки на нагрев и перегрузочную способность (приложение В).

Выбор преобразователя

Для питания и управления электроприводом в проекте сохраняется силовая часть существующего комплексного тиристорного электропривода в составе:

- силовой трансформатор (ТСЗП-2500/10УЗ);
- реверсивные трехфазные мостовые тиристорные выпрямители, включенные по встречно-параллельной схеме с отдельным управлением, входящие в состав КТЭУ-2500/2500-750-УХЛ4;
- сглаживающий дроссель СРОСЗ-1250М-УХЛ4;
- быстродействующий выключатель ВАТ42 с реле РДШ;
- силовой разъединитель.

В качестве возбудителя для питания обмотки возбуждения сохраняется трехфазный нереверсивный мостовой тиристорный выпрямитель. Питание возбудителя осуществляется от токоограничивающего реактора.

Для системы импульсно-фазового управления (СИФУ) якорного преобразователя и возбудителя, и реализации двузонной системы управления электроприводом применено микропроцессорное устройство Simoneg DC-Master фирмы Siemens.

2.4 Технические данные тиристорного преобразователя

Трансформатор

Тип трансформатора преобразовательного агрегата ТСЗП-2500/10УЗ.

Технические данные на трансформатор:

- первичное напряжение $U_1 = 10\text{кВ}$;
- вторичное напряжение $U_2 = 710\text{ В}$;
- ЭДС короткого замыкания $e_k = 6,5\%$;
- потери короткого замыкания $P_{кз} = 19500\text{ Вт}$;
- выпрямительный ток $I_d = 2500\text{ А}$;
- выпрямительное напряжение $U_d = 825\text{ В}$;

- коэффициент снижения напряжения $k_c = 0,9$;
- угол запаса при инвертировании $\bar{\delta} = 10$ эл.град.;
- пульсность схемы $m = 6$;
- коэффициент выпрямления:
 - по току $k_i = 0,815$;
 - по напряжению $k_u = 1,35$;
- угловая частота питающей сети ω_c

$$\omega_c = 2\pi f,$$

где f – частота питающей сети, Гц.

$$\omega_c = 2 * 3,14 * 50 = 314 \text{ рад/с.}$$

ЭДС холостого хода преобразователя ($\alpha = 0$)

$$E_{d0} = k_u * U_2;$$

$$E_{d0} = 1,35 * 710 = 939 \text{ В.}$$

Сопротивление фазы трансформатора, приведенной ко вторичной обмотке:

Индуктивное:

$$x_\delta = \frac{1,73 * U_2 * e_k}{k_i * I_{dt} * 100};$$

$$x_\delta = \frac{1,73 * 710 * 6,5}{0,815 * 2500 * 100} = 0,039 \text{ Ом.}$$

Активное

$$R_\delta = \frac{P_{кз} * (\sqrt{3^2})}{3 * (k_i * I_{dt})^2};$$

$$R_\delta = \frac{19500 * 3}{3 * (0,815 * 2500)^2} = 0,0047 \text{ Ом.}$$

Сопротивление фазы трансформатора, приведенной ко вторичной обмотке эквивалентной звезды:

Индуктивное

$$x_\lambda = \frac{x_\delta}{3};$$

$$x_{\lambda} = \frac{0,039}{3} = 0,013 \text{ Ом.}$$

Активное

$$R_{\lambda} = \frac{R_{\delta}}{3};$$

$$R_{\lambda} = \frac{0,0047}{3} = 0,0016 \text{ Ом.}$$

Эквивалентное сопротивление преобразователя

$$R_{\text{пэ}} = \frac{3}{\pi} * x_{\lambda} + 1,75 * R_{\lambda}.$$

Индуктивность трансформатора

$$L_{\text{тр}} = \frac{2}{3} * \frac{x_{\lambda}}{\omega_c};$$

$$L_{\text{тр}} = \frac{2}{3} * \frac{0,013}{314} = 0,062 * 10^{-3} \text{ Гн.}$$

Сглаживающий реактор

Тип сглаживающего реактора СРОСЗ-1250М-УХЛ4.

Индуктивность дросселя $L_{\text{др}} = 0,32 * 10^{-3} \text{ Гн.}$

Двигатель с механизмом

Момент инерции механизма, приведенный к валу двигателя

$$J_{\text{мех}} = 485,5 \text{ кг * м}^2.$$

Момент инерции двигателя и механизма

$$J_{\Sigma} = J_{\text{дв}} + J_{\text{мех}};$$

$$J_{\Sigma} = 750 + 485,5 = 1235,5 \text{ кг * м}^2.$$

Двигатель с тиристорным преобразователем

Суммарное сопротивление якорной цепи

$$R_{\text{я}\Sigma} = R_{\text{яд}} + R_{\text{ш}} + R_{\text{пэ}};$$

$$R_{\text{я}\Sigma} = 0,0174 + 0,00174 + 0,015 = 0,034 \text{ Ом.}$$

Суммарная индуктивность якорной цепи

$$L_{\text{я}\Sigma} = L_{\text{яд}} + L_{\text{тр}} + L_{\text{др}};$$

$$L_{\text{я}\Sigma} = (0,58 + 0,062 + 0,32) * 10^{-3} = 0,96 * 10^{-3} \text{ Гн.}$$

Электромагнитная постоянная времени якорной цепи

$$T_{я\Sigma} = \frac{L_{я\Sigma}}{R_{я\Sigma}};$$

$$T_{я\Sigma} = \frac{0,96 * 10^{-3}}{0,034} = 0,0282 \text{ с.}$$

Датчик скорости

Тахогенератор (ТП-212) заменяется на импульсный датчик скорости ЛИР-158 фирмы «НИО-21»(рисунок 12).



Рисунок 12 – Импульсный датчик скорости ЛИР-158

Минимальный угол опережения при токе инвертирования $1,8I_{\text{НОМ ДВ}}$

$$\beta_{min} = \arccos \left(\cos \delta - \frac{1,8 * I_{\text{НОМ ДВ}} * x_{\lambda} * \sqrt{3}}{k_c * \sqrt{2} * U_2 * \sin \frac{2\pi}{m}} \right);$$

$$\beta_{min} = \arccos \left(\cos 10^{\circ} - \frac{1,8 * 1795 * 0,013 * \sqrt{3}}{0,9 * \sqrt{2} * 710 * \sin \frac{2*3,14}{6}} \right) = 31 \text{ эл. град.}$$

ЭДС преобразователя, соответствует β_{min}

$$E_U = E_{d0} * \cos \beta_{min};$$

$$E_U = 939 * 0,88 = 826,3 \text{ В.}$$

Максимальный темп изменения тока в процессе разгона выше основной скорости

$$\left(\frac{dl}{dt}\right) = \frac{I_{\text{дв ном}} * \omega_{\text{срез}}}{\pi},$$

где $\omega_{\text{срез}}$ – частота среза контура скорости, 1/с.

$$\left(\frac{dl}{dt}\right) = \frac{1795 * 30}{3,14} = 17149,7 \frac{\text{А}}{\text{с}}$$

Условие выполнения инвертирования

$$k_c * E_{\text{ном дв}} + L_{\Sigma} * \frac{dl}{dt} \leq E_U * k_c;$$

$$0,9 * 763 + 0,96 * 10^{-3} * 17149,7 \leq 826,3 * 0,9;$$

$$703 \text{ В} < 743,67 \text{ В}.$$

Условие инвертирования выполняется.

Определим α_{min}

$$\alpha_{\text{min}} = \arccos \frac{E_d}{1,05 * E_{d0}};$$

$$\alpha_{\text{min}} = \arccos \frac{919}{1,05 * 939} = 23,6 \text{ эл. град.}$$

Угол начального рассогласования принят: $\alpha_0 = 105$ эл. град.

Угол управления, соответствующий работе привода с $E_{\text{ном дв}}$ и $I_{\text{ном дв}}$.

$$\alpha_{\text{ном}} = \arccos \frac{E_{\text{ном дв}} + I_{\text{ном дв}} * R_{\Sigma}}{1,05 * E_{d0}};$$

$$\alpha_{\text{ном}} = \arccos \frac{763 + 1795 * 0,034}{1,05 * 939} = 37 \text{ эл. град.}$$

Эффективное значение пульсации первой гармоники напряжения в отношении к E_{d0} по графикам для $\alpha_{\text{ном}}=37^{\circ}$ и $m=6$; принято $-E_e = 0,15$.

Закон изменения угла рассогласования

$$\alpha = 90^{\circ} - K_{\phi} * U_y,$$

где K_{ϕ} – фазовый коэффициент, эл. град/В;

U_y – напряжение управления.

$$K_{\phi} = 20 \text{ эл. град/В}.$$

Напряжение преобразователя при пилообразном опорном напряжении

$$E_d = E_{d0} * \cos\alpha = E_{d0} * \cos(90^\circ - K_\phi * U_y).$$

Усредненный коэффициент якорного тиристорного преобразователя

$$K_{\text{ТП}} = \frac{\delta E}{\delta U_y} = \frac{E_d - U_d}{U_{y1} - U_{y2}},$$

где U_{y1} – напряжение управления, соответствующее α_{\min} , В;

U_{y2} – напряжение управления, соответствующее $\alpha_{\text{НОМ}}$, В.

Напряжение управления, соответствующее α_{\min}

$$U_{y1} = \frac{90^\circ - \alpha_{\min}}{K_\phi},$$

$$U_{y1} = \frac{90^\circ - 23,6^\circ}{20} = 3,32 \text{ В.}$$

Напряжение управления, соответствующее $\alpha_{\text{НОМ}}$

$$U_{y1} = \frac{90^\circ - \alpha_{\text{НОМ}}}{K_\phi},$$

$$U_{y1} = \frac{90^\circ - 37^\circ}{20} = 2,65 \text{ В.}$$

Подставив значения в формулу, найдем усредненный коэффициент якорного тиристорного преобразователя

$$K_{\text{ТП}} = \frac{\delta E}{\delta U_y} = \frac{919 - 825}{3,32 - 2,65} = 141,6.$$

Амплитудное значение пульсации тока якоря в процентах от номинального тока

$$i = \frac{E_e * 1,05 * E_{d0} * 100 * \sqrt{2}}{L_{\Sigma} * \omega_c * m * I_{\text{НОМ ДВ}}};$$

$$i = \frac{0,15 * 1,05 * 939 * 100 * \sqrt{2}}{0,96 * 10^{-3} * 314 * 6 * 1795} = 6,4\%.$$

Допустимое амплитудное значение пульсации тока якоря на максимальной скорости в процентах от номинального

$$i_{\text{доп}} = 7\%;$$

$$i \leq i_{\text{доп}};$$

$$6,4\% < 7\%.$$

3 РАЗРАБОТКА ДВУХЗОННОЙ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

3.1 Выбор системы управления электропривода

Построение структуры управления электропривода базируется на критериальных оценках динамических процессов и требований к системе в установившихся режимах ее работы. Такой подход нашел широкое применение в системах управления электроприводами с каскадным соединением основного и вспомогательных контуров регулирования. Структура каскадного соединения контуров регулирования характеризуется лучшим качеством управления по сравнению с другими структурами систем управления электроприводами. Так как в структуре САР можно выделить ряд последовательно вложенных друг в друга контуров, то общее название этих систем – многоконтурные системы подчиненного регулирования.

Двухзонные САР позволяют регулировать скорость как ниже, так и выше основной. Преимуществами двухзонных САР в сравнении с однозонными является лучшее использование установленной мощности силового оборудования. В структурном отношении двухзонная САР скорости строится на основе однозонной САР путем ее дополнения системой регулирования возбуждения.

Для рационального управления процессами электромеханического преобразования энергии в цепях питания обмоток якоря и возбуждения двигателя постоянного тока предусматриваются управляемые преобразователи. В регулирующей части предусматриваются регуляторы тока якоря РТ, скорости РС, магнитного потока РМП, электродвижущей силы РЭ, датчики напряжения ДН и тока якоря ДТ, тока возбуждения ДТВ, скорости ДС, электродвижущей силы ДЭ, вычислитель магнитного потока возбуждения двигателя ВП, фильтры Φ и Φ_v .

Канал воздействия по цепи якоря представляет двухконтурную систему регулирования скорости с подчиненным регулированием тока якоря. В данном случае используется однократная САР скорости, которая имеет внутренний контур регулирования тока якоря и внешний контур регулирования скорости, так как нам не требуется в технологическом процессе механизма иметь абсолютно жесткие механические характеристики двигателя.

Канал воздействия по цепи возбуждения выполняется также в виде двухконтурной системы регулирования, но содержащей внутренний контур регулирования магнитного потока и внешний контур регулирования ЭДС. Связующим звеном для функционирования данных каналов является ЭДС якоря, то есть данные каналы управления связаны между собой через внутренние связи объекта регулирования.

В приложении Г и приложении Д приведены соответственно функциональная и структурная схемы двухзонной системы автоматического регулирования скорости.

3.2 Анализ характеристик силовой части электропривода как объекта управления

Определение параметров объекта регулирования якорной цепи системы двухзонного регулирования

Активное сопротивление якорной цепи

$$R_{я\Sigma} = 0,034 \text{ Ом.}$$

Индуктивность якоря

$$L_{яд} = 0,58 \text{ мГн.}$$

Электромагнитная постоянная времени цепи якоря двигателя

$$T_{яд} = \frac{L_{яд}}{R_{я\Sigma}};$$

$$T_{яд} = \frac{0,58 * 10^{-3}}{0,034} = 0,017 \text{ с.}$$

Максимальная ЭДС преобразователя, соответствующая углу управления $\alpha=0$ эл. град.

$$E_{d0} = 939 \text{ В.}$$

Эквивалентное активное сопротивление главной цепи вентильного преобразователя

$$R_{\Sigma} = R_{я\Sigma} + R_{пЭ};$$

$$R_{\Sigma} = 0,034 + 0,015 = 0,049 \text{ Ом.}$$

Эквивалентная индуктивность преобразователя

$$L_{\Sigma} = L_{п} + L_{р} + L_{яд};$$

$$L_{\Sigma} = 0,062 + 0,32 + 0,58 = 0,962 \text{ мГн.}$$

Электромагнитная постоянная времени главной цепи

$$T_{\Sigma} = \frac{L_{\Sigma}}{R_{\Sigma}};$$

$$T_{\Sigma} = \frac{0,962 * 10^{-3}}{0,049} = 0,02 \text{ с.}$$

Электрохимическая постоянная времени привода

$$1. \quad \varphi^0 = 1:$$

$$T_m = J_d * \frac{R_{\Sigma}}{(k * \Phi_N)^2};$$

$$T_m = 1235,5 * \frac{0,049}{(1 * 32,81)^2} = 0,056 \text{ с.}$$

$$2. \quad \varphi^0 = 0,45:$$

$$T_m = J_d * \frac{R_{\Sigma}}{(k * 0,45 * \Phi_N)^2};$$

$$T_m = 1235,5 * \frac{0,049}{(1 * 0,45 * 32,81)^2} = 0,278 \text{ с.}$$

Коэффициент усиления вентильного преобразователя

$$K_{п} = \frac{E_{d0}}{U_{опт}};$$

$$K_{\Pi} = \frac{939}{10} = 93,9.$$

Система базисных величин:

Базисное напряжение

$$U_{\delta} = E_{\text{дв ном}} = 763 \text{ В.}$$

Базисный ток

$$I_{\delta} = I_{\text{дв ном}} = 1795 \text{ А.}$$

Базисная угловая скорость

$$\omega_{\delta} = \omega_{\text{дв ном}} = 21 \text{ рад/с.}$$

Базисный электромагнитный момент

$$M_{\delta} = M_{\text{дв ном}} = 59,5 \text{ кН} \cdot \text{м.}$$

Базисное сопротивление

$$R_{\delta} = \frac{U_{\delta}}{I_{\delta}};$$

$$R_{\delta} = \frac{763}{1795} = 0,425 \text{ Ом.}$$

Базисное напряжение системы регулирования

$$U_{\delta p} = 7 \text{ В.}$$

Параметры главной цепи в системе относительных единиц:

Эквивалентное активное сопротивление

$$r_{\delta} = \frac{R_{\Sigma}}{R_{\delta}};$$

$$r_{\delta} = \frac{0,049}{0,425} = 0,1153 \text{ о. е.}$$

Механическая постоянная времени

$$T_j = J_{\Sigma} * \frac{\omega_{\delta}}{M_{\delta}};$$

$$T_j = 1235,5 * \frac{21}{59500} = 0,436 \text{ с.}$$

Коэффициент усиления преобразователя в системе относительных единиц

$$k_{\Pi} = K_{\Pi} * \frac{U_{6p}}{U_6};$$

$$k_{\Pi} = 93,9 * \frac{7}{763} = 0,86 \text{ о. е.}$$

Коэффициент передачи датчика тока, скорости, ЭДС

$$k_{дт} = k_{дс} = k_{дэ} = 1.$$

Определение параметров объекта регулирования цепи возбуждения системы двухзонного регулирования

Номинальное значение магнитного потока

$$\Phi_{дв ном} = 0,167 \text{ Вб.}$$

Значение потока при ослабленном поле

$$\Phi_{осл} = 0,45 * \Phi_{дв ном};$$

$$\Phi_{осл} = 0,45 * 0,167 = 0,07515 \text{ Вб.}$$

Номинальное значение тока возбуждения

$$I_{в ном} = 55 \text{ А.}$$

Значение тока возбуждения при потоке $0,45 * \Phi_N$ (определяется по кривой намагничивания двигателя (см. рисунок 13))

$$I_u |_{0,45 * \Phi_{дв ном}} = 0,33 * I_{в ном};$$

$$I_u |_{0,45 * \Phi_{дв ном}} = 0,33 * 55 = 18,15 \text{ А.}$$

Номинальное значение потока рассеяния

$$\Phi_N^{\sigma} = \sigma * \Phi_{дв ном},$$

где σ – коэффициент, о.е.

Принимаем $\sigma = 0,18$.

$$\Phi_N^{\sigma} = 0,18 * 0,167 = 0,03 \text{ Вб.}$$

Номинальные значения главного потокосцепления

$$\Psi_{mN} = m_B * w_B * \Phi_{дв ном},$$

где m_B – коэффициент, зависящий от схемы соединения обмоток возбуждения, о.е.;

w_B – число витков обмотки возбуждения.

Для расчета

$m_B=1$ (при последовательном соединении обмоток);

$w_B = 264$;

$\Psi_{mN} = 1 * 264 * 0,167 = 44,1 \text{ В} * \text{с}.$

Номинальное значение намагничивающего тока в установившемся режиме

$I_{mN} = I_{B \text{ ном}} = 55 \text{ А}.$

Значение потокосцепления при ослабленном поле

$\Psi_m |_{\Phi=0,45*\Phi_{дв \text{ ном}}} = 0,45 * \Psi_{mN};$

$\Psi_m |_{\Phi=0,45*\Phi_{дв \text{ ном}}} = 0,45 * 44,1 = 19,845 \text{ В} * \text{с}.$

Значение тока намагничивания при ослабленном поле

$I_m |_{\Phi=0,45*\Phi_{дв \text{ ном}}} = 0,33 * I_{mN};$

$I_m |_{\Phi=0,45*\Phi_{дв \text{ ном}}} = 0,33 * 55 = 18,15 \text{ А}.$

Номинальное значение потокосцепления рассеяния

$\Psi_{\sigma N} = \delta * \Psi_{mN},$

где δ – коэффициент, о.е.

Принимаем $\delta = \sigma = 0,18.$

$\Psi_{\sigma N} = 0,18 * 44,1 = 7,94 \text{ В} * \text{с}.$

Активное сопротивление обмотки возбуждения

$R'_{O.B} = k_t * R_{O.B},$

где k_t – коэффициент увеличения сопротивления при нагреве обмотки до расчетной рабочей температуры, о.е.

Принимаем $k_t = 1,4$ при пересчете температуры обмотки с $15^{\circ}\text{C}.$

$R'_{O.B} = 0,14 * 0,815 = 1,155 \text{ Ом}.$

Активное сопротивление фиктивной короткозамкнутой обмотки (эквивалентного контура вихревых токов)

$R_{B.T} = \frac{R'_{O.B}}{\alpha_{B.T}},$

где $\alpha_{B.T}$ – коэффициент заполнения машины с шихтованным магнитопроводом, о.е.

Принимаем $\alpha_{B.T} = 0,1$.

$$R_{B.T} = \frac{1,155}{0,1} = 11,55 \text{ Ом.}$$

Система базисных величин для цепи возбуждения

Базисный ток возбуждения

$$I_{B,B} = I_{B \text{ ном}} = 55 \text{ А.}$$

Базисное сопротивление цепи возбуждения

$$R_{B,B} = R_{O.B} = 0,825 \text{ Ом.}$$

Базисное напряжение возбуждения

$$U_{B,B} = R_{B,B} * I_{B,B};$$

$$U_{B,B} = 0,825 * 55 = 45,375 \text{ В.}$$

Базисное потокосцепление

$$\Psi_{B,B} = \Psi_{mN} = 44,1 \text{ В * с.}$$

Базисный магнитный поток

$$\Phi_B = \Phi_{дв \text{ ном}} = 0,167 \text{ Вб.}$$

Базисное время цепи возбуждения

$$T_{B,B} = \frac{\Psi_{B,B}}{U_{B,B}};$$

$$T_{B,B} = \frac{44,1}{45,375} = 0,972 \text{ Гн.}$$

Базисная индуктивность цепи возбуждения

$$L_{B,B} = \frac{\Psi_{B,B}}{I_{B,B}};$$

$$L_{B,B} = \frac{44,1}{55} = 0,8 \text{ Гн.}$$

Индуктивность, обусловленная главным потоком машины в точке номинального режима и при ослаблении потока

$$L_m^0 = \frac{d\Psi_m}{dI_m} | I_{m0} = I_{mN};$$

$$L_m^0 = \frac{d\Psi_m}{dI_m} \Big|_{I_{m0}} \approx \frac{\Delta \Psi_m}{\Delta I_m} \Big|_{i_{m0}} = 1.$$

Согласно этой формуле, приращения потока машины и ее тока намагничивания в относительных единицах можно найти по кривой намагничивания $\Psi_m(i_m)$, предварительно рассчитанной и затем пересчитанной в относительные единицы для выбранного двигателя (рисунок 13).

$$l_m^0 \Big|_{i_m^0=1} = \frac{0,075}{0,25} = 0,3;$$

$$l_m^0 \Big|_{i_m^0=0,33} = \frac{0,35}{0,25} = 1,4.$$

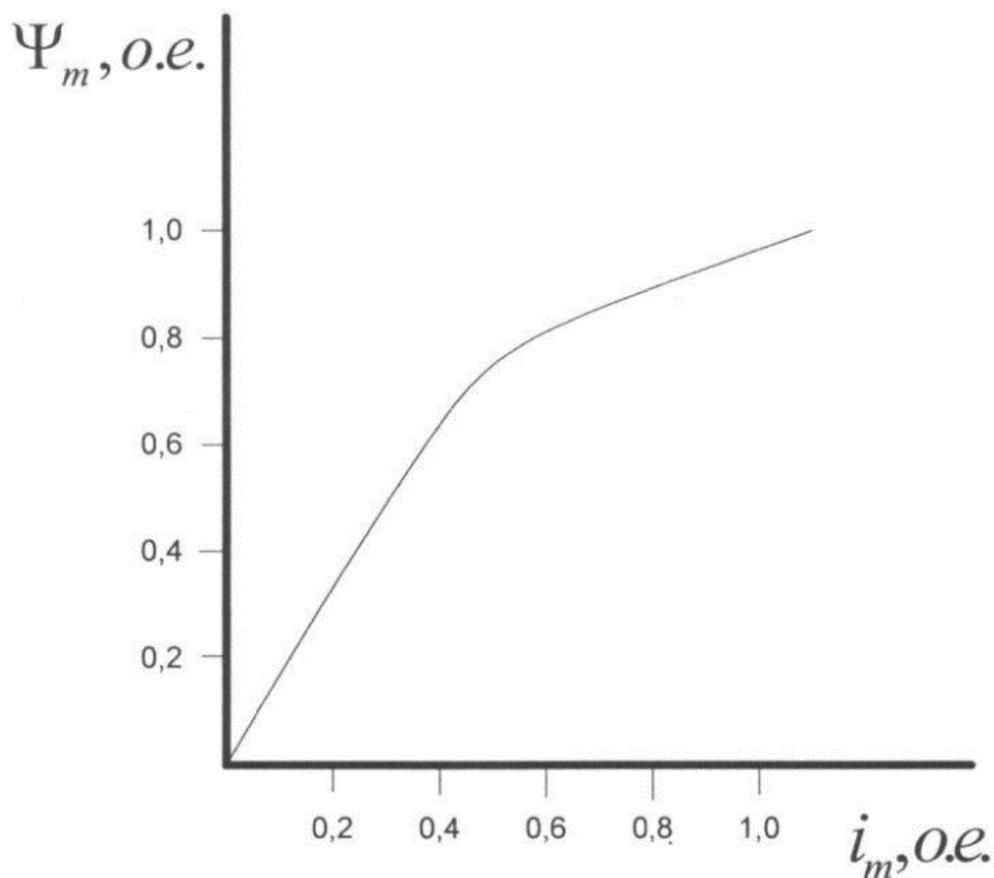


Рисунок 13 – Кривая намагничивания двигателя

Найдем абсолютные значения потокосцеплений, обусловленных
главным потоком машины.

$$L_m^0 = L_{Б.В} * l_m^0.$$

$$\text{При } \varphi^0 = 1$$

$$L_m^0 = 0,8 * 0,3 = 0,24 \text{ Гн.}$$

$$\text{При } \varphi^0 = 0,45$$

$$L_m^0 = 0,8 * 1,4 = 1,12 \text{ Гн.}$$

Индуктивности рассеяния обмотки возбуждения

$$l_{0.В}^\sigma = \frac{d\psi_\sigma}{di_B} = 0,18;$$

$$l_{0.В}^\sigma = l_{0.В}^\sigma * L_{Б.В};$$

$$l_{0.В}^\sigma = 0,18 * 0,8 = 0,144 \text{ Гн.}$$

Полная индуктивность обмотки возбуждения при номинальном
магнитном потоке:

$$1. \quad \text{При } \varphi^0 = 1:$$

$$l_B^0 = l_m^0 + l_{0.В}^0;$$

$$l_B^0 = 0,24 + 0,144 = 0,384 \text{ Гн};$$

$$L_B^0 = l_B^0 * L_{Б.В};$$

$$L_B^0 = 0,384 * 0,8 = 0,3072 \text{ Гн.}$$

$$2. \quad \text{При } \varphi^0 = 0,45:$$

$$l_B^0 = l_m^0 + l_{0.В}^\sigma;$$

$$l_B^0 = 1,4 + 0,18 = 1,58 \text{ Гн};$$

$$L_B^0 = l_B^0 * L_{Б.В};$$

$$L_B^0 = 1,58 * 0,8 = 1,264 \text{ Гн.}$$

Активное сопротивление фиктивной короткозамкнутой обмотки в
относительных единицах

$$r'_{Б.Т} = \frac{R_{Б.Т}}{r_{Б.В}};$$

$$r'_{Б.Т} = \frac{11,55}{1,155} = 10 \text{ о. е.}$$

Расчет параметров вентильного преобразователя цепи возбуждения

Максимальная выпрямленная ЭДС (при угле управления $\alpha = 0$ эл.град.)

$$E_{d0} = k_n * U_{2N};$$

$$E_{d0} = 1,35 * 380 = 513 \text{ В.}$$

Активное сопротивление вентильного преобразователя цепи возбуждения

$$R_{nэ} = R_n + R_\gamma,$$

где R_n – активное сопротивление преобразователя, Ом;

R_γ – фиктивное активное сопротивление, Ом.

Сопротивление:

$$R_n = R_{T.O} * k_n,$$

где $R_{T.O}$ – активное сопротивление обмотки токоограничивающего реактора, Ом;

k_n – коэффициент, зависящий от схемы преобразователя, о.е.

Принимаем $k_n = 2$.

$$R_n = 0,102 * 2 = 0,204 \text{ Ом.}$$

Сопротивление

$$R_\gamma = k_\gamma * \frac{\rho}{2 * \pi} * X_T,$$

где k_γ – коэффициент, учитывающий особенности однофазного преобразователя и параллельного соединения простых схем, о.е.;

X_T – индуктивное сопротивление рассеяния обмоток токоограничивающего реактора, Ом;

ρ – пульсность преобразователя, о.е.

Индуктивное сопротивление:

$$X_T = L_{T.O} * \omega_C;$$

$$X_T = 1,01 * 10^{-3} * 314 = 0,317 \text{ Ом.}$$

Принимаем $k_\gamma = 1$.

$$R_{\gamma} = 1 * \frac{6}{2 * 3,14} * 0,317 = 0,303 \text{ Ом};$$

$$R_{n\text{э}} = 0,204 + 0,303 = 0,507 \text{ Ом.}$$

Индуктивность вентильного преобразователя цепи возбуждения

$$L_g = k_n * L_{T.O};$$

$$L_g = 2 * 1,01 * 10^{-3} = 2,02 \text{ мГн.}$$

Эквивалентные параметры цепи возбуждения

Эквивалентные сопротивления цепи возбуждения

$$R_B = R_{O.T} + R_{\Pi};$$

$$R_B = 0,825 + 0,507 = 1,332 \text{ Ом};$$

$$r_B = \frac{R_B}{R_{\text{б.в}}};$$

$$r_B = \frac{1,332}{0,825} = 1,614 \text{ о. е.}$$

Эквивалентные индуктивности цепи возбуждения

$$L_B^{\sigma} = L_{\text{о.в}}^{\sigma} + L_n;$$

$$L_B^{\sigma} = 0,144 + 0,002 = 0,146 \text{ Гн};$$

$$L_B = \frac{L_B^{\sigma}}{L_{\text{б.в}}};$$

$$L_B = \frac{0,146}{0,8} = 0,1825 \text{ о. е.}$$

Постоянные времени модели цепи возбуждения

Постоянная времени рассеяния обмотки возбуждения

$$T_B^{\sigma} = T_{\text{б.в}} * \frac{l_{\text{об}}^{\sigma}}{r_B};$$

Постоянная времени эквивалентного контура вихревых токов

$$T_{B.T}^0 = T_{\text{б.в}} * \frac{l_m^0}{r_{B.T}};$$

Постоянная времени возбуждения

$$T_B^0 = T_{\text{б.в}} * \frac{l_B^0}{r_B};$$

1. При $\varphi^0 = 1$:

$$T_B^\sigma = 0,972 * \frac{0,18}{1} = 0,175 \text{ с};$$

$$T_{B.T}^0 = 0,972 * \frac{0,3}{10} = 0,03 \text{ с};$$

$$T_B^0 = 0,972 * \frac{0,384}{1} = 0,373 \text{ с}.$$

2. При $\varphi^0 = 0,45$:

$$T_B^\sigma = 0,972 * \frac{0,18}{1} = 0,175 \text{ с};$$

$$T_{B.T}^0 = 0,972 * \frac{1,4}{10} = 0,136 \text{ с};$$

$$T_B^0 = 0,972 * \frac{1,58}{1} = 1,535 \text{ с}.$$

Коэффициент усиления вентильного преобразователя цепи возбуждения

$$K_{нв} = \frac{E_{d0}}{U_{онт}};$$

$$K_{нв} = \frac{513}{10} = 51,3.$$

В системе относительных единиц

$$k_n = K_{нв} * \frac{U_{б,р}}{U_b};$$

$$k_n = 51,3 * \frac{7}{45,375} = 7,9 \text{ о. е.}$$

Коэффициент передачи датчика тока возбуждения

$$k_{дтв} = 1.$$

Параметры эквивалентной передаточной функции модели цепи возбуждения

На рисунке 14 изображена схема передаточной функции модели цепи возбуждения.

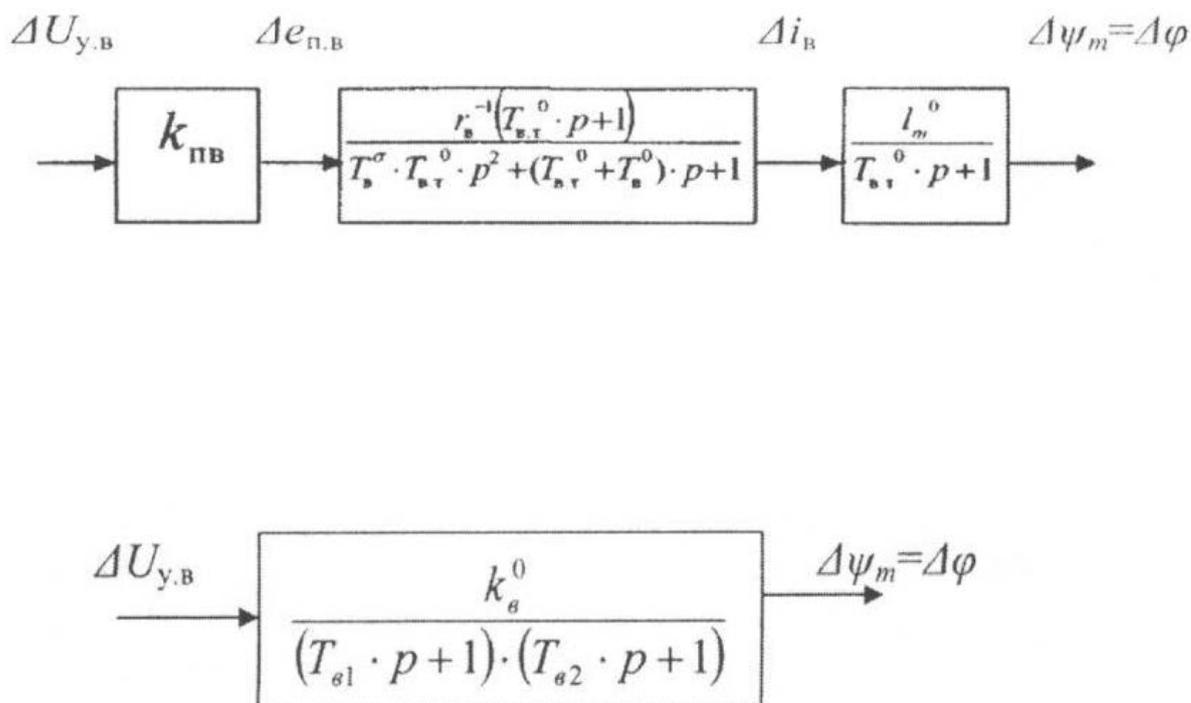


Рисунок 14 – Передаточная функция модели цепи возбуждения

Параметры:

$$T_{B1,2}^0 = \frac{T_1}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{T_1}{2}\right)^2 - T_2^2};$$

$$k_B^0 = \frac{k_{нв} * l_m^0}{r_B};$$

$$T_1 = (T_B^0 + T_{BT}^0);$$

$$T_2 = T_2^\sigma * T_{BT}^0.$$

1. При $\varphi^0 = 1$:

$$T_1 = 0,373 + 0,03 = 0,403 \text{ с};$$

$$T_2 = 0,175 * 0,373 = 0,065 \text{ с};$$

$$T_{B1}^0 = \frac{0,403}{2} + \sqrt{\left(\frac{0,403}{2}\right)^2 - 0,065^2} = 0,39 \text{ с};$$

$$T_{B2}^0 = \frac{0,403}{2} - \sqrt{\left(\frac{0,403}{2}\right)^2 - 0,065^2} = 0,01077 \text{ с};$$

$$k_{ДТВ}^0 = \frac{k_{нв} * l_m^0}{r_B};$$

$$k_{ДТВ}^0 = \frac{7,9 * 0,3}{1,614} = 1,468.$$

2. При $\varphi^0 = 0,45$:

$$T_1 = 1,535 + 0,136 = 1,671 \text{ с};$$

$$T_2 = 1,535 * 0,175 = 0,268 \text{ с};$$

$$T_{B1}^0 = \frac{1,671}{2} + \sqrt{\left(\frac{1,671}{2}\right)^2 - 0,268^2} = 1,627 \text{ с};$$

$$T_{B2}^0 = \frac{1,671}{2} - \sqrt{\left(\frac{1,671}{2}\right)^2 - 0,268^2} = 0,0044 \text{ с};$$

$$k_{ДТВ}^0 = \frac{k_{нв} * l_m^0}{r_B};$$

$$k_{ДТВ}^0 = \frac{7,9 * 1,4}{1,614} = 6,85.$$

Результаты расчета математической модели двухзонной системы автоматического управления электропривода приведены в таблице 3 для цепи якоря и в таблице 4 для цепи возбуждения.

Схема математической модели показана на рисунке 15.

Таблица 3 – Результаты расчета для цепи якоря

Цепь якоря	$k_{П}$	$r_{Э}$	$T_{Э}, \text{с}$	$T_{М}, \text{с}$	$T_{j}, \text{с}$	$k_{ДТ}$	$k_{ДС}$	$k_{ДЭ}$
$\varphi^0 = 1$	0,86	0,08	0,02	0,056	0,436	1	1	1
$\varphi^0 = 45$	-	-	-	0,278	-	-	-	-

Таблица 4 – Результаты расчета для цепи возбуждения

Цепь возбуждения	$T_B^0, \text{с}$	$T_B^\sigma, \text{с}$	$T_{B,T}^0, \text{с}$	$l_m^0, \text{с}$	$l_B^0, \text{с}$	r_B
$\varphi^0 = 1$	0,373	0,175	0,03	0,3	0,384	1,614
$\varphi^0 = 45$	1,535	-	0,136	1,4	1,58	-
Цепь возбуждения	$k_{ПВ}$	$k_{ДТВ}$	$T_{B1}^0, [\text{с}]$	$T_{B2}^0, [\text{с}]$	$k_{ДТВ}^0$	$r_{Э}$
$\varphi^0 = 1$	7,9	1	0,39	0,01077	1,468	10
$\varphi^0 = 45$	-	-	1,627	0,0044	6,85	-

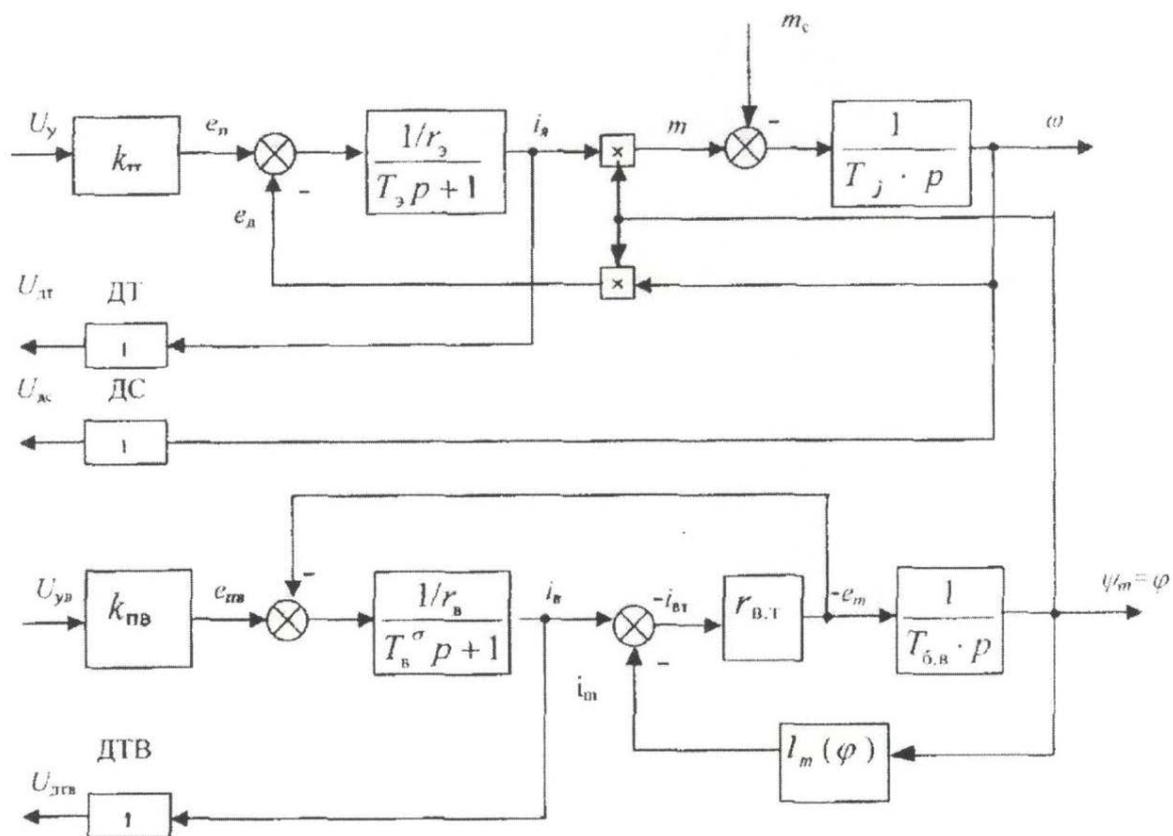


Рисунок 15 – Структурная схема математической модели электропривода

Математическая модель описывается уравнениями

Цепь якоря:

$$e_n = k_n * u_y;$$

$$e_n = e_d + r_{\Sigma} * i_{\Sigma} + l_{\Sigma} * \frac{di_{\Sigma}}{dt};$$

$$e_d = \varphi * \omega;$$

$$m = \varphi * i_{\Sigma};$$

$$m - m_c = T_j * \frac{d\omega}{dt}.$$

Цепь возбуждения:

$$e_{n.B} = k_{n.B} * u_{y.B};$$

$$e_{n.B} - e_m = r_B * i_B + r_B * T_B^{\sigma} * \frac{di_B}{dt};$$

$$i_m = i_B + i_{B.T};$$

$$\Psi_m = \Psi_m(i_m);$$

$$e_m = -T_{б.в} * \frac{d\Psi_m}{dt};$$

$$e_m = r_{в.т} * i_{в.т}.$$

3.3 Анализ характеристик датчиков информации

Датчик скорости

Выбираем в качестве датчика скорости импульсный преобразователь угловых перемещений ЛИР-158Ж-1-Т-001000-24-ПИ/5 фирмы «НИО-21»(рисунок 16).

1. Импульсный датчик - 1.
2. Количество импульсов на один оборот – 1000 импульсов/оборот.
3. Амплитуда импульса – 15 В.
4. Установка максимальной скорости при работе с импульсным датчиком – 400 об/мин.

Коэффициент передачи датчика скорости

$$K_{дс} = k_{дс} * \frac{U_{б.р}}{\Omega_б};$$

$$K_{дс} = 1 * \frac{7}{21} = 0,333 \text{ В/с.}$$

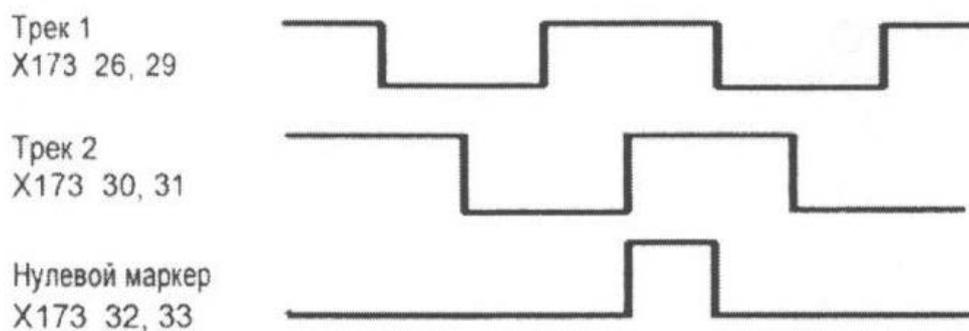


Рисунок 16 – Датчик с двумя импульсами, взаимно смещенными на 90° треками

Датчик тока

Данный датчик первичную информацию получает с шунта. Ток шунта выбирается с учетом возможной перегрузки двигателя.

Выбираем измерительный шунт 75ШСМ:

$$I_{\text{шN}} = 3000 \text{ А};$$

$$U_{\text{ш}} = 75 \text{ мВ}.$$

Коэффициент передачи датчика тока

$$K_{\text{дТ}} = k_{\text{дТ}} * \frac{U_{\text{в.р}}}{I};$$

$$K_{\text{дТ}} = 1 * \frac{7}{1795} = 0,004 \frac{\text{В}}{\text{А}};$$

$$K_{\text{дТ}} = K_{\text{ядТ}} * K_{\text{ш}},$$

где $K_{\text{ш}}$ – коэффициент шунта, В/А.

$$K_{\text{ш}} = \frac{U_{\text{ш}}}{I_{\text{шN}}};$$

$$K_{\text{ш}} = \frac{0,075}{3000} = 2,5 * 10^{-5} \text{ В/А};$$

$$K_{\text{ядТ}} = \frac{K_{\text{дТ}}}{K_{\text{ш}}};$$

$$K_{\text{ядТ}} = \frac{0,004}{2,5 * 10^{-5}} = 160 \text{ о. е.}$$

Датчик тока возбуждения

Данный датчик получает первичную информацию с шунта. Ток шунта выбирается по номинальному току возбуждения двигателя.

Выбираем измерительный шунт 75ШСМ:

$$I_{\text{шN}} = 40 \text{ А};$$

$$U_{\text{шN}} = 75 \text{ мВ}.$$

Коэффициент передачи тока возбуждения:

$$K_{\text{дТВ}} = k_{\text{дТВ}} * \frac{U_{\text{б.р}}}{I_{\text{б.в}}};$$

$$K_{ДТВ} = 1 * \frac{7}{55} = 0,127 \frac{В}{А};$$

$$K_{ДТ} = K_{ЯДТ} * K_{Ш},$$

где $K_{Ш}$ – коэффициент шунта, В/А.

$$K_{Ш} = \frac{U_{Ш}}{I_{ШN}};$$

$$K_{Ш} = \frac{0,075}{40} = 1,875 * 10^{-3} В/А;$$

$$K_{ЯДТ} = \frac{K_{ДТВ}}{K_{Ш}};$$

$$K_{ЯДТ} = \frac{0,127}{0,001875} = 67,733 \text{ о. е.}$$

Датчик напряжения

Данный датчик получает первичную информацию с делителя напряжения.

Схема подключения указана на рисунке 17.

Выходное напряжение датчика напряжения (ДН), соответствующее максимальному напряжению якоря

$$U_{ДН max} = U_{б.р} = 7 В.$$

Запас по напряжению преобразователя якорной цепи

$$\sigma_{\text{Э}} = \frac{E_{d0}}{E_{dN}} = 1,4.$$

Коэффициент передачи датчика напряжения в относительных единицах

$$K_{ДН} = 1.$$

Коэффициент делителя на входе ДН в о.е.

$$k_{ДЕЛ} = \frac{U_{ДН max}}{U_{б.р}} * \frac{1}{k_{ДН}} * \frac{1}{\sigma_{\text{Э}}};$$

$$k_{ДЕЛ} = \frac{7}{7} * \frac{1}{1} * \frac{1}{1,4} = 0,71.$$

Соотношение плеч делителя напряжения

$$R_2 = \frac{R_1 + R_3}{\left(\frac{U_6}{U_{6,p}}\right) * \left(\frac{1}{k_{ДЕЛ}}\right) - 1};$$

$$R_2 = \frac{R_1 + R_3}{\left(\frac{573}{7}\right) * \left(\frac{1}{0,71}\right) - 1} = 0,0087(R_1 + R_3).$$

Коэффициент передачи датчика напряжения

$$K_{ДН} = k_{ДН} * \frac{U_{6,p}}{U_6};$$

$$K_{ДН} = 1 * \frac{7}{573} = 0,0122 \text{ о. е.}$$

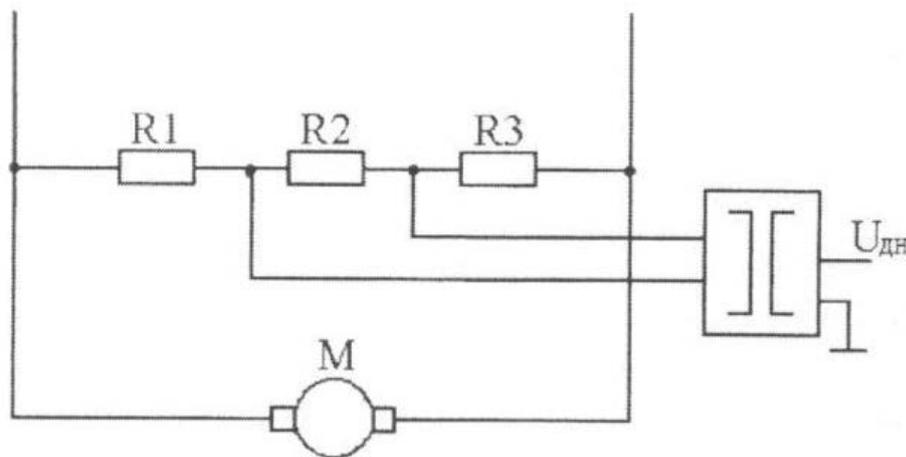


Рисунок 17 – Схема подключения датчика напряжения

3.4 Синтез передаточных функций регуляторов САР скорости

Системы управления могут выполняться с последовательной коррекцией или с параллельной коррекцией параметров. Преимущественное распространение получили системы, построенные на принципах подчиненного регулирования параметров с последовательной коррекцией. По этому принципу будем производить синтез регуляторов.

При использовании принципа подчиненного регулирования объект регулирования представляется в виде последовательно соединенных звеньев,

входными параметрами которых являются существенные координаты объекта, например, ток, напряжения, скорость.

Для управления каждой из этих координат организуется отдельный регулятор, образующий с объектом контур, замкнутый соответствующей обратной связью.

Регуляторы соединяются последовательно, так что выход одного является входом другого.

Регуляторы представляют собой корректирующее устройство, которое решает следующие задачи:

1. Своим действием регулятор компенсирует влияние звена объектарегулирования, который входит в контур с этим регулятором.
2. Регулятор обеспечивает астатизм контура по управляющему воздействию.
3. Регулятор обеспечивает оптимизацию процессов в контуре.

Свойства САР, построенной по принципу подчиненного регулирования, определяются некомпенсированной постоянной T_μ и зависят от числа контуров.

Синтез регулятора тока якоря

На рисунке 18 изображена математическая модель структурной схемы контура тока.

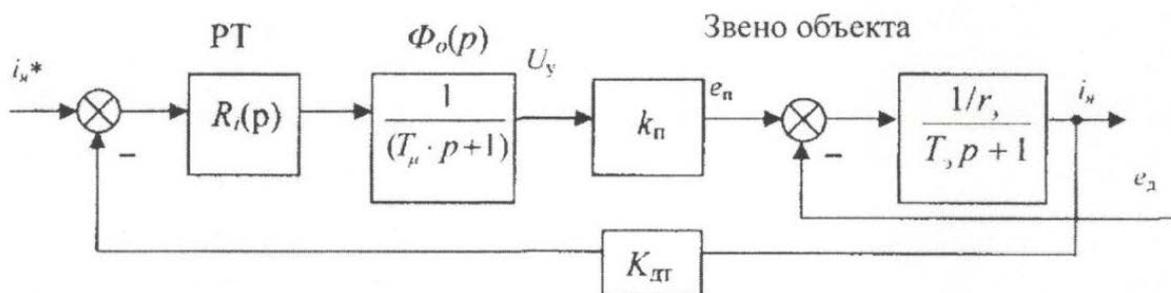


Рисунок 18 – Структурная схема контура тока

При синтезе регулятора тока пренебрегаем влиянием ЭДС вращения двигателя ($e_D = 0$).

Передаточная функция объекта регулирования:

$$W_i(p) = R_i(p) * \frac{1}{k_{\Pi}} = \frac{T_i * p}{r_{\Sigma} * (T_{\Sigma} * p + 1)};$$

$$W_i(p) = \frac{0,05 * p}{0,02 * p + 1}.$$

Передаточная функция регулятора тока

$$R_i(p) = W_i^{-1}(p) * \frac{1}{T_i * p} = \frac{T_{\Sigma} * p + 1}{\frac{k_{\Pi}}{r_{\Sigma} * T_i * p}},$$

где T_{μ} – некомпенсируемая постоянная времени фильтра, с.

Минимальная величина T_{μ} для преобразования с пульсностью $p=6$, обусловленная дискретностью преобразователя:

$$T_{\mu} = \frac{\pi}{p * \omega_c};$$

$$T_{\mu} = \frac{3,14}{6 * 314} = 0,00167 \text{ с.}$$

Принимаем $T_{\mu} = 0,002$ с.

$T_i = 2 * T_{\mu} = 2 * 0,002 = 0,004$ с. – настройка на модульный оптимум.

$$R_i(p) = \frac{0,02 * p + 1}{0,047 * p}.$$

«ПИ» – регулятор

$$R_i(p) = 1,3 + \frac{1}{0,047 * p}.$$

Передаточная функция разомкнутого контура

$$G_i(p) = R_i(p) * \Phi_0(p) * W_i(p) = \frac{1}{2 * T_{\mu} * p * (T_{\mu} * p + 1)}.$$

Передаточная функция замкнутого контура

$$\Phi_i(p) = \frac{G_i(p)}{1 + G_i(p)} = \frac{1}{2 * T_{\mu}^2 * p^2 + 2 * T_{\mu} * p + 1}.$$

Частота среза контура тока

$$\omega_{с.т} = \frac{1}{2 * T_{\mu}};$$

$$\omega_{с.т} = \frac{1}{2 * 0,002} = 250 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

Учет влияния ЭДС

Влияние ЭДС вращения двигателя приводит к существенным отклонениям процессов в электроприводе от номинальных. Одним из следствий влияния внутренней обратной связи по ЭДС является недоиспользование перегрузочной способности двигателя при пуске и торможении привода.

Если влиянием ЭДС пренебречь нельзя, то можно использовать принцип комбинированного регулирования, сочетающий в себе принцип регулирования по отклонению и принцип регулирования по возмущению. Для этого система регулирования тока дополняется компенсирующей связью.

ЭДС вращения двигателя оказывает влияние на систему автоматического регулирования, т.е. по отношению к заданию имеется установившаяся ошибка $\Delta i_{я\text{уст}}$, которая зависит от электромеханических свойств и быстродействия контура.

$$\delta i_{я\text{уст}} = \frac{T_i}{T_M + T_i} * i_{я\text{уст}}^*;$$

$$\delta i_{я\text{уст}} = \frac{0,004}{0,056 + 0,004} * 2 = 0,133 \text{ о. е.}$$

Ошибка составляет 27,6% поэтому необходимо ввести компенсирующий элемент в контур тока.

Передаточная функция звена коррекции

$$W_i(p) = R_i(p) * \frac{1}{k_{\Pi}} = \frac{T_i * p_i}{r_{\text{э}} * (T_{\text{э}} * p + 1)} = \frac{0,05 * p}{0,02 * p + 1}.$$

Ограничение производной тока якоря

Максимальная производная тока якоря не должна превышать допустимое значение

$$\left(\frac{di_{я}}{dt}\right)_{max} \leq \left(\frac{di_{я}}{dt}\right)_{доп}$$

Для двигателя П2-800-177-8

$$\left(\frac{di_{я}}{dt}\right)_{доп} = 200 \frac{1}{с}$$

Максимальное значение производной тока якоря:

$$\left(\frac{di_{я}}{dt}\right)_{max} = 0,32 * \frac{i_{я\text{уст}}}{T_{\mu}};$$

$$\left(\frac{di_{я}}{dt}\right)_{max} = 0,32 * \frac{2}{0,002} = 320 \frac{1}{с}$$

Условие не выполняется. Для уменьшения производной тока ставим задатчик интенсивности (нелинейное устройство, ограничивающее темп изменения во времени сигнала задания на входе САР скорости) перед регулятором скорости.

Параметром задатчика интенсивности является величина A , определяющая темп нарастания выходного сигнала ЗИ

$$A = \frac{\omega_3}{\tau_3},$$

где ω_3 – задание на скорость, о.е.; τ_3 – время разгона привода, с.

По тахограмме электропривода принимаем

$$\omega_3 = 0,886 \text{ о.е.};$$

$$\tau_3 = 1,11 \text{ с};$$

$$A = \frac{0,886}{1,11} = 0,8 \frac{1}{с}$$

Максимальное значение производной тока при работе с задатчиком интенсивности:

$$\left(\frac{di_{я}}{dt}\right)_{max} = 0,21 * \frac{A * T_j}{T_{\mu} * \varphi};$$

$$\left(\frac{di_{я}}{dt}\right)_{max} = 0,21 * \frac{0,8 * 0,436}{0,002 * 1} = 36,624 \frac{1}{с};$$

$$\left(\frac{di_{я}}{dt}\right)_{max} \leq \left(\frac{di_{я}}{dt}\right)_{доп} = 200 \frac{1}{с}$$

Критерий ограничения производной тока якоря выполняется.

Синтез регулятора скорости

Используется однократно-интегрирующая система автоматического регулирования скорости (рисунок 19).

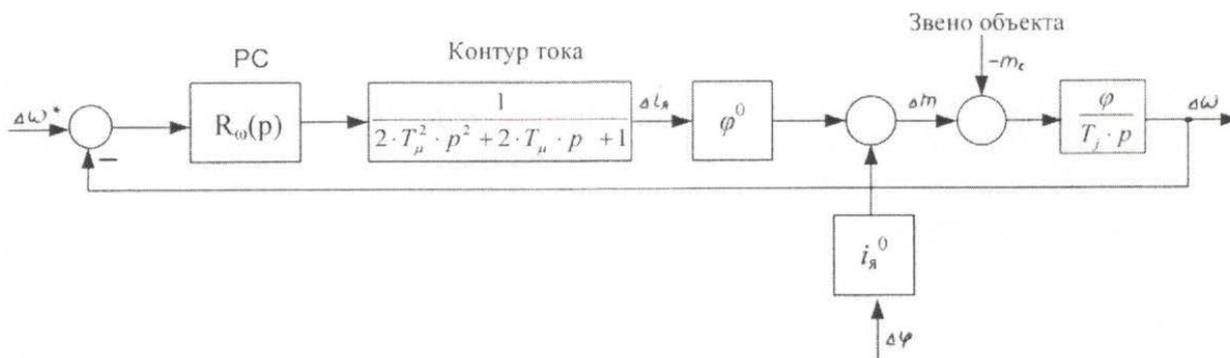


Рисунок 19 – Структурная схема контура скорости

Синтез ведется при $m_c = 0$ и $\delta_\varphi = 0$.

Передаточная функция объекта регулирования

$$W_\omega = \frac{\varphi}{T_j * p}$$

Передаточная функция регулятора скорости

$$R_\omega(p) = W_\omega(p)^{-1} = \frac{1}{T_\omega * p} = \frac{T_j}{T_\omega * \varphi},$$

где $T_\omega = 4 * T_\mu = 4 * 0,002 = 0,008$ с – настройка на модульный оптимум.

«ПИ» – регулятор

$$R_\omega(p) = \frac{0,436}{0,008} = 54,5.$$

Передаточная функция разомкнутого контура

$$G_\omega(p) = R_\omega(p) * \Phi_i(p) * W_\omega(p) = \frac{1}{4 * T_\mu * p * (2 * T_\mu^2 * p^2 + 2 * T_\mu * p + 1)}.$$

Передаточная функция замкнутого контура

$$\Phi_{\omega^*}^\omega = \frac{G_\omega(p)}{1 + G_\omega(p)} = \frac{1}{16 * T_\mu^3 * p^3 + 8 * T_\mu^2 * p^2 + 4 * T_\mu * p + 1}.$$

Частота среза контура скорости:

$$\omega_{\text{сск}} = \frac{1}{4 * T_{\mu}};$$

$$\omega_{\text{сск}} = \frac{1}{4 * 0,002} = 125 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

Для сохранения оптимальной настройки САР коэффициент усиления регулятора скорости должен изменяться обратно пропорционально величине потока. Поэтому в структуре регулятора скорости целесообразно выделить усилительное звено с постоянными параметрами и длительное звено с переменным параметром φ^0 . Таким образом блок деления в структуре регулятора компенсирует влияние изменения параметра φ^0 звена объекта при работе двигателя с различными значениями магнитного потока. В результате нормируются характеристики САР скорости в системе двухзонного регулирования независимо от уровня ослабления поля.

Синтез регулятора магнитного потока

Для синтеза используется эквивалентное представление объекта регулирования.

Математическая модель структурной схемы контура магнитного потока представлена на рисунке 20.

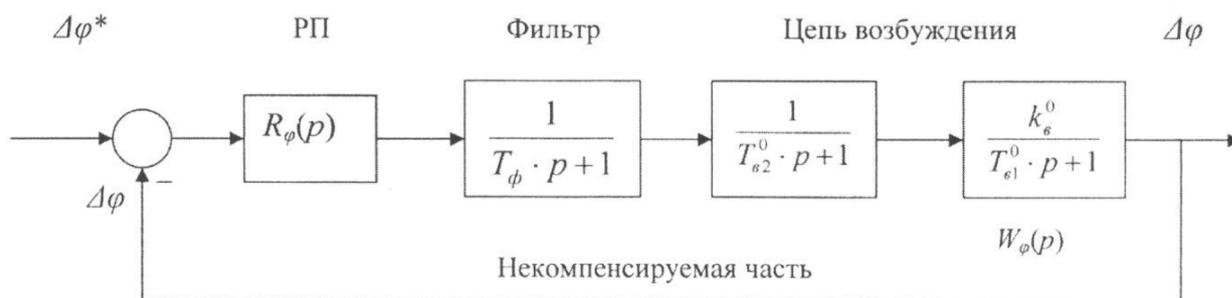


Рисунок 20 – Структурная схема контура магнитного потока

Здесь модель цепи возбуждения представлена в виде двух апериодических звеньев

$$W_{\varphi}(p) = \frac{1}{T_{B1}^0 * p + 1} * \frac{1}{T_{B2}^0 * p + 1}.$$

Но анализ показывает, что $T_{B1}^0 \gg T_{B2}^0$, поэтому в качестве некомпенсированной части принимается совокупность введенного внешнего фильтра и внутреннего фильтра объекта с малой постоянной времени:

$$\Phi_0(p) = \frac{1}{T_{\phi} * p + 1} * \frac{1}{T_{B2} * p + 1};$$

$$W_{\phi}(p) = \frac{k_B^0}{T_{B1}^0 * p + 1}.$$

Передаточная функция регулятора магнитного потока

$$R_{\varphi}(p) = W_{\varphi}^{-1}(p) * \frac{1}{T_{\varphi} * p} = \frac{T_{B1}^0 * p + 1}{k_B^0 * T_{\varphi} * p},$$

где $T_{\varphi} = 2 * T_{\mu B}$ – настройка на модульный оптимум.

$$T_{\mu B} = T_{\varphi} + T_{B2} = 0,002 + 0,01077 = 0,01277 \text{ с.}$$

Принимаем $T_{\mu B} = 0,005 \text{ с.}$

$$T_{\varphi} = 2 * 0,005 = 0,01 \text{ с;}$$

$$k_B^0 = 1,468;$$

$$R_{\varphi}(p) = \frac{0,39 * p + 1}{1,468 * 0,01 * p} = \frac{0,39 * p + 1}{0,01468 * p}.$$

«ПИ» – регулятор

$$R_{\varphi}(p) = 25,5 + \frac{1}{0,01468 * p}.$$

Передаточная функция разомкнутого контура магнитного потока

$$G_{\varphi}(p) = \frac{1}{2 * T_{\mu B} * p * (T_{\mu B} * p + 1)}.$$

Передаточная функция замкнутого контура магнитного потока

$$\Phi_{\varphi}(p) = \frac{G_{\varphi}(p)}{1 + G_{\varphi}(p)} = \frac{1}{2 * T_{\mu B}^2 * p^2 + 2 * T_{\mu B} * p + 1}.$$

Частота среза контура магнитного потока:

$$\omega_{с м} = \frac{1}{2 * T_{\mu B}};$$

$$\omega_{с м} = \frac{1}{2 * 0,005} = 100 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

Синтез регулятора электродвижущей силы

Для исключения операции дифференцирования тока (так как в системах подчиненного регулирования в качестве датчиков ЭДС используются вычислители, функционирующие на основе изменения напряжения и тока якоря двигателя) в структуру вычислителя аperiodический фильтр с постоянной времени

$$T_{дэ} = T_{яд}.$$

Структурной схема контура ЭДС указана на рисунке 21.

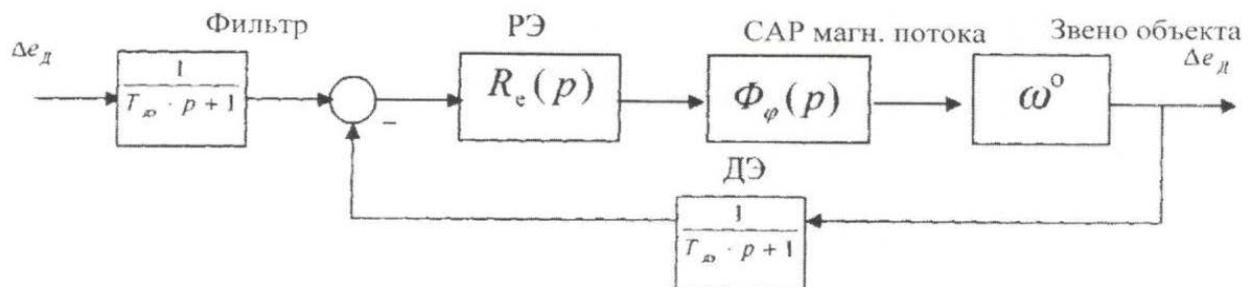


Рисунок 21 – Структурная схема контура ЭДС

Синтез регулятора ЭДС производим с учетом инерционности датчика ЭДС.

Способ измерения ЭДС двигателя:

$$U_{я} = e_d + r_{я\Sigma} * i_{я} + r_{я\Sigma} * T_{яд} * \frac{di_{я}}{dt};$$

$$e_d = U_{я} - r_{я\Sigma} * (1 + T_{я} * p) * i_{я};$$

$$\frac{e_d}{T_{дэ} * p + 1} = \frac{U_{я}}{T_{дэ} * p + 1} - \frac{r_{я\Sigma} * (1 + T_{я} * p) * i_{я}}{T_{дэ} * p + 1}.$$

Сигнал датчика ЭДС

$$U_{дэ} = \frac{1}{T_{дэ} * p + 1} * e_{д}.$$

Передаточная функция инерционности датчика ЭДС

$$W_{дэ}(p) = \frac{1}{T_{дэ} * p + 1}.$$

Передаточная функция объекта регулирования

$$W_e(p) = \omega^0.$$

Передаточная функция регулятора ЭДС

$$R_e(p) = [W_e(p) * W_{дэ}(p)]^{-1} * \frac{1}{T_e * p} = \frac{T_{дэ} * p + 1}{\omega^0 * T_e * p}.$$

Принимаем

$$T_{дэ} = T_{яд} = 0,025 \text{ с};$$

$$T_e = 2 * (T_{дэ} + T_{\varphi});$$

$$T_e = 2 * (0,056 + 0,01) = 0,132 \text{ с};$$

$$R_e(p) = \frac{0,056 * p + 1}{1 * 0,132 * p} = \frac{0,056 * p + 1}{0,132 * p}.$$

«ПИ» – регулятор

$$R_e(p) = 0,424 \frac{1}{0,132 * p}.$$

Частота среза контура ЭДС:

$$\omega_{сэ} = \frac{1}{4 * T_{\mu B}};$$

$$\omega_{сэ} = \frac{1}{4 * 0,005} = 50 \text{ рад/с}.$$

В структуре регулятора ЭДС целесообразно выделить интегрирующее звено с постоянным параметром T_e и делительное звено с переменным параметром ω^0 . Блок деления в структуре регулятора компенсирует влияние изменения скорости на характеристики контура ЭДС.

4. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ РАБОТЫ

4.1 Обоснование выбранного варианта

В данной работе рассмотрена модернизация главного привода автоматического стана ТПУ 140.

В работе предлагается заменить устройство СИФУ существующего тиристорного преобразователя с аналоговой системой управления КТЭУ-2500/2500-750-УХЛ4 с двухзонной системой регулирования скорости, реализованной на элементной базе УБСР-АИ на микропроцессорное устройство управления Simoneg DC-Master фирмы Siemens (Германия).

Экономическая эффективность в применении данного оборудования состоит прежде всего в увеличении производительности механизма за счет уменьшения простоев, повышения быстродействия. Также ожидается снижение расходов на обслуживание связи с высокой надежностью и долговечностью новой системы. И по проведенным исследованиям это дает дополнительный доход в размере 405000 руб./год.

Микроконтроллер системы автоматизации и система управления преобразователя имеют меньшие массогабаритные показатели и потребляют меньше электроэнергии, что соответственно экономит расходы.

4.2 Капитальные вложения

Рассмотрим необходимые капитальные вложения на установку оборудования. Расчеты будем производить только для тех статей расходов, которые различны для существующего оборудования и проектируемого.

Капитальные вложения содержат следующие составляющие:

- затраты на приобретение оборудования (K_{OB});
- транспортные расходы (K_{TP});
- затраты на монтаж и наладку оборудования (K_M).

Суммарные капитальные вложения

$$K = K_{\text{ОБ}} + K_{\text{ТР}} + K_{\text{М}}$$

I. Проектируемое оборудование.

1. Микропроцессорное устройство SimoregDC-Master.

Стоимость устройства + программное обеспечение (цена указана с учетом НДС)

$$K_{\text{ОБ}} = 480000 \text{ руб.}$$

Транспортные расходы принимаются в размере 10% от его стоимости (по данным службы маркетинга ФГУП «НПОА»), они составят:

$$K_{\text{ТР}} = 0,1 * K_{\text{ОБ}};$$

$$K_{\text{ТР}} = 0,1 * 480000 = 48000 \text{ руб.}$$

Затраты на монтаж оборудования принимаются в размере 30% от его стоимости (по данным службы маркетинга ФГУП «НПОА»), они составят:

$$K_{\text{М}} = 0,3 * K_{\text{ОБ}};$$

$$K_{\text{М}} = 0,3 * 480000 = 144000 \text{ руб.}$$

Капитальные вложения на установку микропроцессорного устройства

$$K_{\text{МУ}} = 480000 + 48000 + 144000 = 672000 \text{ руб.}$$

2. Импульсный датчик скорости ЛИР-158 фирмы «НИО-21».

Стоимость датчика (цена указана с учетом НДС)

$$K_{\text{ОБ}} = 10000 \text{ руб.}$$

Транспортные расходы составят:

$$K_{\text{ТР}} = 0,1 * K_{\text{ОБ}};$$

$$K_{\text{ТР}} = 0,1 * 10000 = 1000 \text{ руб.}$$

Расходы на монтаж и наладку:

$$K_{\text{М}} = 0,3 * K_{\text{ОБ}};$$

$$K_{\text{М}} = 0,3 * 10000 = 3000 \text{ руб.}$$

Капитальные вложения на установку датчика скорости

$$K_{\text{ДС}} = 10000 + 1000 + 3000 = 14000 \text{ руб.}$$

Суммарные капитальные вложения в проектируемый вариант

$$K_{\text{проект}} = K_{\text{МУ}} + K_{\text{ДС}} = 672000 + 14000 = 686000 \text{ руб.}$$

4.3 Эксплуатационные расходы

Суммарные эксплуатационные затраты

$$C = A + P,$$

где A – амортизационные отчисления, руб./год;

P – затраты на ремонт оборудования, руб./год.

$$A = K * N_A,$$

где K – стоимость оборудования, руб.;

N_A – норма годовых амортизационных расходов, 1/год.

Определяется обратная величина сроку службы оборудования

$$P = T_c * Z_{\text{осн}} * K_{\text{доп}} * K_{\text{соц}} * K_p,$$

где T_c – количество нормо-часов, необходимых для выполнения работ, н/ч (определяется по данным ФГУП «НПОА»);

$Z_{\text{осн}}$ – часовая тарифная ставка рабочего, выполняющего ремонт, руб/ч (определяется по данным ФГУП «НПОА»);

$K_{\text{доп}}$ – дополнительная зарплата на ремонт, включая налоги и премии, о.е.;

$K_{\text{соц}}$ – единый социальный налог, о.е.;

K_p – районный коэффициент, о.е.

II. Существующее оборудование.

1. Аналоговое устройство управления.

Амортизационные отчисления (исходя из срока службы 7 лет, по паспортным данным)

$$A = 0,14 * 190000 = 26600 \text{ руб.}$$

Затраты на ремонт:

$$T_c = 140 \text{ н/ч ;}$$

$Z_{\text{осн}} = 172,2$ руб/ч. (соответствует 6 разряду рабочего из бригады технологической автоматики);

$$K_{\text{доп}} = 1,55;$$

$$K_{\text{соц}} = 1,3;$$

$$K_p = 1,15;$$

$$P = 140 * 172,2 * 1,55 * 1,3 * 1,15 = 55864,26 \text{ руб.}$$

Эксплуатационные расходы аналогового устройства

$$C_{\text{АУ}} = 26600 + 55864,26 = 82464,26 \text{ руб.}$$

2. Тахогенератор.

Амортизационные расходы (исходя из срока службы 5 лет, по паспортным данным)

$$A = 0,2 * 16000 = 3200 \text{ руб.}$$

Затраты на ремонт:

$$T_c = 120 \text{ н/ч};$$

$Z_{\text{осн}} = 172,2$ руб/ч. (соответствует 6 разряду рабочего из бригады технологической автоматики);

$$K_{\text{доп}} = 1,55;$$

$$K_{\text{соц}} = 1,3;$$

$$K_p = 1,15;$$

$$P = 120 * 172,2 * 1,55 * 1,3 * 1,15 = 47883,65 \text{ руб.}$$

Эксплуатационные расходы тахогенератора

$$C_{\text{ТГ}} = 3200 + 47883,65 = 51083,65 \text{ руб.}$$

Суммарные эксплуатационные расходы базового варианта:

$$C_{\text{баз}} = C_{\text{АУ}} + C_{\text{ТГ}};$$

$$C_{\text{баз}} = 82464,26 + 51083,65 = 133547,91 \text{ руб.}$$

III. Проектируемое оборудование.

1. Микропроцессорное устройство

Амортизационные расходы (исходя из срока службы 10 лет, по паспортным данным)

$$A = 0,1 * 480000 = 48000 \text{ руб.}$$

Затраты на ремонт:

$$T_c = 60 \text{ н/ч ;}$$

$$Z_{\text{осн}} = 172,2 \text{ руб/ч. (соответствует 6 разряду рабочего из}$$

бригады технологической автоматики);

$$K_{\text{доп}} = 1,55;$$

$$K_{\text{соц}} = 1,3;$$

$$K_p = 1,15;$$

$$P = 60 * 172,2 * 1,55 * 1,3 * 1,15 = 23941,83 \text{ руб.}$$

Эксплуатационные расходы микропроцессорного устройства

$$C_{\text{му}} = 48000 + 23941,83 = 71941,83 \text{ руб.}$$

2. Импульсный датчик скорости

Амортизационные расходы (исходя из срока службы 10 лет, по паспортным данным)

$$A = 0,1 * 10000 = 1000 \text{ руб.}$$

Затраты на ремонт:

$$T_c = 60 \text{ н/ч ;}$$

$$Z_{\text{осн}} = 172,2 \text{ руб/ч. (соответствует 6 разряду рабочего из}$$

бригады технологической автоматики);

$$K_{\text{доп}} = 1,55;$$

$$K_{\text{соц}} = 1,3;$$

$$K_p = 1,15;$$

$$P = 60 * 172,2 * 1,55 * 1,3 * 1,15 = 23941,83 \text{ руб.}$$

Эксплуатационные расходы тахогенератора:

$$C_{\text{дс}} = 1000 + 23941,83 = 24941,83 \text{ руб;}$$

$$C_{\text{проект}} = C_{\text{му}} + C_{\text{дс}};$$

$$C_{\text{проект}} = 71941,83 + 24941,83 = 96883,66 \text{ руб.}$$

4.4 Расчет экономической эффективности

Для анализа экономического эффекта от внедрения нового оборудования произведен расчет срока окупаемости дополнительных капитальных вложений по капиталоемкому варианту.

Срок окупаемости показывает период, в течение которого окупятся дополнительные капитальные вложения по капиталоемкому варианту за счет экономии на себестоимости (прибыли), полученной за счет этих капитальных вложений

$$T_{ок} = \frac{K_{доп}}{\varepsilon},$$

где $K_{доп}$ – дополнительные капитальные вложения, руб.;

ε – эффект от внедрения новой системы, руб./год.

Нормативный срок окупаемости

$$T_{н} = 3г.$$

Условие оптимальности капиталоемкого варианта

$$T_{ок} < T_{н}.$$

По сравнению с проектируемой системой существующая имеет меньшую производительность. Следующие показатели потерь берутся в соответствии с исследованиями «Первоуральского Новотрубного завода»:

1. Потери от низкой производительности автоматического стана оставляют 130000 руб./год.

2. Потери от незапланированных простоев и сбоев работы составляют 90000 руб./год.

3. Потери, связанные с сокращенным годовым фондом времени работы оборудования, обусловленным увеличением количества планово-предупредительных ремонтов, составляют 110000 руб./год.

4. Потери, обусловленные более низким качеством продукции и перерасходом материалов, составляют 75000 руб./год.

Суммарные потери

$$C_n = 130000 + 90000 + 110000 + 75000 = 405000 \text{ руб/год.}$$

Эффект от внедрения новой системы, обусловленный снижением эксплуатационных расходов и увеличением производительности:

$$\mathcal{E} = C_n + C_{\text{баз}} - C_{\text{проект}};$$

$$\mathcal{E} = 405000 + 133547,91 - 96883,66 = 441664,25 \text{ руб.}$$

Срок окупаемости:

$$T_{\text{ок}} = \frac{K_{\text{проект}}}{\mathcal{E}};$$

$$T_{\text{ок}} = \frac{686000}{441664,25} = 1,55 \text{ г} \approx 2 \text{ г};$$

$$T_{\text{ок}} = 2 \text{ г.} < T_{\text{н}} = 3 \text{ г.}$$

Следовательно, данную систему целесообразно установить.

Данные расчетов сведены в таблицу 5.

Таблица 5 – Техничко-экономические показатели

Наименование показателей	Единицы измерения	Базовый вариант	Проектируемый вариант
I. Капитальные вложения			
Стоимость оборудования	руб.	-	490000
Транспортные расходы	руб.	-	49000
Монтаж и наладка	руб.	-	147000
Суммарные капитальные вложения	руб.	-	686000
II. Эксплуатационные расходы			
Амортизационные отчисления	руб.	29800	49000
Ремонт и обслуживание	руб.	103747,91	47883,66
Суммарные эксплуатационные расходы	руб.	133547,91	96883,66
III. Потери производительности и качества			
От низкой производительности	руб.	130000	-
От незапланированных простоев	руб.	90000	-
От сокращенного годового фонда времени работы оборудования	руб.	110000	-
От перерасхода материалов и низкого качества продукции	руб.	75000	-
Суммарные потери	руб.	405000	-
IV. Эффект от внедрения новой системы	руб.		441664,25
V. Срок окупаемости	год		2

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При разработке выпускной квалификационной работы были изучены вопросы технологии производства горячекатанных труб на трубопрокатной установке 140. Был рассмотрен подробный план расположения оборудования который в дальнейшем был указан в приложениях. Был рассмотрен участок автоматического стана, конструкция стана, его основные технические данные и представлена его кинематическая схема. Это позволило подобрать электропривод с учетом всех требований к главному приводу автоматического стана, произвести проверку на нагрев и на перегрузочную способность при прокате самой энергоемкой трубы, и вследствие построена нагрузочная диаграмма с тахограммой. Силовая часть в составе силового трансформатора, реверсивных трехфазных мостовых тиристорных выпрямителей, сглаживающего дросселя, выключателя и силового разъединителя была сохранена от существующего комплексного тиристорного электропривода. Была разработана система автоматического регулирования скорости.

При выборе типа электропривода и разработке системы управления учитывались современные методы построения систем автоматического управления.

Устройство СИФУ существующего комплексного тиристорного электропривода с аналоговой системой управления КТЭУ-2500/2500-750-УХЛ4 с двухзонной системой регулирования скорости, реализованной на элементной базе УБСР-АИ заменено на микропроцессорное устройство управления SimoregDC-Master фирмы Siemens (Германия), превосходящее по своим показателям устройство, установленное ранее.

Для удобства настройки автоматического стана при переходе с одного сортамента труб на другой и на случай аварийной ситуации, когда необходимо быстро изменить направление вращения двигателя, в проекте

предусмотрен реверс, который осуществляется тиристорным преобразователем в цепи якоря.

Также произведено технико-экономическое обоснование работы, в котором доказан положительный экономический эффект от модернизации электропривода, путем замены аналоговой системы управления с двухзонной системой регулирования скорости на микропроцессорное устройство. Это позволило сократить расходы примерно на 405 тысяч рублей в год и также сэкономить на обслуживании старой системы.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Управление электроприводами» [Текст]: Учебное пособие для вузов./Башарин А.В., Новиков В.А., Соколовский Г.Г., – СПб.: Издательство «Энергоатомиздат», 2011. – 392с.
2. Производство горячекатанных труб» [Текст]: Учебное пособие для студентов СПО/Головкин Р.В., – Тюмень: Издательство «Металлургия», 1984. – 262с.
3. Расчет таблиц и усилий прокатки [Текст]: Учеб.-метод. пособие./Гончарук А.В., Стоппе Е.В., Осадчий В.А.; Московский гос. ин-т стали и сплавов, каф. инновационного проектирования. – М.: Издательство «Учеба», 2013. – 78с.
4. Проектирование и расчет приводов технологического и транспортного оборудования: Методические указания по курсовому и дипломному проектированию/Грубе Н.А., Яковлев Г.И., Бочарова Т.Г., – Тольятти: Издательство «Ника», 2013. – 82с.
5. Горячая прокатка и прессование труб. Изд. 3-е, переработанное и доп./Данилов А.Ф., Глейберг А.З., Балакин В.Г., – М.: Издательство «Металлургия», 1994. - 576с.
6. Новое обоснование в проектировании нажимных механизмов рабочих клеток прокатных станов [Текст]: Metallургическая и горнорудная промышленность/ Данько, Н.А., – СПб.: Издательство «Лениздат», 2014. – 86с.
7. Двигатели постоянного тока для автоматизированного электропривода: Учебное пособие /Заборщикова А.В., Мельников В.И. – СПб.: Петербургский гос. университет путей и сообщения, 2011. – 84с.
8. Экономика, организация и управление предприятием: Учебное пособие. – 2-е издание, /Зайцев Н.Л. – М.: ИНФА-М, 2008. – 455с.

9. Математическое моделирование тиристорного электропривода с переключающейся структурой: Журнал «Известия вузов». Карандаев А.С. Издательство «Электромеханика». – 2011. – 53с.

10. Теория электропривода [Текст]: Учеб. для вузов. – 2-е изд. перераб. и доп./Ключев В.И. – Краснодар: Издательство «Энергоатомиздат», 2013. – 704 с.

11. Повышение производительности прокатных станов: учебное пособие для студентов СПО/Литовчепко Н.В., Диомидов Б.Б., – М.: Издательство «Металлургия», 1993. – 370с.

12. Исследование зазоров в линии привода рабочих валков автоматического стана трубoproкатного агрегата [Текст] Металлургическая и горнорудная промышленность/ Рахманов, С.Р., – СПб.: Издательство «Лениздат», 2014. – 83с.

13. Пути совершенствования непрерывной прокатки труб [Текст]. Металлургическая и горнорудная промышленность./Сергеев В.В., – СПб.: Издательство «Лениздат», 2016. 45с.

14. Энергетические и кинематические расчеты привода: Задания и методические указания к курсовому проектированию/ Сметанин А.С., Дундин Н.И., Костылева Н.Н. – Архангельск: РИО АЛТИ, 1990. – 32с.

15. Трубопрокатные агрегаты с автомат-станом [Текст]: Основное прокатное оборудование горячего передела / П. М. Соловейчик. – М.: Издательство «Металлургия», 1996. – 160с.

16. Новое оборудование для производства бесшовных труб: Учебное пособие для студентов ВПО/ Б. И. Тартаковский, – Челябинск: Издательство «Сталь», 2012. – 82с.

17. Совершенствование математической модели расчета энергосиловых параметров ТПУ140 [Текст] / Уткин Ю. Н., – Челябинск: Издательство «Сталь», 2007. – 80с.

18. Электрооборудование прокатных и трубных цехов /Фотиев М.М. – М.: Издательство «Металлургия», 1993. – 256с.

19. Расчетное и экспериментальное обоснование модернизации узлов крепления рабочей клетки автомат-стана ТПУ-140 [Текст]: Ремонт, восстановление, модернизация/ Чечулин Ю. Б. – Новосибирск: Издательство «Наука», 2011. – 105с.

20. Технология и производство проката. Изд. 4-е, дополненное/ Шефтель Н.И. – М.:Издательство «Металлургия», 1989. - 462с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

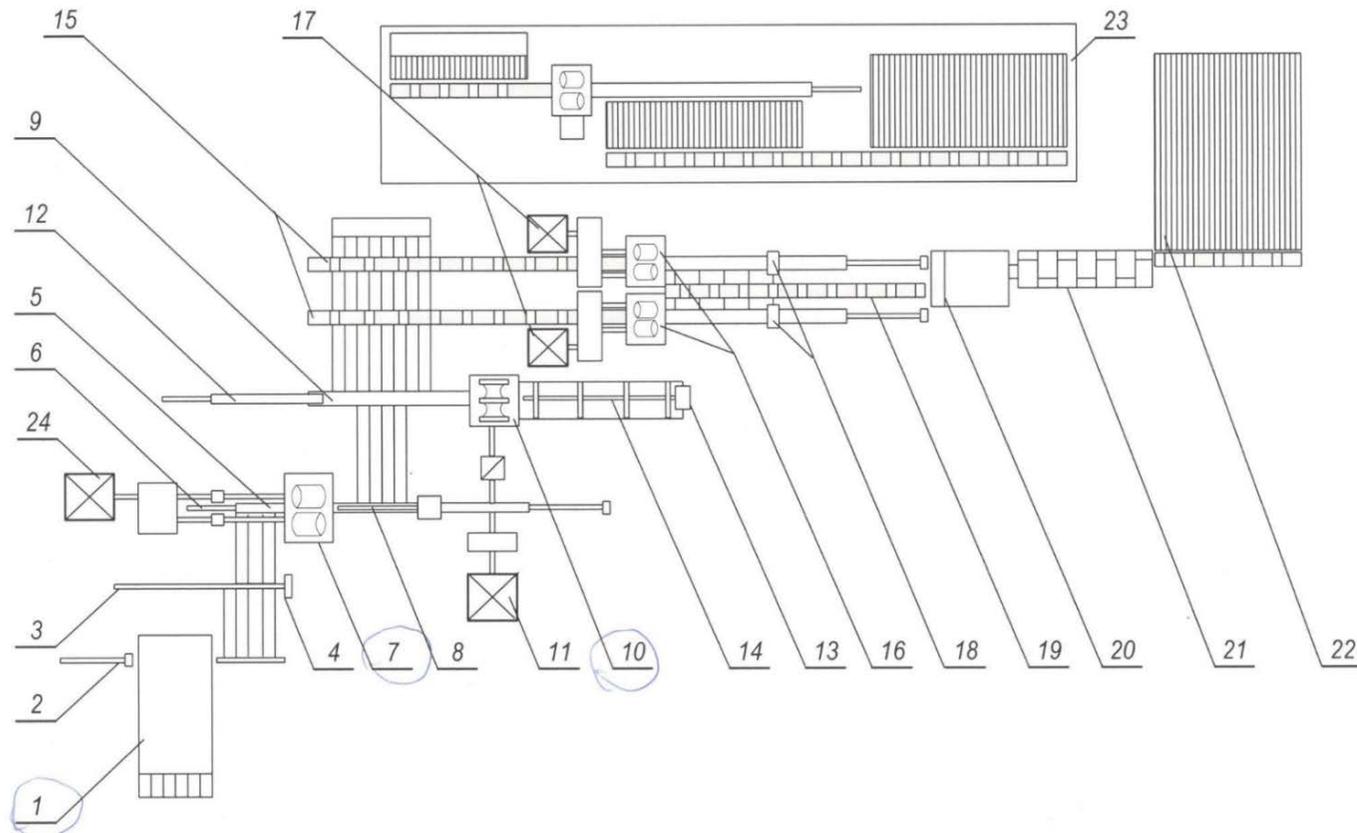
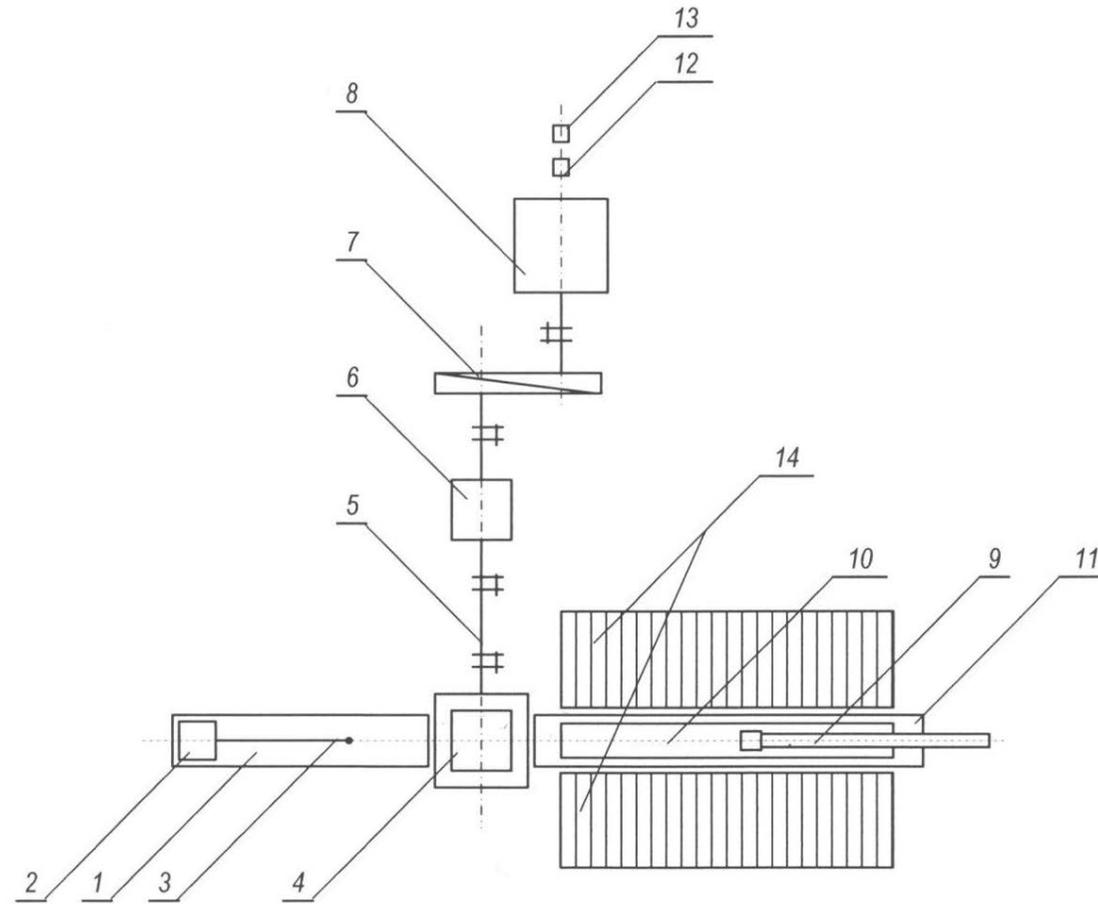


Схема расположения оборудования ТПУ 140

1 – методическая печь с наклонным ходом; 2 – фрикционный выталкиватель; 3 – промежуточный рольганг; 4 – пневматический зацентровщик; 5 – вводной желоб; 6 – пневматический толкатель; 7 – рабочая клеть прошивного стана; 8 – прокатный стержень; 9 – приемный желоб; 10 – рабочая клеть автоматического стана; 11 – главный привод автоматического стана; 12 – длинноходовый пневматический выталкиватель; 13 – упор; 14 – стержень; 15 – вводной рольганг; 16 – рабочая клеть обкатного стана; 17 – главный привод обкатного стана; 18 – упорный подшипник; 19 – общий отводный рольганг; 20 – методическая печь с шагающим ходом; 21 – калибровочный стан; 22 – охлаждающий стол; 23 – участок холодной отделки труб; 24 – главный привод прошивного стана.

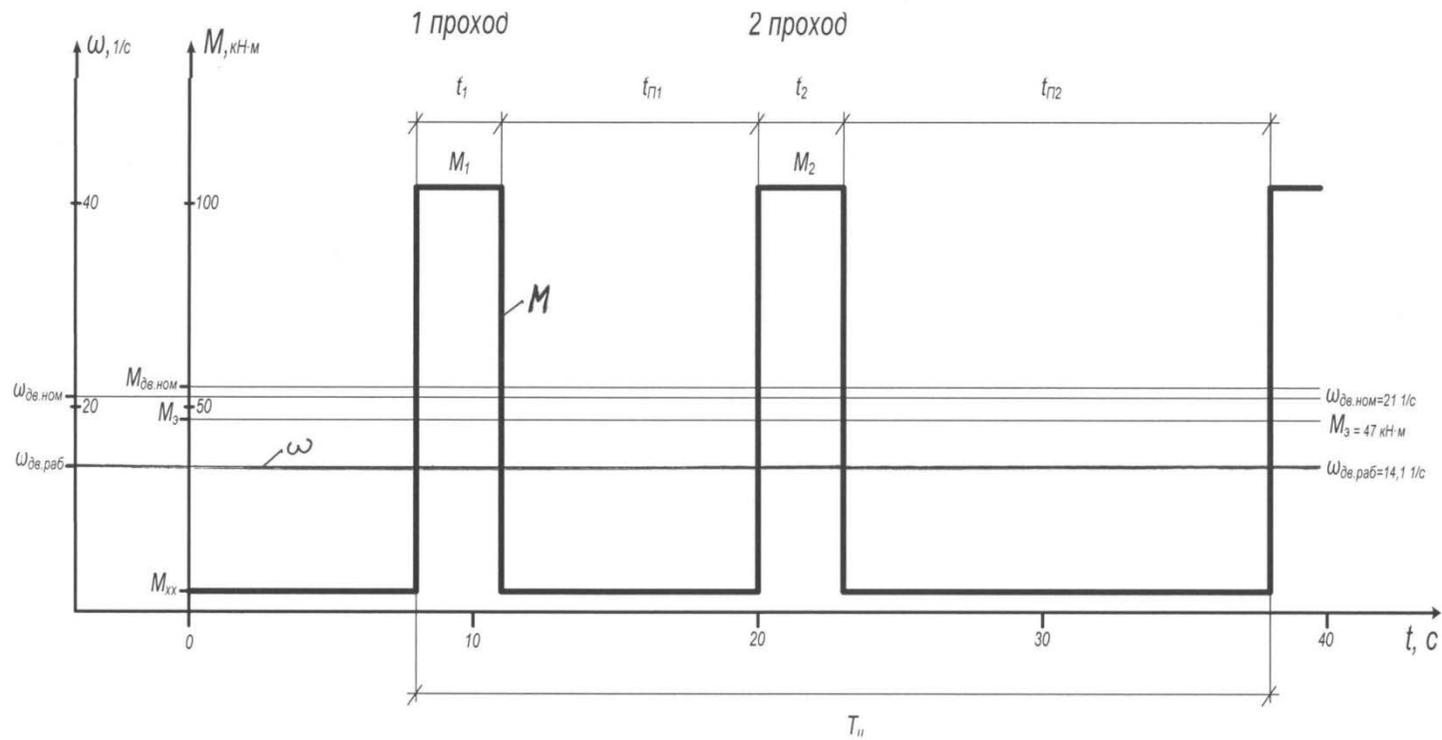
ПРИЛОЖЕНИЕ Б



Кинематическая схема привода автоматического стана

1 – задний стол; 2 – упорная станина; 3 – стержень оправки; 4 – рабочая клеть; 5 – шпиндель; 6 – шестеренная клеть; 7 – редуктор; 8 – двигатель главного привода; 9 – пневматический вталкиватель гильзы; 10 – пневматический желоб; 11 – передний стол; 12 – тахогенератор; 13 – центробежное реле; 14 – наклонные столы подачи и отвода гильзы

ПРИЛОЖЕНИЕ В



Нагрузочная диаграмма двигателя за цикл проката одной трубы

