

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 ПРОШИВНОГО СТАНА ТРУБОПРОКАТНОГО АГРЕГАТА

Пояснительная записка к дипломной работе по специальности  
050501.65 Профессиональное обучение

Идентификационный код ВКР:

Исполнитель:  
студент группы ЭС-401

Е. А. Пургина

Руководитель:

В.П. Чудновский

Нормоконтролер:  
ст. преподаватель

Т.В. Лискова

Екатеринбург 2016

## РЕФЕРАТ

Дипломная работа выполнена на 58 страницах; содержит 18 рисунков, 9 таблиц, 14 источников литературы, а также 4 приложения на 4 страницах.

Ключевые слова: ЭЛЕКТРОПРИВОД, СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ, ПРОШИВНОЙ СТАН, ТРУБОПРОКАТНЫЙ АГРЕГАТ (ТПА).

*Объектом исследования* является электрооборудование прошивного стана (ТПА 30-102).

*Предметом исследования* является главный электропривод прошивного стана.

*Цель работы:* выполнить модернизацию главного электропривода прошивного стана (ТПА).

В процессе работы проведен анализ текущего состояния главного электропривода прошивного стана (ТПА) и предложена программа модернизации его на современной элементной базе.

Основные конструктивные и технико-эксплуатационные показатели: современный электропривод реализован на базе микропроцессорной техники, что повышает его экономичность и безопасность.

Степень внедрения – модернизированная система главного электропривода успешно прошла стендовые испытания и рекомендована к опытной эксплуатации.

Эффективность модернизированной системы главного электропривода прошивного стана (ТПА) была доказана с экономической точки зрения и показана её эффективность.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1.ОПИСАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА	
1.1. Технология работы прошивного стана.....	7
1.2. Технология работы трубопрокатного агрегата.....	7
2.ВЫБОР ТИПА ЭЛЕКТРОПРИВОДА, ДВИГАТЕЛЯ СИЛОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ	
2.1. Требования к электроприводу.....	12
2.2. Выбор системы электропривода.....	13
2.3. Предварительный выбор электродвигателя.....	14
2.4. Выбор тиристорного преобразователя.....	19
3.РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ	
3.1. Выбор системы автоматического регулирования.....	25
3.2. Расчёт модели силовой части.....	26
3.3. Расчёт регуляторов.....	37
3.4. Расчёт принципиальной схемы.....	45
4.ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРОЕКТА.....	49
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	55
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	56
ПРИЛОЖЕНИЕ.....	58



## ВВЕДЕНИЕ

Одной из главных задач, стоящей перед трубной промышленностью Российской Федерации, является сокращение производственных издержек при обеспечении высокого качества выпускаемой продукции.

Производство труб на трубопрокатных агрегатах (ТПА) с непрерывными станами получило наибольшее развитие ввиду высокой производительности и экономичности.

В настоящее время промышленность располагает большим разнообразием средств автоматизации, применение которых позволит создать системы управления электроприводов в соответствии с поставленными требованиями технологии. Создание новых электрических аппаратов для управления электродвигателями, автоматических регуляторов, выпрямительных устройств, а также специальных программных устройств и микропроцессоров приводит к решению задачи автоматизации электропривода.

В результате автоматизации тяжёлый физический труд рабочих ликвидируется, их участие в рабочем процессе сводится к настройке механизмов и машин и контролю их бесперебойной работы.

Учитывая большую потребность всех отраслей промышленности в стальных трубах в нашей стране построены и строятся высокопроизводительные агрегаты по трубному производству.

Одним из основных способов производства бесшовных горячекатаных труб является непрерывная раскатка на длинной подвижной оправке. Такой способ получения черновых труб используется, в частности на ТПА-30-102

Разработка электропривода и системы автоматического регулирования прошивного стана ТПА 30-102 в соответствии с современными требованиями с использованием достижений науки и техники является темой данной выпускной квалификационной работы.

*Объектом исследования* является электрооборудование прошивного стана (ТПА 30-102).

*Предметом исследования* является главный электропривод прошивного стана.

*Цель работы:* выполнить модернизацию главного электропривода прошивного стана (ТПА).

*Задачи работы:*

- 1) выбрать тип электродвигателя;
- 2) выбрать систему электропривода;
- 3) разработать и рассчитать систему автоматического управления;
- 4) разработать систему технологической автоматики;
- 5) произвести технико – экономическое обоснование.

# 1 ОПИСАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

## 1.1 Технология работы прошивного стана

9-клетевой непрерывный стан входит в состав горячей части трубопрокатного агрегата ТПА 30-102 цеха №8 ОАО «ПНТЗ», предназначен для прокатки за один проход бесшовных горячих труб из углеродистых сталей диаметром 115 (105...125) мм с толщиной стенки 3,35...7,9 мм (черновая труба). Исходной заготовкой служит гильза с прошивного стана диаметром 148 (135...165) мм с толщиной стенки 15,0...21,0 мм. Непрерывный стан включает в свой состав 9 клеток, расположенных в шахматном порядке под углом 90° друг к другу. Первые 7 клеток обеспечивают обжатие, 8 и 9 клетки являются калибрующими. Все клетки приводятся во вращение от индивидуальных двигателей через индивидуальные коробки передач. На валу каждого двигателя установлены тахогенераторы типа ТТ-180 и центробежное реле. Каждый из двигателей питается от индивидуального тиристорного преобразователя. У двигателей 1...7 клеток имеется один резервный тиристорный преобразователь, который может быть подключен к любому из двигателей. У двигателей 8 и 9 клеток также есть свой один резервный тиристорный преобразователь. Прокатка на стане производится на свободно плавающей оправке без натяжения с утонением стенки и уменьшением диаметра исходной трубы (гильзы).

Схема участка прошивного стана показана на рисунке 1.

## 1.2. Технология работы трубопрокатного агрегата

Нагрев заготовки производится в двух 3-х ручьевых секционных печах длиной около 88 метров каждая. Правильность нагрева металла контролируется фотоэлектрическим пирометром. Разрезку нагретой в печи заготовки производят на ножницах консольного типа с нижним резом.

Прошивка нагретой и зацентрированной заготовки производится на 2-х валковом прошивном стане с бочковидными валками и осевой выдачей.

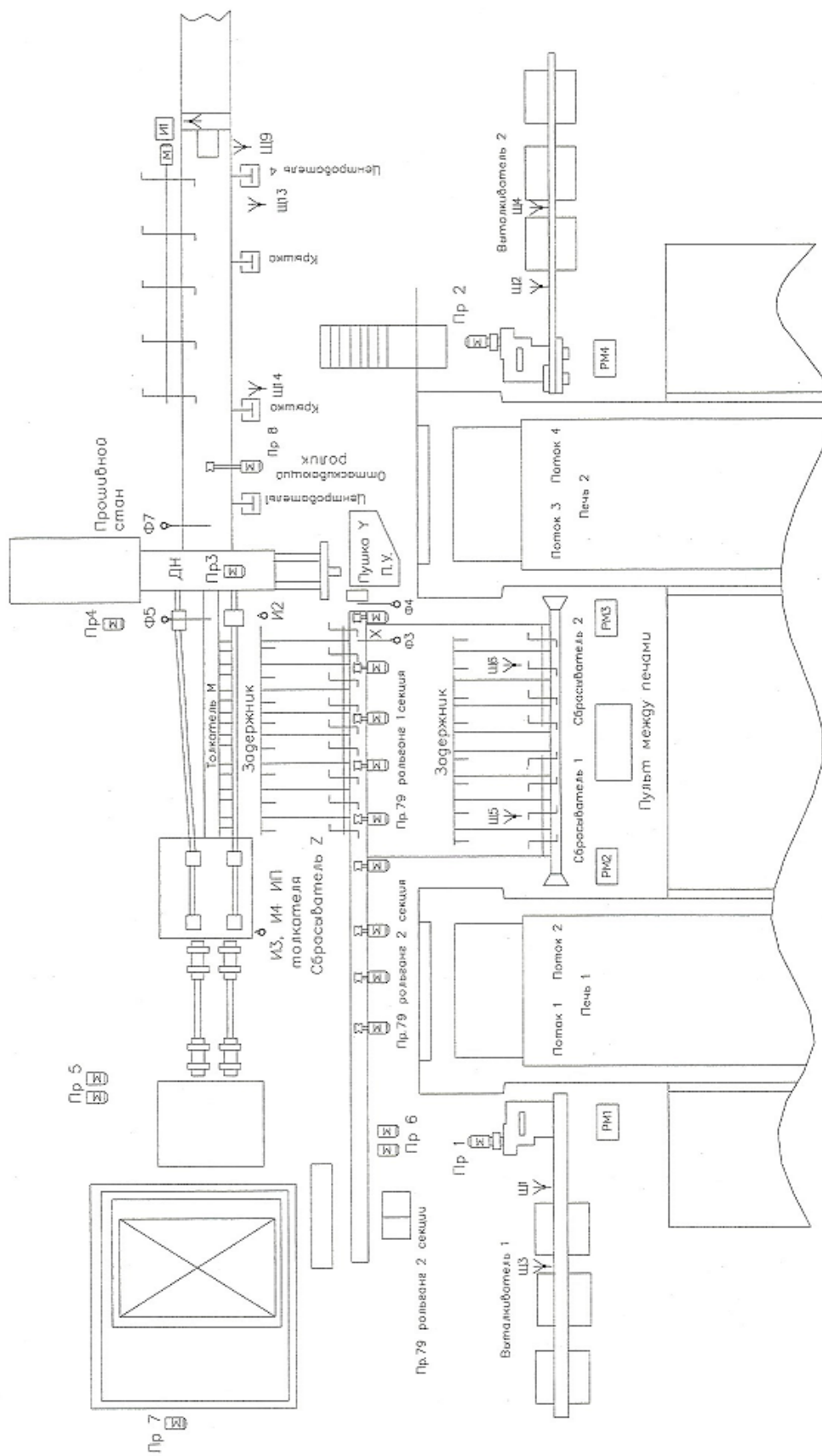


Рисунок 1 – Общий вид участка прошивного стана



В гильзу, полученную после прокатки на прошивном стане, вводится длинная цилиндрическая оправка, после чего она вместе с оправкой направляется в валки непрерывного стана. После извлечения оправки труба длиной около 28 метров направляется к стационарной дисковой пиле, где производится обрезка заднего конца трубы. Все трубы после обрезки задних концов проходят через калибрующие устройства - пару роликов - с целью выравнивания наружного диаметра. Для повышения и выравнивания температуры по длине и сечению перед редуцированием производится, нагрев труб в индукционных печах. На редуционном стане прокатывают трубы диаметром от 32 до 76 мм, на калибровочном - от 73 до 108 мм. С целью устранения кривизны и уменьшения овальности поперечного сечения трубы после остывания подвергаются правке на косовалковом правильном стане. Схема производства представлена на рисунке 2.

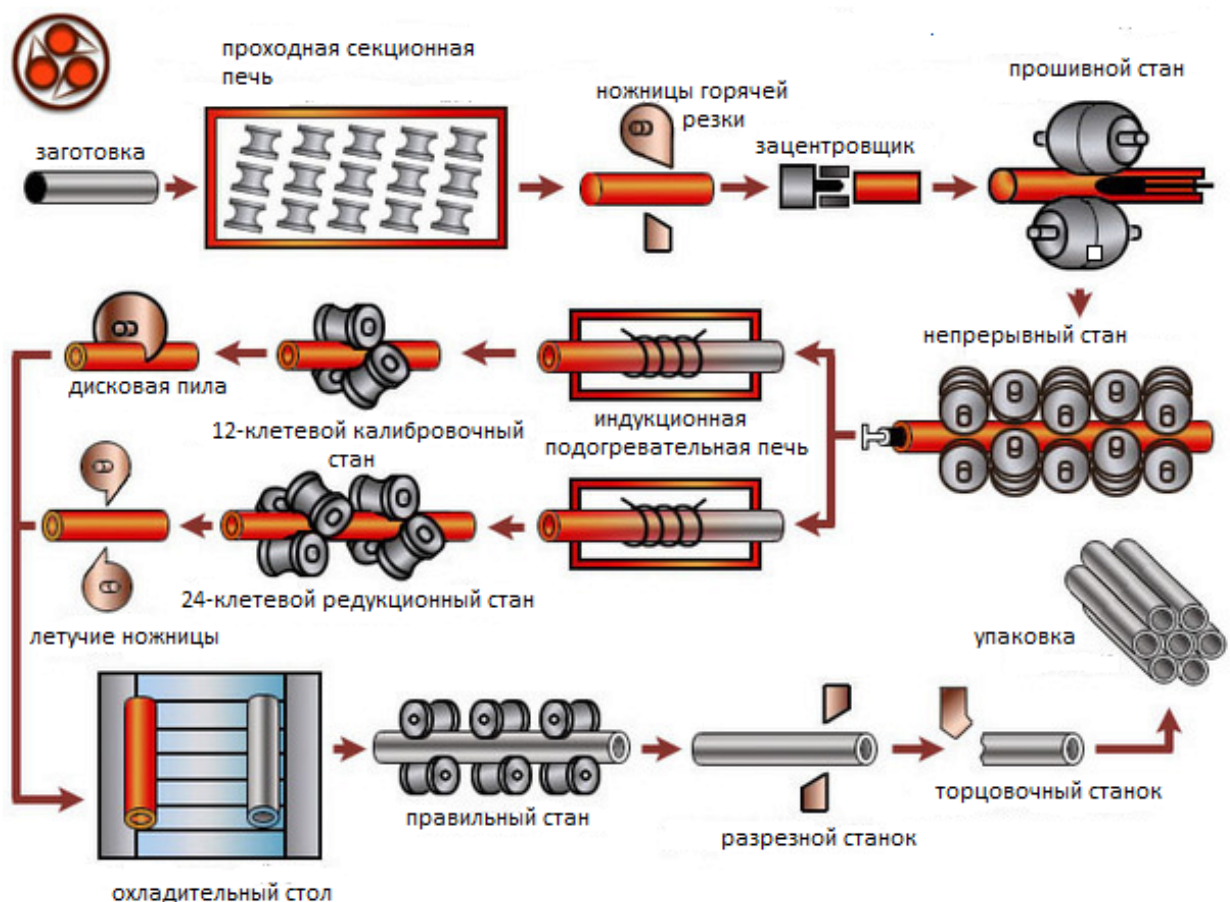


Рисунок 2 - Схема производства

Прошивной стан предназначен для прошивки в нагретом состоянии заготовок круглого сечения

Конструкция выхода прошивного стана обеспечивает надёжное центрирование гильзы и стержня благодаря наличию трёхроликовых трёхрычажных центрователей.

Первый центрователь выполнен подвижным (ход 800 мм), что необходимо для вывода стержня с оправкой из зоны валков для замены оправки при её износе. Каждый центрователь имеет также по два приводных выдающихся ролика для ускоренной выдачи гильзы из центрователей. Для выдачи гильзы ролики сводятся до контакта с поверхностью гильзы (с помощью пневмопривода).

За центрователями размещён упорно-регулирующий механизм с упорной головкой. Она воспринимает усилие металла на оправку и стержень при прокатке. После окончания прошивки упорная головка поворачивается вверх относительно оси прокатки для гильзы. Схема прошивного стана показана на рисунке 3.

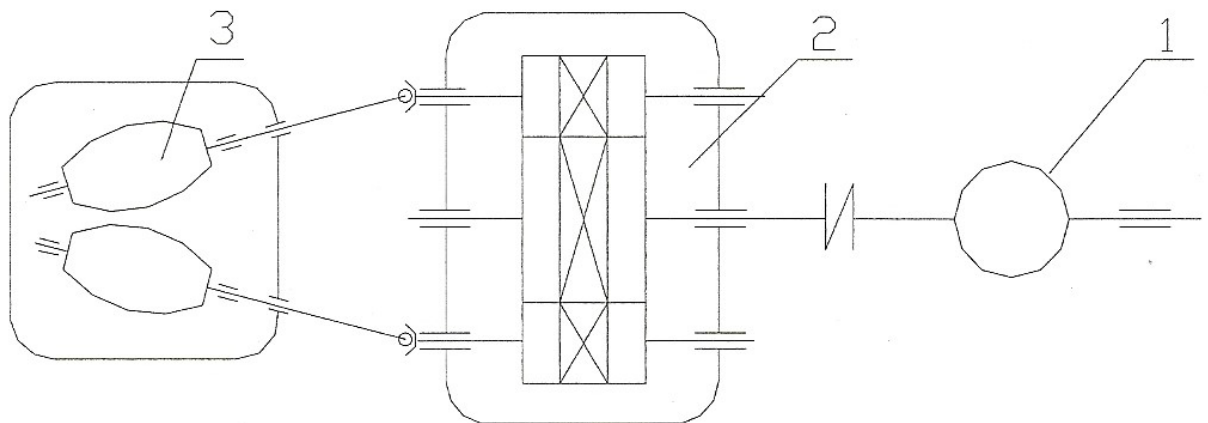


Рисунок 3 - Схема прошивного стана:  
1-электродвигатель 2-редуктор ,3-валок

Во время прошивки упорную головку фиксирует в рабочей позиции рычаг, снабженный пневмоприводом. Для настройки положения оправки нажимными винтами перемещают упорную головку в очаге деформации вдоль оси прокатки в пределах 150 мм., что делается для настройки стана. Гильза после окончания прошивки транспортируется роликами на выходе (вдоль оси прокатки).

После перехвата стержня клещевым перехватчиком, смонтированным на выходной проводке, и открытия упорной головки. Выдав гильзу на рольганг, расположенным за прошивным станом, упорная головка направляется в исходную позицию.

В процессе прошивки инструмент прошивного стана интенсивно охлаждается водой: снаружи охлаждаются рабочие валки, линейки и оправка (давление при охлаждении 0,2-0,3 Мпа), а оправка изнутри – под давлением максимум 2,5 Мпа. Технические данные прошивного стана представлены в таблице 1.

Таблица 1 - Технические данные прошивного стана

Заготовка	
Диаметр заготовки	115 мм
Длина заготовки	2350 мм
Вес заготовки	200 кг
Температура заготовки	1150 ..1200 °С
Скорость задачи заготовки в стан	1,2...1,5 м/с
Скорость прокатки	0,4...0,8 м/с
Гильза	
Наружный диаметр	148 мм
Внутренний диаметр	100
Толщина стенки	21 мм
Оправка	
Диаметр	86 мм
Длина	285 мм
Исходные данные, необходимые для предварительного расчёта мощности электродвигателя	
Момент прошивки	132 кН·м
Момент трения в подшипнике при прошивки, $M_{тр}$	0,96 кН·м
Момент вращения валка на холостом ходу, $M_{х.х}$	3,96 кН·м

## 2. ВЫБОР ТИПА ЭЛЕКТРОПРИВОДА, ДВИГАТЕЛЯ СИЛОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

### 2.1 Требования к электродвигателю

Современный прокатный цех представляет собой сложный комплекс механического и электрического оборудования. Следует отметить, что прокатные цеха содержат наибольшее количество электроприводов. Так, например, на непрерывном широкополосном стане 2000 горячей прокатки установлено около 2000 электродвигателей.

Правильный выбор типа и мощностей двигателей механизмов прокатных станов обеспечивает надежную и экономичную работу электропривода, следовательно, и всего цеха.

К электроприводу прокатных станов предъявляются высокие требования, связанные с особенностями работы привода этих станов.

К основным особенностям работы электропривода валков прокатных станов относятся: большое число включений (до 1000 включений в час для реверсивных станов), ударный характер нагрузки, превышающий номинальную нагрузку двигателей, а также разгон и торможение двигателя с металлом в валках, обеспечение высокой производительности прокатных станов.

Требуется регулирование скорости в диапазоне 1:4; жесткость механических характеристик, чем обеспечивается независимость скорости прошивки от нагрузки двигателя; привод должен быть быстродействующим.

Время переходного процесса, то есть восстановление скорости при набросе нагрузки: 0,3..0,5 с.; динамическая просадка скорости в переходном режиме не должна превышать 5 % от скорости холостого хода; надежность работы и простота обслуживания - неперемное условие безаварийной прокатки и малых затрат на эксплуатацию электрооборудования.

## 2.2 Выбор системы электропривода

Учитывая требования, предъявляемые к электроприводу стана, можно было бы применить в качестве приводного асинхронный двигатель, которые широко применяют благодаря своим качествам: дешевизна двигателя; простота конструкции и надёжность; высокий КПД.

Недостатками таких систем состоят в том, что они обладают более сложной системой автоматического регулирования по отношению к системам регулирования электропривода постоянного тока, к тому же такие системы, в особенности с высоким показанием регулирования и надёжности, имеют высокую стоимость. Поэтому для электропривода прошивного стана предлагается использовать двигатель постоянного тока системы ТП-Д, лишь в приводах требующих плавного регулирования скорости вращения – это главные приводы прокатных станов [2,4].

Поэтому для электропривода прошивного стана предлагается использовать двигатель постоянного тока независимого возбуждения, который позволяет получить хорошее качество переходных процессов и широкий диапазон изменения скорости от 0 до  $n_{ном}$  изменением напряжения на якоре, а выше  $n_{ном}$  ослаблением потока возбуждения.

Двигатель работает в условиях, где окружающая среда невзрывоопасна и не содержит вредных примесей, но имеется высокое содержание тонкой металлической пыли и повышенная температура окружающей среды. Выбираем в качестве приводного двигателя прошивного стана двигатель типа П2 для металлургического производства. В настоящее время наиболее широкое распространение получила система ТП-Д, которая является прогрессивной для питания двигателей постоянного тока в следствии следующих преимуществ:

- высокая надёжность и более длительный срок службы;
- высокие энергетические показатели;
- постоянная готовность к работе;
- малые габариты и вес.

Но полупроводниковые вентили имеют свои недостатки; низкая перегрузочная способность и чувствительность к большим перегрузкам, поэтому в настоящее время изготавливают тиристоры на большие токи и разработаны методы защиты тиристоров от токов короткого замыкания и перенапряжения, что позволяет применить для широкого круга приводов.

Следовательно, для управления приводом прошивного стана примем систему ТП-Д.

### 2.3. Предварительный выбор электродвигателя

Момент сопротивления для привода двух валков, приведенный к валу двигателя (с учетом КПД шестеренной клетки):

$$M_{\text{спр}} = \frac{j(M_{\text{пр}} + M_{\text{тр}} + M_{\text{х.х}})}{i\eta_{\text{шк}}\eta_{\text{ш}}} = \frac{2 \cdot (132 + 0,96 + 3,96)}{2 \cdot 0,96 \cdot 0,98} = 145,5 \text{ кН},$$

где  $j=2$  – количество валков;

$i$  – передаточное число шестеренной клетки;

$\eta_{\text{шк}} = 0,96$  – КПД шестеренной клетки;

$\eta_{\text{ш}} = 0,98$  – КПД шпинделя.

Номинальная частота вращения шпинделя, приведённая к валу двигателя

$$\omega_{\text{ном}} = \frac{\pi n_{\text{ном}}}{21} = \frac{\pi \cdot 125}{21} = 13,1 \text{ с}^{-1},$$

где  $n_{\text{ном}} = 125$  об/мин – номинальная скорость вращения валков стана.

Рассчитанная минимальная мощность двигателя:

$$P = M_{\text{дв}} \omega_{\text{ном}} = 145,5 \cdot 13,1 = 1906,1 \text{ кВт}.$$

Предварительно выбираем двигатель мощностью 2500 кВт.

Технические характеристики двигателя постоянного тока тип двигателя П2-20/40-2,5 УХЛ:

$$P_{\text{ном}} = 2500 \text{ кВт};$$

$$I_{\text{ном}} = 2870 \text{ А};$$

$$U_{\text{ном}} = 930 \text{ В};$$

$$I_B = 100 \text{ А};$$

$$U_B = 110 \text{ В};$$

$$M_{\text{НОМ}} = 190 \text{ кНГ}\cdot\text{м};$$

$$\omega_{\text{НОМ}} = 13^{-1};$$

$$\omega_{\text{max}} = 33^{-1};$$

$$\lambda_{\text{НОМ}} = 1,8;$$

$$\lambda_{\text{max}} = 2.$$

На основании расчёта нагрузочной диаграммы проверим соответствие выбранной мощности двигателя главного привода заданному режиму работы исполнительного механизма по условиям нагрева и по перегрузочной способности.

В проектируемом приводе, в отличие от действующего, с целью улучшения условий захвата заготовки валками рабочей клетки, захват должен вестись на пониженной скорости, которая на 20...30% ниже номинальной, а захваченную заготовку прошивают на скорости 20...30% выше номинальной [6,10].

Скорость вращения вала двигателя при пониженной скорости:

$$n_{\text{п}} = 0,8n_{\text{НОМ}} = 0,8 \cdot 125 = 100 \text{ об/мин}.$$

Скорость вращения при прошивке (рабочая скорость):

$$n_{\text{р}} = 1,2n_{\text{НОМ}} = 1,2 \cdot 125 = 150 \text{ об/мин}.$$

Коэффициент ослабления поля:

$$K_0 = \frac{n_{\text{р}}}{n_{\text{НОМ}}} = \frac{150}{125} = 1,2.$$

Принимая ускорение при разгоне,  $a=60$  об/мин/с, равным замедлению при торможении.

$$J_{\Sigma} = J_{\text{дв}} + J_{\text{мех}} = 9850 + 3100 = 12950 \text{ кг}\cdot\text{м}^2,$$

где  $J_{\text{дв}}=9850 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$  – момент инерции двигателя;

$$J_{\text{мех}} = 3100 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$$
 – момент инерции механизма.

Динамический момент при разгоне и торможении:

$$M_{\text{дин.р}} = M_{\text{дин.т}} = \frac{J_{\Sigma} a}{9,55} = \frac{12950 \cdot 60}{9,55} = 81 \text{ кН}\cdot\text{м}.$$

Пусковой момент:

$$M_{\Pi} = -M_{\text{дин.т}} + M_{\text{х.х}} = 145,5 + 81 = 226,5 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

Тормозной момент:

$$M_{\text{т}} = -M_{\text{дин.т}} + M_{\text{х.х}} = -81 + 3,96 = -77 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

При работе на скорости выше основной действительный момент увеличивается с учётом коэффициентом ослабления поля.

Фиктивный максимальный момент при пуске на скорости выше основной:

$$M'_{\Pi} = K_0 M_{\Pi} = 1,2 \cdot 226,5 = 271 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

Фиктивный максимальный момент при торможении на скорости выше основной:

$$M'_{\text{т}} = K_0 M_{\text{т}} = 1,2 \cdot (-77) = -92,4 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

По данным таблицы 1 прокатки время прошивки составляет 7 секунд, а время паузы 8 секунд.

Время разгона при полном потоке:

$$t_1 = \frac{(n_{\text{ном}} - n_{\Pi})}{\alpha} = \frac{(125 - 100)}{60} = 0,42 \text{ с}.$$

Фиктивный момент при прошивке на рабочей скорости:

$$M'_p = K_0 M_{\text{спр}} = 1,2 \cdot 145,5 = 175 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

Время разгона при ослабленном потоке:

$$t_2 = \frac{(n_p - n_{\text{ном}})}{\alpha} = \frac{(150 - 125)}{60} = 0,42 \text{ с}.$$

Время прошивки на рабочей скорости:

$$t_p = t_{\text{пр}} - t_1 - t_2 = 7 - 0,42 - 0,42 = 6,16 \text{ с}.$$

Время торможения при ослабленном потоке:

$$t_3 = \frac{(n_p - n_{\text{ном}})}{\alpha} = \frac{(150 - 125)}{60} = 0,42 \text{ с}.$$

Время торможения при полном потоке:

$$t_4 = \frac{(n_{\text{ном}} - n_{\Pi})}{\alpha} = \frac{(125 - 100)}{60} = 0,42 \text{ с}.$$

Магнитный поток двигателя при рабочей скорости:

$$\Phi = \frac{\Phi_{\text{ном}}}{K_0} = \frac{26,3 \cdot 10^{-2}}{1,2} = 21,9 \cdot 10^{-2} \text{ Вб},$$



где  $\Phi_{\text{ном}} = 26,3 \cdot 10^{-2} \text{Вб}$  – номинальный поток двигателя.

Время работы двигателя на пониженной скорости (х.х.):

$$t_{\text{х.х}} = t_{\text{п}} - (t_3 + t_4) = 8 - (0,5 + 0,4) = 7,1 \text{с.}$$

Время рабочего цикла:

$$t_{\text{ц}} = t_{\text{пр}} + t_{\text{п}} = 7 + 8 = 15 \text{с.}$$

Проверка двигателя по нагреву и по перегрузочной способности.

На основании полученных данных построим нагрузочную диаграмму (рисунок 4) и проведём проверочный расчёт на соответствие выбранной мощности двигателя главного привода заданному режиму работы исполнительного механизма по условиям нагрева и перегрузочной способности.

Условие правильного выбора двигателя по нагреву:

$$M_{\text{экв}} \leq M_{\text{ном}}.$$

$$M_{\text{экв}} = \sqrt{\frac{M_{\text{пр}}^2 t_1 + M_{\text{п}}'^2 t_2 + M_{\text{р}}'^2 t_{\text{р}} + M_{\text{т}}'^2 t_3 + M_{\text{т}}^2 t_4 + M_{\text{х.х}}^2 t_{\text{х.х}}}{t_{\text{ц}}}} =$$
$$= \sqrt{\frac{227^2 \cdot 0,42 + 271^2 \cdot 0,42 + 175^2 \cdot 6,16 + 92,4^2 \cdot 0,42 + 77^2 \cdot 0,42 + 3,96^2 \cdot 6,46}{15}} =$$
$$= 134,2 \text{кН} \cdot \text{м}.$$

$$M_{\text{экв}} = 134,2 \text{кН} \cdot \text{м} < M_{\text{ном}} = 190 \text{кН} \cdot \text{м}.$$

откуда следует, что условие выполняется и двигатель проходит по нагреву.

Коэффициент загрузки двигателя:

$$K_3 = \frac{M_{\text{экв}}}{M_{\text{ном}}} = \frac{134,2}{190} = 0,71.$$

Условие проверки двигателя по перегрузочной способности является соблюдением условия

$$\lambda_{\text{р}} \leq \lambda_{\text{max}},$$

где  $\lambda_{\text{р}}$  – коэффициент загрузки.

$$\lambda_{\text{р}} = \frac{M_{\text{max}}}{M_{\text{ном}}} = \frac{271}{190} = 1,4,$$

где  $M_{\text{max}} = M_{\text{п}}' = 271 \text{кН} \cdot \text{м}$  – максимальный момент за рабочий цикл.

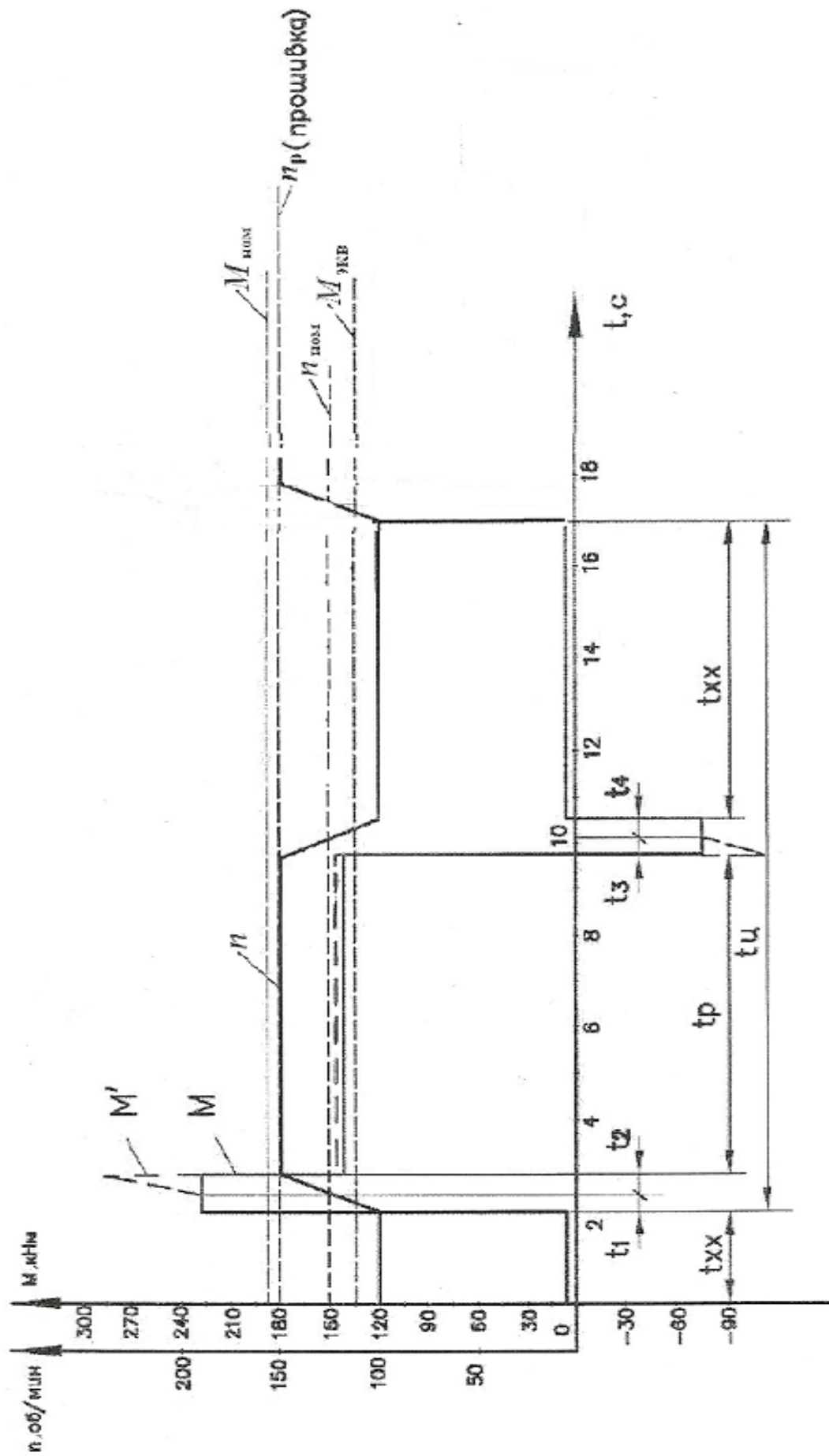


Рисунок 4 – Тахограмма и нагрузочная диаграмма электропривода

$$\lambda_p = 1,4 \leq \lambda_{max} = 2,$$

Следовательно, двигатель проходит по перегрузочной способности.

$$\lambda_p = 1,4 \leq \lambda_{max} = 2,$$

Следовательно, двигатель проходит по перегрузочной способности.

## 2.4 Выбор тиристорного преобразователя

Нагрузка тиристорных агрегатов выбирается из двух условий:

по среднеквадратичному току и ограничение максимальной температуры структуры тиристора в рабочих режимах.

Для двигателя постоянного тока при постоянном потоке справедливо соотношение:

$$I_{ср.кв} = \frac{M_{ср.кв} I_{НОМ}}{M_{НОМ}} = \frac{134,2 \cdot 2870}{190} = 2027 \text{ А.}$$

Ограничение максимальной температуры тиристоров связано с перегрузками.

Из нагрузочной диаграммы  $M_{п} = 226 \text{ кН} \cdot \text{м}$ .

определяем  $I_{Cmax}$

$$I_{Cmax} = \frac{M_{п} I_{НОМ}}{M_{НОМ}} = \frac{227 \cdot 2870}{190} = 3415 \text{ А.}$$

Напряжение необходимое для питания якоря двигателя  $U_{НОМ} = 930 \text{ В}$ .

При выборе тиристорного преобразователя необходимо соблюдать условия:

номинальный выпрямленный ток должен быть больше  $I_{ср.кв} : I_{дн} > I_{ср.кв}$  и максимальный ток тиристорного преобразователя должен быть больше  $I_{Cmax}$ . [19,20]

Учитывая вышеуказанные условия, применяем для питания двигателя постоянного тока комплектный тиристорный электропривод, унифицированный типа КТЭУ – 4000/930Е - 12Т208ДТ54-УХЛ4:

Номинальный выпрямленный ток;  $I_{дн} = 4000 \text{ А}$ ;

Номинальное выпрямленное напряжение:  $U_{НОМ} = 930 \text{ В}$ ;

Напряжение питающей сети:  $U_c = 6000 \text{ В}$ .

Проверяем выбранный тиристорный преобразователь:

$$I_{dH} = 4000 \text{ A} > I_{\text{ср.кв}} = 2027 \text{ A};$$

$$I_{\text{max}} = 7200 \text{ A} > I_{\text{сmax}} = 3415 \text{ A},$$

где  $I_{\text{max}} = \lambda I_{\text{ном}} = 1,8 \cdot 4000 = 7200 \text{ A}$ .

Необходимые условия выполняются, тиристорный преобразователь по условиям проверки подходит.

Электрический расчёт силового трансформатора выполняется с целью определения необходимых параметров трансформатора, по которым можно произвести все остальные расчёты:

Номинальный вторичный ток трансформатора:

$$I_{2H} = K_2 I_{dH} = 4000 \cdot 0,816 = 3266 \text{ A},$$

где  $K_2 = 0,816$  – коэффициент линейного вторичного тока трансформатора.

Приближённое номинальное вторичное напряжение трансформатора определяется из требуемой наибольшей ЭДС преобразователя:

$$U_{2H} = \frac{K_R K_\alpha U_{\text{ном}}}{K_c K_e} = \frac{1,05 \cdot 1 \cdot 930}{0,9 \cdot 1,35} = 900 \text{ В},$$

где  $K_c = 0,9$  – коэффициент снижения напряжения сети;

$K_\alpha = 0,9$  – коэффициент, учитывающий падение напряжение в реверсивных преобразователях;

$K_e = 1,35$  – коэффициент выпрямленного напряжения;

$K_R = 1,05$  – коэффициент, учитывающий падение напряжения на внутренних сопротивлениях преобразователя и реакторов.

ЭДС преобразователя при номинальных напряжениях и угле управления  $\alpha=0$ :

$$E_{d0} = K_c U_{2H} = 1,35 \cdot 900 = 1215 \text{ В}.$$

Габаритная мощность трансформатора:

$$S_T = K_T E_{d0} \cdot 10^{-3} = 1,047 \cdot 1215 \cdot 4000 = 5088 \text{ кВА},$$

где  $K_T = 1,047$  – коэффициент типовой мощности.

Принимаем трансформатор ТМПД-6300/10У2.

Номинальные данные трансформатора:

Номинальная мощность трансформатора  $S_T = 5090 \text{ кВА};$

Номинальное выпрямленное напряжение преобразователя  $U_{dH} = 930 \text{ В};$

Номинальный ток сетевой обмотки  $I_{1H} = 389A;$

Номинальный ток вентиляльной обмотки  $U_{1H} =$

6000 В;

Номинальное напряжение вентиляльной обмотки  $I_{2H} = 3270A;$

Коэффициент снижения напряжения питающей сети  $K_c 0,93;$

ЭДС короткого замыкания трансформатора  $e_k = 6,6\%;$

Потери короткого замыкания трансформатора  $\Delta P_{кз} = 30 \text{ кВт};$

Выпрямленный номинальный ток преобразователя  $I_{dH} = 4000 \text{ А};$

Напряжение управления, соответствующей ЭДС холостого хода преобразователя  $U_y = 8 \text{ В};$

Коэффициент выпрямления по напряжению  $K_{BU} = 1,35;$

Коэффициент выпрямления по току  $K_{B1} = 0,471.$

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

$$E_{d0} = K_{BU} U_{2H} = 1,35 \cdot 900 = 1215 \text{ В.}$$

Коэффициент передачи преобразователя по напряжению:

$$K_{\Pi} = \frac{E_{d0}}{U_y} = \frac{1215}{8} = 152.$$

Индуктивное  $X_{\Delta}$  и активное  $R_{\Delta}$  сопротивление фазы трансформатора, приведённого ко вторичной обмотке:

$$X_{\Delta} = \frac{U_{2H}}{K_{B1} I_{d1}} \cdot \frac{e_k}{100} = \frac{900}{0,41 \cdot 4000} \cdot \frac{7}{100} = 0,035 \text{ Ом};$$

$$R_{\Delta} = \frac{\Delta P_{кз}}{3(K_{B1} I_{dn})^2} = \frac{3 \cdot 10^3}{3(0,471 \cdot 4000)^2} = 0,0052 \text{ Ом.}$$

Индуктивное  $X_{\lambda}$  и активное  $R_{\lambda}$  сопротивление фазы трансформатора, приведённого к вторичной обмотке в эквивалентной звезде:

$$X_{\lambda} = \frac{X_{\Delta}}{3} = \frac{0,035}{3} = 0,0117 \text{ Ом};$$

$$R_{\lambda} = \frac{R_{\Delta}}{3} = \frac{0,0052}{3} = 0,0017 \text{ Ом.}$$

Эквивалентное сопротивление преобразователя;

$$R_{\text{эп}} = \frac{3}{\pi} X_{\lambda} + 1,75 R_{\lambda} = \frac{3}{\pi} \cdot 0,0117 + 1,75 \cdot 0,0017 = 0,014 \text{ Ом.}$$

Индуктивность трансформатора:

$$L_{\text{тр}} = \frac{3X_{\lambda}}{2\omega_c} = \frac{3 \cdot 0,0117}{2 \cdot 314} = 50 \cdot 10^{-6} \text{ Гн,}$$

где  $\omega_c 314 \text{ с}^{-1}$  – угловая частота сети.

Индуктивность реактора в цепи выпрямленного тока выбирается наибольшей, исходя из удовлетворения одного из нижеперечисленных условий:

- ограничение пульсации тока якоря, ограничение зоны прерывистого тока, ограничение скорости нарастания тока короткого замыкания;
- для того, чтобы величина действующего значения переменной составляющей тока якоря не превышала допустимой величины, индуктивность якорной цепи должна быть:

$$L_{\text{яц}} = \frac{E_{d(p)}^* E_{d0}}{p \omega_c I_{\text{я}(p)}^* I_{\text{ном}}} = \frac{0,13 \cdot 1215}{12 \cdot 314 \cdot 0,02 \cdot 2870} = 710 \cdot 10^{-6} \text{ Гн,}$$

где  $E_{d(p)}^* = 0,13$  – относительная величина действующего значения ЭДС низшей гармоники преобразователя;

$p = 12$  –пульсность преобразователя;

$I_{\text{я}(p)}^* = 0,02$  –относительная величина действующего значения тока низшей гармоники преобразователя.

Для того, чтобы ток якоря был непрерывным при значениях тока, превышающих  $I_{\text{я.гр.мах}} = 0,11 \text{ А}$ , необходима индуктивность якорной цепи:

$$L_{\text{яц}} = \frac{K_r E_{d0}}{\omega_c I_{\text{я.гр.мах}} I_{\text{ном}}} = \frac{0,096 \cdot 1215}{12 \cdot 314 \cdot 0,11 \cdot 2870} = 690 \cdot 10^{-6} \text{ Гн,}$$

где  $K_r = 0,096$  –коэффициент, зависящий от пульсности схемы.

Принимаем наибольшее:  $L_{\text{яц}} = 0,71 \text{ мГн}$ .

Индуктивность якоря двигателя:

$$L_{\text{яц}} = \frac{C_k U_{\text{ном}}}{\omega_{\text{ном}} p_n I_{\text{ном}}} = \frac{0,1 \cdot 930}{13,1 \cdot 5 \cdot 0,11 \cdot 2870} = 35 \cdot 10^{-6} \text{ Гн,}$$

где  $C_k = 0,1$  –коэффициент компенсации;

$p_n = 5$  — число пар полюсов.

Индуктивность реактора:

$$L_p = L_{яц} - L_{яд} - L_{п} = 0,71 - 0,35 - 0,05 = 0,31 \text{ мГн.}$$

Для ограничения скорости нарастания тока при коротком замыкании необходима индуктивность реактора:

$$L_p = \frac{2,1U_{2н}}{[\omega_c(I_{N=ТSMm} - I_{дн})]} - L_{п} = \frac{2,1 \cdot 716}{[314(1600 - 4000)]} - 50 \cdot 10^{-6} =$$
$$= 350 \cdot 10^{-6} \text{ Гн,}$$

где  $I_{N=ТSMm} = 16 \text{ кА}$  — допускаемое значение ударного неповторяющегося тока тиристора в открытом состоянии при длительном протекании 10 мс и максимально допустимой температуре перехода.

Принимаем наибольшее:  $L_p = 0,35 \text{ мГн.}$

Принимаем реактор СРОС-1800:4000 А; 0,377 мГн.

Активное сопротивление реактора:

$$R_p = \frac{78L_p}{I_{дн}^{0,52}} = 78 \cdot 0,377 \cdot \frac{10^{-3}}{4000^{0,52}} = 0,39 \text{ мОм.}$$

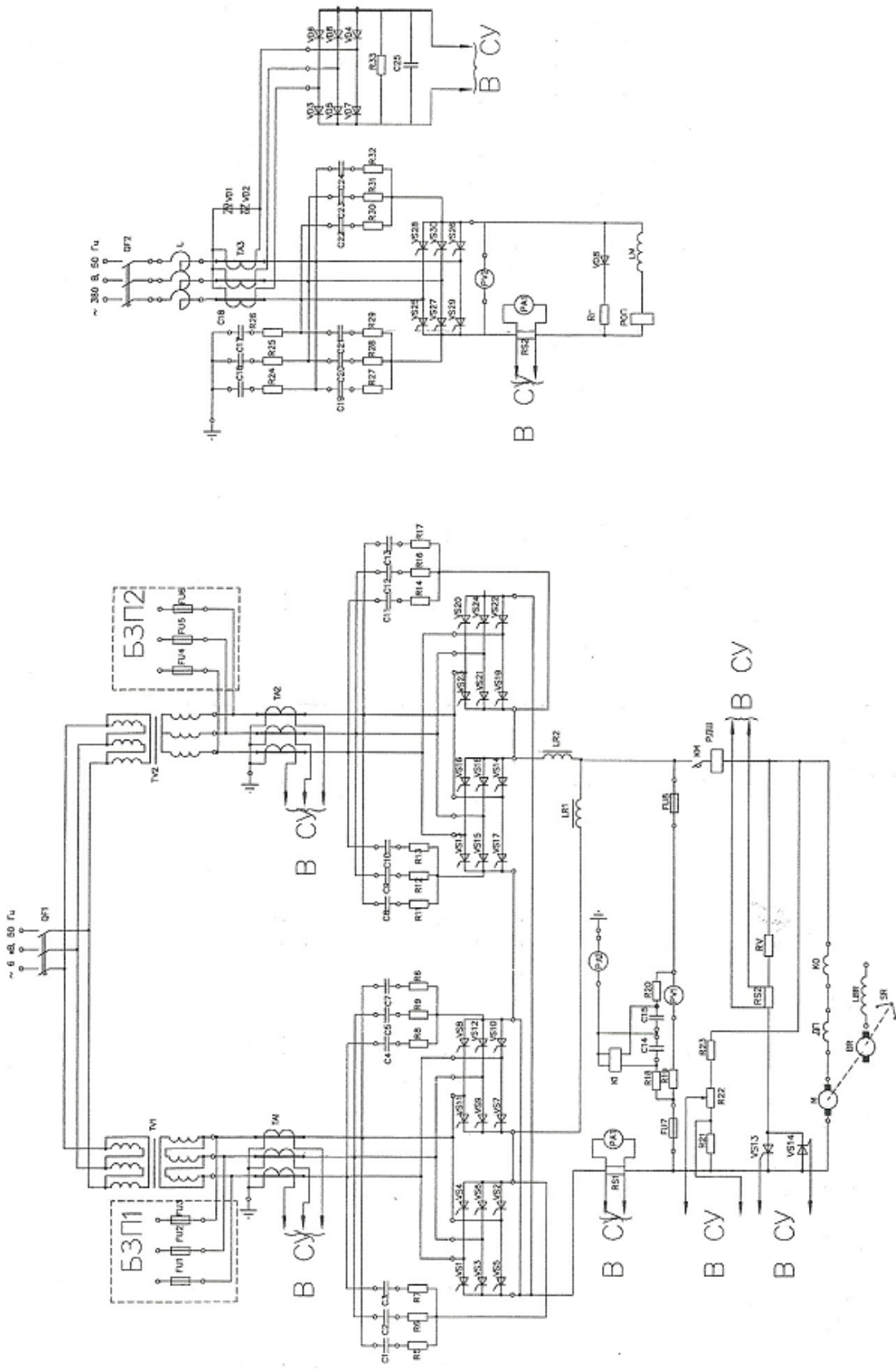


Рисунок 5 – Силовые цепи якоря и возбуждения



### 3. РАЗРАБОТКА И РАСЧЕТ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

#### 3.1 Выбор системы автоматического регулирования

Повышение требования к точности поддержания заданной скорости прокатки, а также ограниченное время восстановления скорости при её динамических просадках являются основными особенностями электропривода прошивного стана.

Для реализации этих требований применим унифицированную систему подчиненного регулирования. Достоинством системы, выполненных на операционных усилителях, является возможность реализации с высокой точностью желаемых передаточных функций, малая мощность управления, что позволяет применить датчики и задатчики регулируемых параметров с небольшими потерями, сравнительная легкость и простота настройки электроприборов [13,17].

Для рассматриваемого электропривода такими параметрами являются:

- ток якоря двигателя;
- ток обмотки возбуждения;
- скорость и ЭДС двигателя.

На входе регулятора каждого из контуров сравниваются сигналы, пропорциональные заданному и действительному значениям, а выходное напряжение регулятора является заданием для последующего контура регулирования. Достоинством данной системы является также возможность простейшими средствами ограничивать любую из координат системы.

Каждый контур САР включает два структурных звена: регулятор и звено объекта управления. Синтез системы регулирования производится путём последовательной оптимизации отдельных контуров из условия получения заданного времени реакции на ступенчатое управляющее воздействие и допустимость статической ошибки.

В целом управление электроприводом с реверсом напряжения якоря реализуется, как двузонная система регулирования.

### 3.2 Разработка модели силовой части

Технические данные двигателя типа П2-20/40-2,5УХЛ.

Номинальная мощность двигателя	$P_{\text{НОМ}} = 2870 \text{ А};$
Номинальный ток двигателя	$U_{\text{НОМ}} = 930 \text{ В};$
Номинальное напряжение обмотки возбуждения	$U_{\text{в.НОМ}} = 110 \text{ В};$
Номинальный ток возбуждения	$I_{\text{в.НОМ}} = 100 \text{ А};$
Номинальный момент двигателя	$M_{\text{НОМ}} = 190 \text{ кН}\cdot\text{м};$
Номинальная частота вращения	$n_{\text{НОМ}} = 125 \text{ об/мин};$
Максимальная частота вращения	$n_{\text{max}} = 250 \text{ об/мин};$
Число пар полюсов	$p = 5;$
Число витков обмотки возбуждения на полюс	$\omega_{\text{об.}} = 360 \text{ в/п};$
Сопротивление обмотки якоря	$(15 \text{ }^\circ\text{C})R_{\text{яо.}} = 0,00843 \text{ Ом};$
Сопротивление обмотки дополнительных полюсов	$R_{\text{дп.}} = 0,00073 \text{ Ом};$
Сопротивление обмотки возбуждения (15 °С)	$R_{\text{об.}} = 1,798 \text{ Ом};$
Падение напряжения на щетках	$\Delta U_{\text{щ}} = 2 \text{ В.}$
Момент инерции двигателя	$J_{\text{д.}} = 9850 \text{ кг}\cdot\text{м}^2;$
Перегрузочная способность	$\lambda = 2,0;$
Максимально-допустимая производная тока якоря	$\left(\frac{di_{\text{я}}}{dt}\right)_{\text{доп}} = 60 \text{ с}^{-1};$
Отношение числа активных проводников якоря к числу пар полюсов параллельных ветвей обмотки якоря	$\frac{N}{a} = \frac{675}{5} = 135.$

Технические данные преобразователи якорной цепи

Используемый тиристорный преобразователь КТЭУ – 4000/930Е - 12Т208ДТ54-УХЛ4.

Основной регулируемый параметр – скорость, двузонное регулирование. Данный тиристорный преобразователь с линейным контактом и динамическим торможением [8,18,19].

Номинальное выпрямленное напряжения преобразователя	$U_{d.ном} = 930\text{В.}$
Номинальный выпрямленный ток	$I_{d.ном} = 4000\text{ А;}$
Линейное напряжение вентильной обмотки	$U_{2л} = 900\text{ В;}$
Номинальный ток вентильной обмотки	$I_{2.ном} = 3270$

А.

Схема цепи возбудителя: однофазная с диодным выпрямительным мостом и симистором в цепи переменного тока, нереверсивная.

Пульсность  $m = 2.$

Для выбранного преобразователя используется стандартный дроссель СРОС-1800: 4000 А; 0,377 мГн, имеющий следующие номинальные данные:

$$I_{dн.} = 4000\text{ А;}$$

$$L_p = 0,377\text{ мГн;}$$

$$R_p = 0,39\text{ мОм.}$$

Технические данные тиристорного преобразователя цепи возбуждения.

Используемый встроенный возбудитель входит в комплект тиристорного преобразователя КТЭУ – 4000/930Е - 12Т208ДТ54-УХЛ4.

Возбудитель нереверсивный с изменением полярности напряжения на якоре, имеет реакторное питание.

На стороне переменного тока имеется автоматический выключатель А3726Б.

Номинальное выпрямленное напряжения преобразователя  $U_{п.ном} = 440\text{В.}$

Номинальный выпрямленный ток  $I_{п.ном} = 100\text{ А;}$

Действующее значение линейного номинального вторичного напряжения  $U_{2ном} = 380$

В;

Пульсность  $m = 6;$

Максимальное опорное напряжение  $U_{оп.мах} = 10\text{ В.}$

Для выбранного преобразователя используется токоограничивающий реактор РТст-41,-1,01-УЗ, имеющий следующие номинальные данные:

Номинальное линейное напряжение питающей сети  $380\text{ В;}$

Номинальный фазный ток 82 А;  
 Активное сопротивление обмотки  $R_{\text{То.}} = 175 \text{ мОм};$   
 Номинальная индуктивность фазы  $L_{\text{То.}} = 1,08 \text{ мОм.}$

Параметры якорной цепи двигателя

Активное сопротивление якорной цепи двигателя:

$$R_{\text{яд.}} = K_t (R_{\text{яо}} + R_{\text{ко}} + R_{\text{дп}}) + R_{\text{щ}} = 1,24 \cdot (0,0032 + 0,0026 + 0,00073) + 0,0007 = 0,014 \text{ Ом},$$

где  $K_t = 1,24$  – коэффициент, учитывающий изменение сопротивления при нагреве, зависит от класса изоляции и материала проводников;

$R_{\text{щ}} = 0,0007 \text{ Ом}$  – активное сопротивление щеточного контакта.

Электромагнитная постоянная времени якорной цепи:

$$T_{\text{яд}} = \frac{L_{\text{яд}}}{R_{\text{яд}}} = \frac{0,35}{0,014} = 0,041 \text{ с.}$$

Максимальная ЭДС преобразователя:

$$E_{d.\text{max}} = \sqrt{2} U_{2л} \frac{m}{\pi} \sin \frac{\pi}{m} = \sqrt{2} \cdot 900 \frac{12}{\pi} \sin \frac{\pi}{12} = 1264 \text{ В.}$$

Активное сопротивление шин принимается:

$$R_{\text{ш}} = 0,1R_{\text{я}} = 0,1 \cdot 0,0014 = 0,0014 \text{ Ом.}$$

Активное сопротивление трансформатора:

$$R_{\text{тр}} = \frac{\Delta P_{\text{м.тр}}}{I_{\text{дн}}^2} = \frac{40000}{4000^2} = 0,0024 \text{ Ом},$$

где  $\Delta P_{\text{м.тр}} = 40 \text{ кВт}$  – потери в меди трансформатора.

Активное сопротивление сглаживающего реактора:

$$R_{\text{тр}} = \frac{\Delta P_{\text{м.р}}}{I_{\text{дн}}^2} = \frac{10700}{4000^2} = 0,0004 \text{ Ом},$$

где  $\Delta P_{\text{м.р}} = 10,7 \text{ кВт}$  – потери в меди реактора.

Активное (эквивалентное) сопротивление главной цепи:

$$R_{\Sigma} = R_{\text{яд}} + R_{\text{ш}} + R_{\text{тр}} + R_{\text{р}} + R_{\text{Эп}} = 0,014 + 0,0014 + 0,0024 + 0,004 + 0,014 = 0,0358 \text{ Ом.}$$

Индуктивность главной цепи:

$$L_{\Sigma} = L_{\text{яд}} + L_{\text{тр}} + L_{\text{др}} = (0,35 + 0,056 + 0,5) \cdot 10^{-3} = 0,906 \cdot 10^{-3} \text{ Гн.}$$

Электромагнитная постоянная времени главной цепи:

$$T_{\Sigma} = \frac{L_{\Sigma}}{R_{\Sigma}} = \frac{0,906 \cdot 10^{-3}}{0,0358} = 0,025 \text{ с.}$$

Номинальная ЭДС двигателя:

$$E_{\text{НОМ}} = U_{\text{НОМ}} - I_{\text{НОМ}} R_{\text{яд}} - \Delta U_{\text{щ}} = 930 - 2870 \cdot 0,014 - 2 = 888 \text{ В.}$$

$$k\Phi_{\text{НОМ}} = \frac{E_{\text{НОМ}}}{\omega_{\text{НОМ}}} = \frac{888}{13,1} = 68,88 \text{ В.}$$

Электрохимическая постоянная времени:

$$T_{\text{М}} = \frac{J_{\Sigma} R_{\Sigma}}{(k\Phi_{\text{НОМ}})^2} = \frac{12950 \cdot 0,0358}{68,88^2} = 0,097 \text{ с.}$$

Система базисных величин

За основные базисные величины для силовой части приняты:

$$\text{Номинальный ЭДС якоря} \quad U_{\text{б}} = E_{\text{дн}} = 888 \text{ В;}$$

$$\text{Номинальный ток якоря двигателя} \quad I_{\text{б}} = I_{\text{НОМ}} = 2870 \text{ А;}$$

$$\text{Номинальная скорость двигателя} \quad \omega_{\text{б}} = \omega_{\text{НОМ}} = 13,1 \text{ с}^{-1};$$

$$\text{Номинальный электромагнитный момент} \quad M_{\text{б}} = M_{\text{НОМ}} = 190 \text{ кН} \cdot \text{м.}$$

Базисное сопротивление:

$$R_{\text{б}} = \frac{U_{\text{б}}}{I_{\text{б}}} = \frac{888}{2870} = 0,309 \text{ Ом.}$$

Параметры главной цепи в системе относительных единиц

Активное сопротивление главной цепи:

$$r_{\Sigma} = \frac{R_{\Sigma}}{R_{\text{б}}} = \frac{0,358}{0,309} = 0,1 \text{ о. е.}$$

Механическая постоянная времени:

$$T_j = \frac{J\omega_{\text{б}}}{M_{\text{б}}} = \frac{12950 \cdot 13,1}{190 \cdot 10^3} = 0,89 \text{ с.}$$

Коэффициент усиления преобразователя:

$$k_{\text{п}} = K_{\text{п}} \frac{U_{\text{б.р}}}{U_{\text{б}}} = 152 \cdot \frac{7}{888} = 1,198 \text{ о. е.}$$

Коэффициент передачи датчика тока:

$$K_{дт} = k_{дт} \frac{U_{б.р}}{I_б} = 1 \cdot \frac{7}{2870} = 0,002 \text{ В/А},$$

где  $k_{дт} = 1$  – коэффициент передачи датчика тока в относительных единицах.

Коэффициент передачи датчика скорости:

$$K_{дс} = k_{дс} \frac{U_{б.р}}{\omega_б} = 1 \cdot \frac{7}{13,1} = 0,6 \text{ В} \cdot \text{с},$$

где  $k_{дс} = 1$  – коэффициент передачи датчика скорости в относительных единицах.

Коэффициент передачи датчика ЭДС:

$$K_{дэ} = k_{дэ} \frac{U_{б.р}}{\omega_б} = 1 \cdot \frac{7}{888} = 0,0097,$$

где  $k_{дэ} = 1$  – коэффициент передачи датчика ЭДС в относительных единицах.

Параметры цепи возбуждения системы двухзонного регулирования.

Ток возбуждения по кривые намагничивания при ослабленном потоке:

$$I_{в.0,8\Phi_{ном}} = 0,55I_{в.ном} = 0,55 \cdot 100 = 55 \text{ А}.$$

Номинальное значение потока рассеяния:

$$\Phi_{ном}^{\sigma} = \sigma\Phi_{ном} = 0,18 \cdot 0,216 = 0,048 \text{ Вб},$$

где  $\sigma = 0,18$  – коэффициент рассеяния.

Номинальное значение главного потокосцепления:

$$\Psi_{м.ном} = \frac{2pw_в\Phi_{ном}}{m_в} = \frac{2 \cdot 5 \cdot 266 \cdot 0,267}{2} = 355 \text{ В} \cdot \text{с},$$

где  $w_в = 266$  – число витков обмотки возбуждения;

$m_в = 2$  – число параллельных ветвей обмотки возбуждения.

Значение главного потокосцепления при ослабленном поле:

$$\Psi_{м.0,8\Phi_{ном}} = 0,8\Psi_{м.ном} = 0,8 \cdot 355 = 284 \text{ В} \cdot \text{с}.$$

Значение тока намагничивания при ослабленном поле:

$$I_{м.0,8\Phi_{ном}} = 0,8I_{м.ном} = 0,55 \cdot 100 = 55 \text{ А}.$$

Номинальное значение потокосцепления рассеяния:

$$\Psi_{\sigma.ном} = \sigma\Psi_{м.ном} = 0,18 \cdot 355 = 63,9 \text{ В} \cdot \text{с}.$$

Активное сопротивление обмотки возбуждения:

$$R_{OB} = K_1 R'_{OB} = 1,24 \cdot 1,45 = 1,798 \text{ Ом.}$$

Активное сопротивление эквивалентного контура вихревых токов:

$$R_{BT} = \frac{R_{OB}}{\alpha_{BT}} = \frac{1,798}{0,05} = 35,96 \text{ Ом,}$$

где  $\alpha_{BT} = 0,05$  – коэффициент, зависящий от конструкции машины.

Система базисных величин для цепи возбуждения

За основные базисные величины для цепи возбуждения приняты:

$$\text{Номинальный ток возбуждения} \quad I_{б.в} = I_{в.ном} = 100 \text{ А;}$$

$$\text{Сопротивление цепи возбуждения двигателя} \quad R_{б.в} = R_{о.в} = 1,798 \text{ Ом;}$$

$$\text{Номинальный поток возбуждения} \quad \Phi_{б} = \Phi_{ном} = 0,267 \text{ Вб;}$$

$$\text{Номинальное главное потокосцепление обмотки возбуждения} \quad \Psi_{б.в} = \Psi_{м.ном} = 355 \text{ Вб;}$$

Базисная индуктивность возбуждения:

$$U_{б.в} = R_{б.в} I_{б.в} = 1,798 \cdot 100 = 179,8 \text{ В.}$$

Базисная индуктивность возбуждения:

$$L_{б.в} = \frac{\Psi_{б.в}}{I_{б.в}} = \frac{355}{100} = 3,55 \text{ Гн.}$$

Постоянная рассеяния:

$$T_{б.в} = \frac{\Psi_{б.в}}{U_{б.в}} = \frac{355}{179,8} = 1,97 \text{ с.}$$

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

$$L_M^{\circ} = (d\Psi_M/dI_M)_{I_{M0}=I_{M.ном.}};$$

$$l_M^{\circ} = (d\Psi_M/dI_M)_{i_{M0}=1м.} = (\Delta\Psi_M/\Delta I_M)_{i_{M0}=1м.}$$

Согласно этой формуле, приращение потока машины и её тока намагничивания в относительных единицах можно найти по кривые намагничивания  $\Psi_M(I_M)$  предварительно рассчитанной и затем пересчитанной в относительные единицы для данного двигателя. Но существует аналитический метод определения, используя аналитические выражения для кривого намагничивания  $i_M = a\Psi_M + b\Psi_M^n$ , где  $n$  – показатель степени, принимаемый

равным  $n = 7$  для двигателей постоянного тока. Он позволяет отыскать нужную величину, не прибегая к кривой намагничивания.

Составим схему уравнений для двух интересующих нас значений потокосцепления:

$$I = \alpha \cdot 1 + b \cdot 1^7;$$

$$0,55 = \alpha \cdot 0,8 + b \cdot 0,8^7.$$

Решив эту систему относительно  $\alpha$  и  $b$ , получим  $\alpha = 0,577$ ;  $b = 0,423$ .

Тогда относительные значения потокосцеплений, обусловленных главным потоком машины:

$$l_M^\circ = \frac{1}{(\alpha + nb\Psi_M^{n-1})}.$$

$$\text{При } i_M^\circ = 1 \quad l_M^\circ = 0,27.$$

$$\text{При } i_M^\circ = 0,55 \quad l_M^\circ = 0,708.$$

Найдём абсолютные значения потокосцеплений, обусловленных главным потоком машины:

$$L_M^\circ = L_{\text{б.в}} l_M^\circ.$$

$$\text{При } i_M^\circ = 1 \quad l_M^\circ = 0,96 \text{ Гн.}$$

$$\text{При } i_M^\circ = 0,55 \quad l_M^\circ = 2,5 \text{ Гн.}$$

Индуктивности рассеяния обмотки возбуждения:

$$L_{\text{об}}^\sigma = L_{\text{б.в}} l_{\text{об}}^\sigma = 3,55 \cdot 0,18 = 0,639 \text{ Гн,}$$

где  $l_{\text{об}}^\sigma = \frac{d\Psi_\sigma}{di_B} = 0,18.$

Полная индуктивность обмотки возбуждения при номинальном и ослабленном поле:

$$L_{\text{об}}^\sigma = L_{\text{б.в}} l_B^\sigma,$$

где  $l_B^\sigma = l_M^\sigma + l_{\text{об}}^\sigma.$

$$\text{При } i_M^\circ = 1, \quad l_M^\sigma = 0,27, \quad l_{\text{об}}^\sigma = 0,18, \quad l_M^\circ = 0,27 + 0,18 = 0,45,$$

$$L_B^\circ = 3,55 \cdot 0,45 = 1,597 \text{ Гн.}$$

$$\text{При } i_M^\circ = 0,55: \quad l_M^\sigma = 0,708; \quad l_{\text{об}}^\sigma = 0,18; \quad l_B^\circ = 0,78 + 0,888.$$

$$L_B^\circ = 3,55 \cdot 0,888 = 3,15 \text{ Гн.}$$



Активное сопротивление обмотки возбуждения в относительных единицах:

$$r_{\text{ОВ}} = \frac{R_{\text{ОВ}}}{R_{\text{б.В}}} = \frac{1,798}{1,798} = 1.$$

Активное сопротивление фиктивной короткозамкнутой обмотки в относительных единицах:

$$r_{\text{ВТ}} = \frac{R_{\text{ВТ}}}{R_{\text{б.В}}} = \frac{35,96}{1,798} = 20.$$

Параметры преобразователя цепи возбуждения

Максимальная выпрямленная ЭДС:

$$E_{d\text{ОВ}} = K_e U_{2\text{н.В}} = 1,35 \cdot 380 = 513 \text{ В},$$

где  $U_{2\text{н.В}} = 380 \text{ В}$  — номинальное напряжение вентильной обмотки трансформатора.

Активное сопротивление преобразователя цепи возбуждения:

$$R_{\text{п.В}} = 2R_{\text{р.В}} = 2 \cdot 0,175 = 0,35 \text{ Ом}.$$

Индуктивность вентильного преобразователя цепи возбуждения:

$$L_{\text{п.В}} = 2L_{\text{р.В}} = 2 \cdot 1,08 \cdot 10^{-3} = 2,16 \text{ мГн}.$$

Эквивалентные параметры цепи возбуждения:

$$R_{\text{В}} = R_{\text{ОВ}} + R_{\text{п.В}} = 1,798 + 0,35 = 2,148 \text{ Ом};$$

$$L_{\text{В}}^{\sigma} = L_{\text{ОВ}}^{\sigma} + L_{\text{п.В}} = 0,639 + 0,00216 = 0,641 \text{ Гн}.$$

Постоянные времени модели цепи возбуждения:

$$T_{\text{В}}^{\sigma} = T_{\text{б.В}} \frac{l_{\text{ОВ}}^{\sigma}}{r_{\text{ОВ}}}; \quad T_{\text{ВТ}}^{\sigma} = T_{\text{б.В}} \frac{l_{\text{М}}^{\sigma}}{r}; \quad T_{\text{В}}^{\sigma} = T_{\text{б.В}} \frac{l_{\text{В}}^{\sigma}}{r_{\text{ОВ}}};$$

$$T_{\text{б.В}}^{\sigma} = 1,97 \text{ с}; \quad r_{\text{ОВ}} = 1; \quad r_{\text{ВТ}} = 20.$$

При  $i_{\text{М}}^{\circ} = 1$ :

$$l_{\text{ОВ}}^{\sigma} = 0,18, \quad l_{\text{М}}^{\sigma} = 0,27, \quad l_{\text{В}}^{\sigma} = 0,45.$$

$$T_{\text{В}}^{\sigma} = 0,35, \quad T_{\text{ВТ}}^{\sigma} = 0,026, \quad T_{\text{В}}^{\sigma} = 0,886 \text{ с}.$$

При  $i_{\text{М}}^{\circ} = 0,55$

$$l_{OB}^{\sigma} = 0,18, \quad l_M^{\sigma} = 0,27, \quad l_B^{\sigma} = 0,45.$$

$$T_B^{\sigma} = 0,35, \quad T_{BT}^{\sigma} = 0,069, \quad T_B^{\sigma} = 1,75 \text{ с.}$$

Регулировочная характеристика преобразователя

Выражение регулировочной характеристики:

$$E_d = E_{d0} \sin\left(\frac{K_{\alpha} U_y}{57,3}\right) = 513 \sin\left(\frac{11 \cdot U_y}{57,3}\right) = 513 \sin(0,192 U_y).$$

Найдём максимальное напряжения уравнения  $U_{y.max}$ :

$$E_{п.max} = E_{d0} \sin(0,192 U_{y.max}).$$

После этого выражения получим  $U_{y.max} = 8,2 \text{ В.}$

Регулировочная характеристика преобразователя в системе относительных единицах

Коэффициент угла управления:

$$k_{\alpha} = \frac{K_{\alpha} U_{б.р}}{57,3} = \frac{11 \cdot 7}{57,3} = 1,344.$$

ЭДС преобразователя:

$$e_{d0} = \frac{E_{d0}}{U_{б.р}} = \frac{513}{179,8} = 3,48.$$

Найдём максимальное напряжение управления, которое обеспечивает  $e_{d0}$ :

$$\sin(1,344 u_{y.max}) = 1.$$

$$1,344 \cdot u_{y.max} = \arcsin 1 = 1,57.$$

$$u_{y.max} = 1,268.$$

Значение ЭДС преобразователя, обеспечивают  $\varphi^0 = 1$  и  $\varphi^0 = 0,8$ :

$$e_d^0 = \frac{E_d^0}{U_{б.в}}.$$

где  $E_{\Pi}^{\sigma} = R_{\Sigma} J_B$

$$\text{При } i_M^{\circ} = 1: E_d^{\sigma} = 2,148 \cdot 100 = 214,8 \text{ В, } e_d^0 = \frac{214,8}{147,4} = 1,19.$$

$$\text{При } i_M^{\circ} = 0,55: E_d^{\sigma} = 2,148 \cdot 55 = 118,14 \text{ В, } e_d^0 = \frac{118,14}{147,4} = 1,19.$$

Регулировочная характеристика преобразователя в системе относительных единиц представлена на рисунке 6.

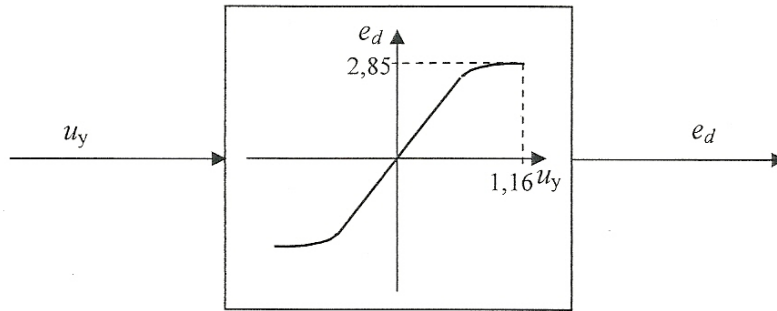


Рисунок 6 - Регулировочная характеристика

Напряжение управления, обеспечивающие  $\varphi^0 = 1$  и  $\varphi^0 = 0,8$ :

$$u_y^0 = 1,344 \cdot \arcsin\left(\frac{e_d^0}{e_{d0}}\right);$$

$$U_y^0 = u_y^0 U_{6.p.}$$

$$\text{При } i_M^0 = 1: u_y^0 = \frac{1}{1,344} \cdot \arcsin\left(\frac{1,19}{2,85}\right) = 0,32. \quad U_y^0 = 0,32 \cdot 7 = 2,24 \text{ В.}$$

$$\text{При } i_M^0 = 0,55: u_y^0 = \frac{1}{1,344} \cdot \arcsin\left(\frac{0,66}{2,85}\right) = 0,174. \quad U_y^0 = 0,174 \cdot 7 = 1,218 \text{ В.}$$

Коэффициент усиления вентильного преобразователя в окрестностях точек  $\varphi^0 = 1$  и  $\varphi^0 = 0,8$ :

$$k_{пв}^0 = e_{d0} k_a \cos(k_a u_y).$$

$$\text{При } \varphi^0 = 1; u_y = 0,32:$$

$$k_{пв}^0 = 2,85 \cdot 1,344 \cdot \cos(1,344 \cdot 0,32) = 3,48;$$

$$K_{пв} = 3,48 \cdot \frac{179,8}{7} = 89,39.$$

$$\text{При } \varphi^0 = 0,8; u_y = 0,174:$$

$$k_{пв}^0 = 2,85 \cdot 1,344 \cdot \cos(1,344 \cdot 0,174) = 3,726;$$

$$K_{пв} = 3,726 \cdot \frac{179,8}{7} = 95,7.$$

Коэффициент передачи датчика тока возбуждения:

$$K_{дтв} = \frac{k_{дтв} U_{6.p.}}{I_{6.p.}} = \frac{1 \cdot 7}{100} = 0,07.$$

Линеаризованная эквивалентная модель цепи возбуждения представлена на рисунке 7.

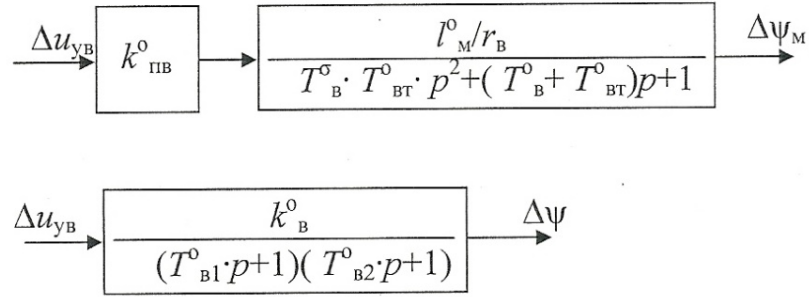


Рисунок 7 - Модель цепи возбуждения

Значения результирующего коэффициента передачи и постоянных времени цепи возбуждения определяют по формулам:

$$k_B^0 = \frac{k_{П.В}^0 l_M^0}{r_B};$$

$$T_{B.1,2} = \frac{T_1}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{T_1}{2}\right)^2 - T_2^2};$$

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

$$T_2^2 = T_B^\sigma + T_{BT}^0.$$

При  $\varphi^0 = 1$ ;  $T_1 = 0,912$  с;  $T_2^2 = 0,0091$  с;  $T_{B1}^0 = 0,9$  с;  $T_{B2}^0 = 0,1$  с;  $k_B^0 = 0,94$ .

При  $\varphi^0 = 0,8$ ,  $T_1 = 1,819$  с,  $T_2^2 = 0,024$  с,  $T_{B1}^0 = 1,8$  с,  
 $T_{B2}^0 = 0,013$  с,  $k_B^0 = 2,64$ .

Составим таблицы результатов расчета модели двузонной системы управления главного электропривода прошивного стана (таблицы 2 и 3).

Таблица 2 – Результаты расчёта двузонной системы управления

Цепь якоря	$\frac{k_{\Pi}}{K_{\Pi}}$	$r_{\Sigma}$	$T_{\Sigma}$ [с]	$T_M$ [с]	$T_j$ [с]	$\frac{k_{дт}}{K_{дт}}$	$\frac{k_{дс}}{K_{дс}}$	$\frac{k_{дэ}}{K_{дэ}}$
$\varphi^0 = 1$	$\frac{1,178}{160}$	0,06	0,064	0,089		1	1	1
						0,00	0,6	0,0097
$\varphi^0 = 0,8$	—	—	—	0,097	—	—	—	—

Таблица 3– Результаты расчёта двузонной системы управления

Цепь возбуждения	$T_B^0 [c]$	$T_B^\sigma [c]$	$T_{BT}^0 [c]$	$I_M^0$	$I_B^0$	$r_B$	$\Gamma_{BT}$
$\varphi^0 = 1$	0,886	0,35	0,026	0,27	0,45	1,0	20
$\varphi^0 = 0,8$	1,75	–	0,069	0,708	0,888	–	–
Цепь возбуждения	$\frac{k_{ПВ}^0}{K_{ПВ}^0}$		$\frac{k_{ДТВ}}{K_{ДТВ}}$		$T_{B1}^0 [c]$	$T_{B2}^0 [c]$	$k_B^0$
$\varphi^0 = 1$	$\frac{3,48}{89,39}$		$\frac{1}{0,07}$		0,9	0,1	0,94
$\varphi^0 = 0,8$	$\frac{3,726}{95,7}$		–		1,8	0,94	2,64

### 3.3. Расчёт регуляторов

В данном проекте структура управления электропривода базируется на критериальных оценках динамических процессов и требований к системе в установившихся режимах её работы. Здесь применена система управления электроприводами с основным и вспомогательными контурами регулирования.

Двузонные САР позволяют регулировать скорость как, ниже так и выше основной. Преимуществом двузонных САР в сравнения с однозонными является лучшее использование установленной мощности основного оборудования [8,17]

Для рационального управления процессами электромеханического преобразователя энергии в цепях питания обмоток якоря и возбуждения двигателя постоянного тока предусматриваются управляемые преобразователи.

В регулирующей части устанавливаются 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; фильтры: в канале якоря Ф и в канале возбуждения ФВ.

Канал воздействия по цепи якоря представляет собой систему регулирования скорости с подчинённым контуром регулирования тока якоря. Так как ослабление магнитного поля двигателя неглубокое (0,8) и существенного влияния на коэффициент скорости регулятора скорости не оказывается, от множительного элемента в цепи регулятора скорости можно отказаться. Канал воздействия по цепи

возбуждения выполняется также в виде двухзонной САР, но содержащей внутренний контур регулирования магнитного потока и внешней 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.

Представление тиристорного преобразователя безынерционным звеном справедливо лишь для определённых частот при не слишком быстрых изменениях управляющего напряжения  $U_y(t)$ . При очень быстрых изменениях начинает проявляться ряд факторов, из которых основным является дискретность преобразователя. Параметром, определяющим быстродействие контура, является постоянная времени  $T_\mu$ . Анализ устойчивости в малом с учётом дискретности ТП показывает, что граничные значения постоянных времени составляют  $T_\mu = \frac{\pi}{2m\omega_c}$ .

При меньших значениях  $T_\mu$  САР оказывается неустойчивой, в ней могут возникнуть незатухающие колебания. Чтобы САР была работоспособной, необходимо определить запас устойчивости. Как показывает опыт, здесь достаточно двукратного запаса и минимально допустимое значение постоянной времени  $T_\mu$  может принято для цепи якоря:

$$T_\mu = \frac{\pi}{m\omega_c} = \frac{\pi}{12 \cdot 314} \approx 0,001\text{с},$$

где  $m$  – пульсность.

Для цепи возбуждения:

$$T_{\mu.в} = \frac{\pi}{m\omega_c} = \frac{\pi}{6 \cdot 314} = 0,00167\text{с}.$$

При синтезе регулятора рассматриваются следующие задачи:

Своим действием регулятор должен компенсировать влияние того звена, которое попадает в данный контур. Для решения этой задачи в передаточную функцию вводят сомножитель, представляющий следующее выражение:

$$R_{k2}(p) = W_t^{-1}(p).$$

Регулятор должен астатизм контура по управляющему воздействию, то есть обеспечить нулевую статическую ошибку по управлению. Для этого в регуляторе должна присутствовать передаточная функция интегрирующего звена:

$$R_{vi} = \frac{1}{T_i p}$$

Тем самым обеспечиваем определённые свойства

$$R_i(p) = R_{ki}(p) \cdot R_{vi}(p) = (T_i p W_i(p))^{-1},$$

где  $T$  – постоянная интегрирования регулятора.

Синтез регулятора тока якоря показан на рисунке 8.

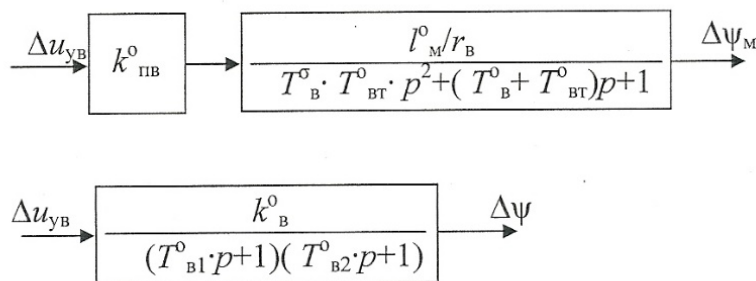


Рисунок 8 - Контур тока якоря

При синтезе принимается  $e_d = 0$ .

Настройка САР на модульный оптимум:

$$T_i = 2T_\mu = 2 \cdot 0,001 = 0,002 \text{ с.}$$

Передаточная функция регулятора тока:

$$R_i(p) = \frac{(T_3 p + 1)r_3}{k_\Pi T_i p}$$

В итоге получаем ПИ – регулятор.

Коэффициент усиления регулятора тока якоря:

$$K_{pT} = \frac{T_3 r_3}{k_\Pi T_i} = \frac{0,025 \cdot 0,1}{1,198 \cdot 0,002} = 1,04 \text{ с.}$$

Постоянная времени регулятора:

$$T_{pT} = \frac{T_i k_\Pi}{r_3} = \frac{0,002 \cdot 1,198}{0,1} = 0,024 \text{ с.}$$

Оценка влияния ЭДС.

Так как в реальной системе  $e_d \neq 0$ , то ЭДС вращения влияет на САР, то есть по отношению к заданию имеется установившаяся ошибка, которая зависит от электромеханических свойств и быстродействия контура.

Влиянием ЭДС можно пренебречь при соблюдении следующего условия:

$$T_M \geq 20T_\mu;$$

$$0,097 > 20 \cdot T_\mu = 20 \cdot 0,001 = 0,02 \text{ с.}$$

Условие выполняется, следовательно, влиянием ЭДС можно пренебречь.

Проверим условие ограничения производной тока якоря:

$$\left(\frac{di_{\text{я}}}{dt}\right)_{\text{max}} \leq \left(\frac{di_{\text{я}}}{dt}\right)_{\text{доп}} = 60\text{с}^{-1}.$$

При условии установки на входе контура скорости задатчика интенсивности

$$\left(\frac{di_{\text{я}}}{dt}\right)_{\text{max}} = \frac{0,21i_{\text{я.max}}}{T_\mu} = \frac{0,2 \cdot 1,4}{0,001} = 294 \text{ с}^{-1};$$

$$294\text{с}^{-1} > 60\text{с}^{-1}.$$

Условие не выполняется, необходимо принять следующие меры: перед регулятором скорости установим фильтр, постоянную времени, которое найдём из отношения:

$$\left(\frac{di_{\text{я}}}{dt}\right)_{\text{max}} = \frac{0,21i_{\text{я.max}}}{T_{\mu\text{з}}} = 60\text{с}^{-1}.$$

Откуда

$$T_{\mu\text{з}} = \frac{0,21i_{\text{я.max}}}{60} = 0,0049 \text{ с.}$$

Зная  $T_{\mu\text{з}}$  найдём  $T_{\text{фс}}$ :

$$T_{\text{фс}} = 2T_\mu - T_i = 2 \cdot 0,0049 - 0,002 = 0,0078 \text{ с.}$$



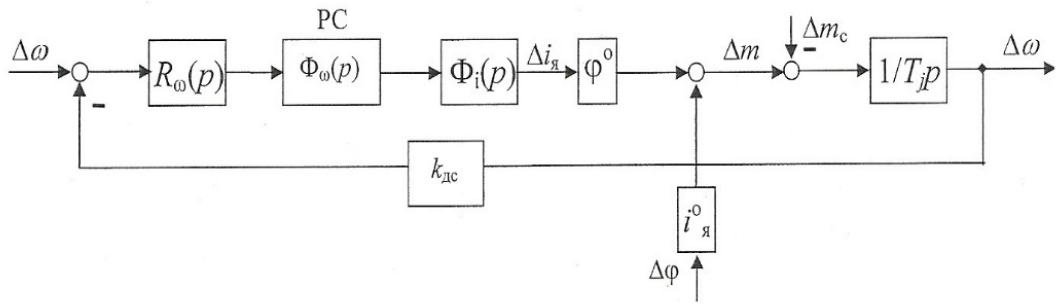


Рисунок 9 – Регулятор тока

Синтез ведётся при  $m_c = 0$  и  $\Delta\varphi = 0$ .

Передаточная функция регулятора скорости:

$$R_\omega(p) = \frac{T_j}{\varphi^0 T_\omega} = \frac{0,89}{1 \cdot 0,0196} = 44,5,$$

где  $T_\omega = 4T_{\muз} = 4 \cdot 0,0049 = 0,0196$  с.

Таким образом, регулятор скорости представляет собой П - регулятор. Синтез регулятора магнитного поток показан рисунке 10.

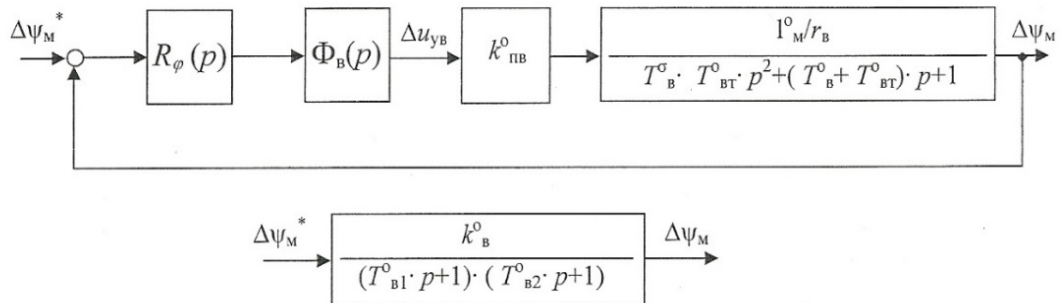


Рисунок 10 - Контур магнитного потока

Величина  $T_{В2}^0$  настолько мала, что может быть отнеси к числу не компенсируемых постоянных времени САР потока возбуждения.

Тогда в соответствии со стандартной методикой синтеза передаточная функция регулятора потока принимает вид:

$$R_\varphi(p) = \frac{T_{В1}^0 + 1}{k_B^0 T_\varphi p},$$

где  $T_\varphi = 2(T_{\muв} + T_{В2}^0) = 2 \cdot (0,00167 + 0,13) = 0,029$  с.

В результате получаем ПИ-регулятор магнитного потока.

Коэффициент усиления регулятора:

$$K_{p\varphi} = \frac{T_{в1}^0}{k_{в}^0 T_{\varphi}} = \frac{1,8}{2,64 \cdot 0,029} = 26.$$

Постоянная времени:

$$T_{p\varphi} = k_{в}^0 T_{\varphi} = 2,64 \cdot 0,029 = 0,07 \text{ с.}$$

Синтез регулятора ЭДС приведён на рисунке 11.

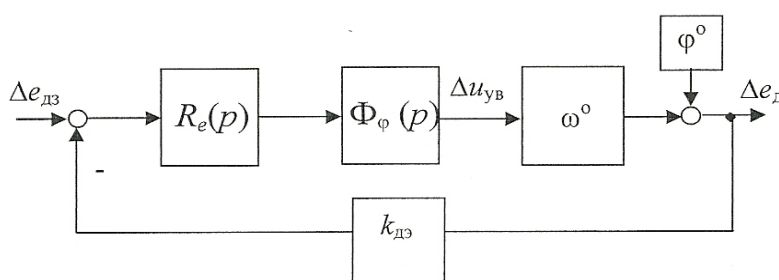


Рисунок 11 - Контур ЭДС

В соответствии с типовой методикой получаем интегральный регулятор ЭДС с передаточной функцией:

$$R_e(p) = \frac{1}{\omega^0 T_e p},$$

где  $T_e = 2T_{\varphi} = 2 \cdot 0,029 = 0,058 \text{ с.}$

В соответствии с полученным выражением в структуре регулятора ЭДС выделим интегрирующее звено с переменным параметром  $T_e$  и делительное звено с переменным параметром  $\omega^0$ . Блок деления в структуре регулятора компенсирует влияние изменения скорости на характеристики контура ЭДС.

Времени И- регулятора:

$$T_{pэ} = \omega^0 T_e = 1,25 \cdot 0,058 = 0,07 \text{ с.}$$

Для исключения операции дифференцирования тока в структуру вычислителя ЭДС вводится апериодический фильтр с постоянным времени:

$$T_{фэ} = T_{яд} = 0,04 \text{ с.}$$

Функциональная и электрические схемы представлены на рисунке 12 и 13 В реальных САР фильтр с постоянным времени  $T_{\mu}$  устанавливается не на входе СИФУ, а на входах регулятора тока в цепях заданий и обратной связи по току.

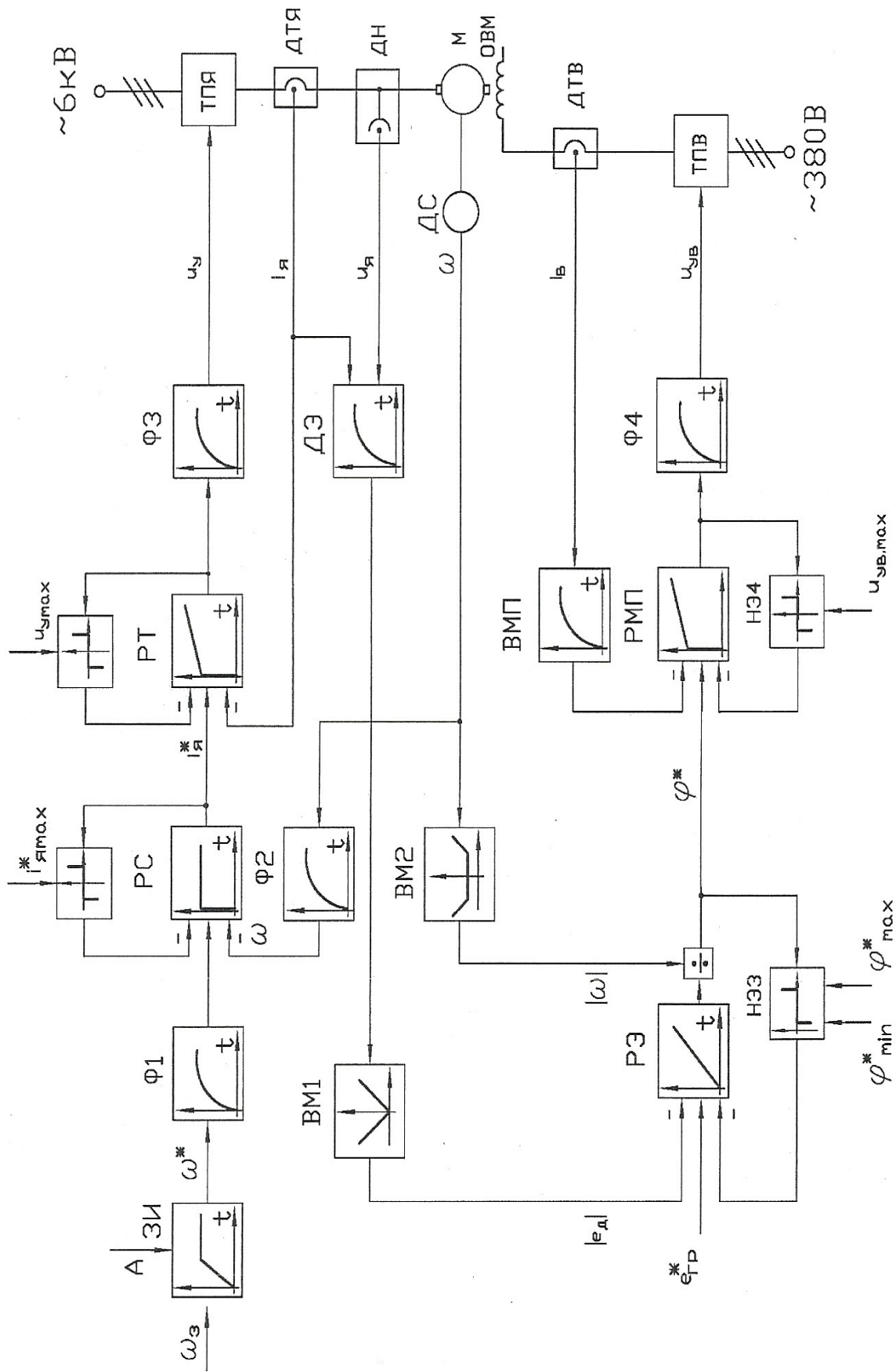


Рисунок 12 - Функциональная схема САУ

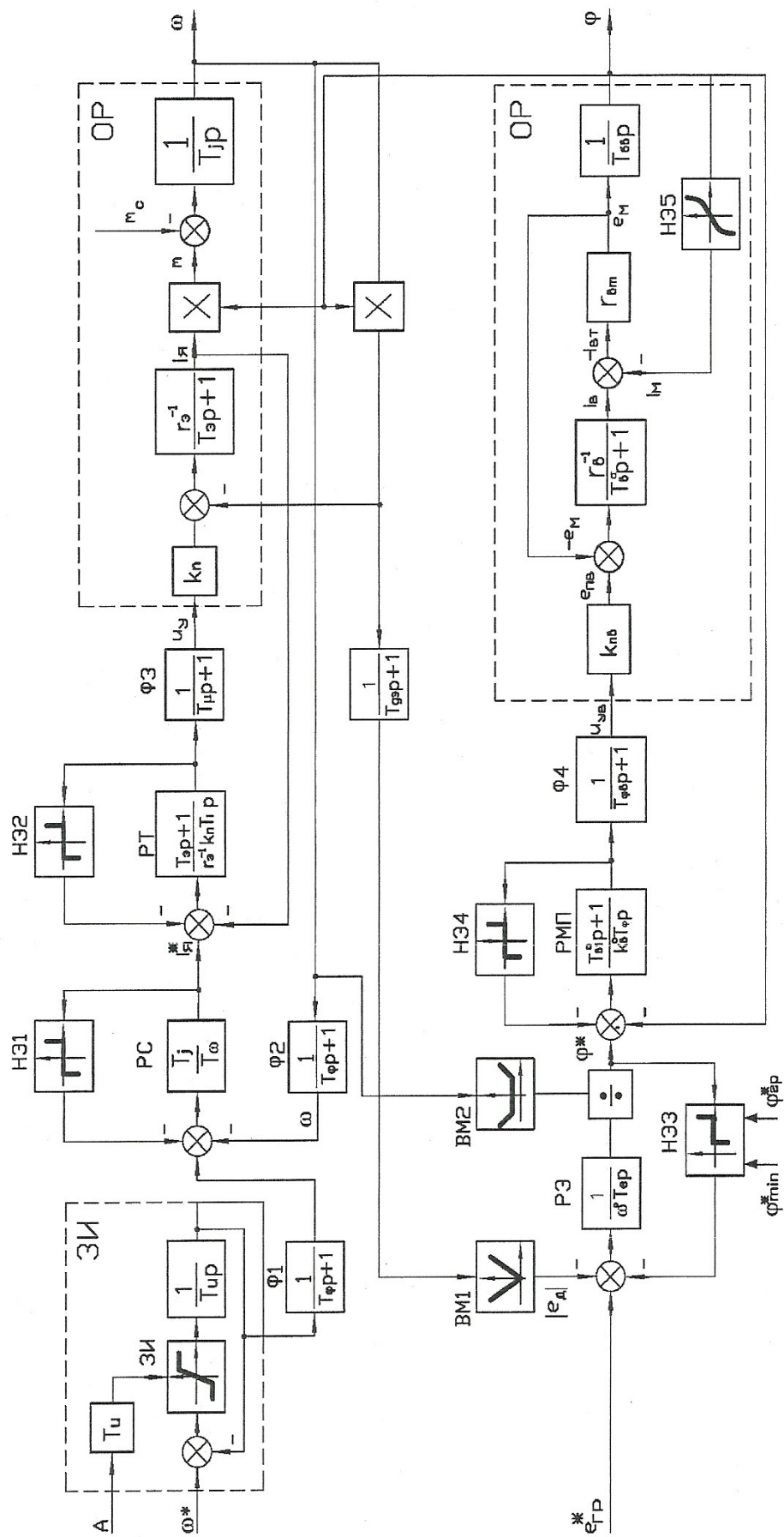


Рисунок 13 - Структурная схема САУ

### 3.4 Разработка принципиальной схемы

Краткая техническая характеристика датчиков информации. В качестве датчика скорости выбираем прецизионный тахогенератор ПТ-42.

Основные параметры тахогенератора ПТ-42.

Мощность номинальная Вт;

Напряжение номинальное

$$U_{н.ТГ} = 230 \text{ В};$$

Ток якоря номинальный

$$I_{н.ТГ} = 0,5 \text{ А};$$

Скорость номинальная

$$n_{н.ТГ} = 400 \text{ об/мин};$$

Напряжение возбуждения номинальная

$$U_{в.н.ТГ} = 55 \text{ В};$$

Ток возбуждения номинальный

$$I_{в.н.ТГ} = 1 \text{ А};$$

Зубцовые пульсации

$$\delta_{з..ТГ} = 1,4\%;$$

Полюсные пульсации

$$\delta_{п..ТГ} = 0,5\%;$$

Коллекторные пульсации

$$\delta_{к..ТГ} = 1,4\%;$$

Оборотные пульсации

$$\delta_{к..ТГ} = 1,4\%.$$

В качестве датчика тока используется ячейка РГ8. Данный датчик первичную информацию получает с шунта. Выбираем шунт 75ШСМ:

Ток шунта

$$I_{ш.ном} = 400 \text{ А};$$

Напряжение шунта

$$U_{ш.ном} = 75 \text{ мВ}.$$

Коэффициент шунта:

$$K_{ш} = \frac{U_{ш.н}}{I_{ш.н}} = \frac{0,075}{4000} = 1,8 \cdot 10^{-5} \text{ В/А}.$$

Коэффициент передачи ячейки датчика тока:

$$K_{ядт} = \frac{U_{кд}}{I_{ш}} = \frac{0,002}{1,8 \cdot 10^{-5}} = 106.$$

В качестве датчика напряжения используется ячейка РГ8. Данный датчик первичную информацию получает с двигателя.

В качестве датчика тока возбуждения используется ячейка РГ8. Данный датчик первичную информацию получает с шунта. Выбираем шунт 75ШСМ:

Ток шунта

$$I_{\text{ш.ном}} = 100 \text{ А};$$

Напряжение шунта

$$U_{\text{ш.ном}} = 75 \text{ мВ.}$$

Коэффициент шунта:

$$K_{\text{ш}} = \frac{U_{\text{ш.н}}}{I_{\text{ш.н}}} = \frac{0,075}{100} = 75 \cdot 10^{-3} \text{ В/А.}$$

Коэффициент передачи ячейки датчика тока:

$$K_{\text{я.дт}} = \frac{U_{\text{кд}}}{I_{\text{ш}}} = \frac{0,07}{75 \cdot 10^{-5}} = 93.$$

Базисные величины для системы автоматического управления

В системе САР-08-М1 используются следующие виды операционных усилителей (ОУ): К553 УД2 и К140 УД7.

Приведённая погрешность САР в номинальном режиме  $\delta = 0,005$ ;

Коэффициент усиления операционного усилителя  $K_{\text{ОУ}} = 2 \cdot 10^4$ ;

Ток цепи ограничения регулятора  $I_{\text{огр.мах}} = 2 \cdot 10^{-6} \text{ А}$ ;

Максимальное напряжение на выходе ОУ  $U_{\text{ОУ.мах}} = \pm 10 \text{ В}$ ;

Выходное сопротивление  $R_{\text{ВХ}} = 400 \text{ кОм}$ .

Базовый ток САР:

$$I_{\text{б.р}} \geq \frac{1}{\delta} \cdot \frac{U_{\text{ОУ.мах}}}{K_{\text{ОУ}} R_{\text{ВХ}}} + I_{\text{огр.мах}} = \frac{1}{0,005} \cdot \frac{10}{2 \cdot 10^4 \cdot 400 \cdot 10^3} + 2 \cdot 10^{-6} = \\ = 4 \cdot 10^{-3} \text{ А.}$$

Принимаем  $I_{\text{б.р}} = 0,7 \cdot 10^{-3} \text{ А}$ ;  $U_{\text{б.р}} = 7 \text{ В}$ ;  $R_{\text{б.р}} = \frac{U_{\text{б.р}}}{I_{\text{б.р}}} = \frac{7}{0,7 \cdot 10^{-3}} = 10 \text{ кОм}$ .

Структурная схема регулятора тока представлена на рисунке 14.

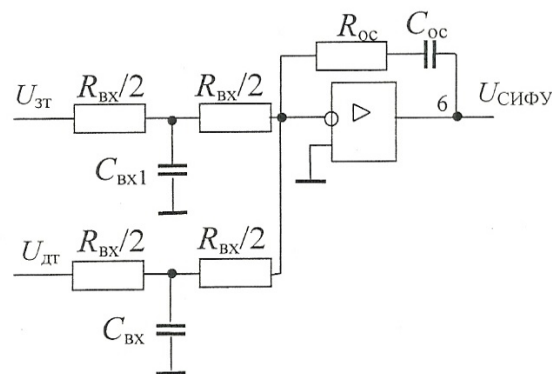


Рисунок 14 - Регулятор тока

Принимаем:

$$\frac{R_{\text{ВХ}}}{2} = 10 \text{ кОм};$$

$$R_{\text{ос}} = K_{\text{рТ}} R_{\text{ВХ}} = 1,4 \cdot 20 = 28 \text{ кОм};$$

$$C_{\text{ос}} = \frac{T_{\text{рТ}}}{R_{\text{ВХ}}} = \frac{0,024}{20} = 1,4 \cdot 10^{-6} \text{ Ф.}$$

Структурная схема регулятора скорости представлена рисунке 15.

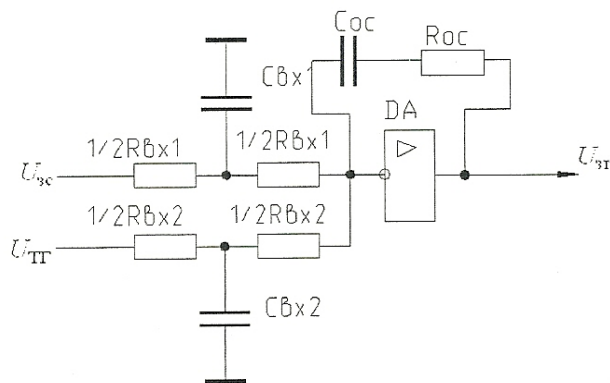


Рисунок 15 - Регулятор скорости

Принимаем:

$$\frac{R_{\text{ВХ}}}{2} = \frac{10}{2} = 5 \text{ кОм};$$

$$R_{\text{ос}} = K_{\text{рТ}} R_{\text{ВХ}} = 44,5 \cdot 5 = 222,5 \text{ кОм.}$$

Структурная схема тока возбуждения представлена на рисунке 16.

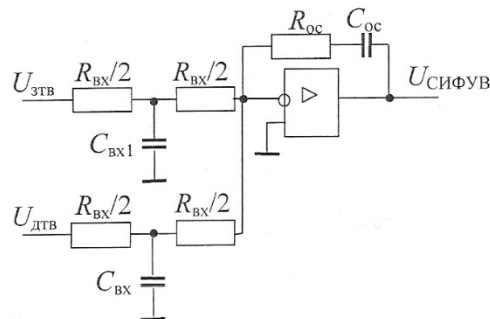


Рисунок 16 - Регулятор тока возбуждения

Принимаем:

$$\frac{R_{\text{ВХ}}}{2} = R_{\text{б.р}} = 50 \text{ кОм};$$

$$R_{\text{ОС}} = K_{\text{р}\phi} \cdot R_{\text{ВХ}} = 26 \cdot 100 = 2600 \text{ кОм};$$

$$C_{\text{ВХ}} = \frac{T_{\phi}}{R_{\text{ВХ}}} = \frac{4 \cdot 0,0017}{100} = 0,06 \cdot 10^{-6} \text{ Ф};$$

$$C_{\text{ОС}} = \frac{4T_{\text{р}\phi}}{R_{\text{ВХ}}} = \frac{4 \cdot 0,07}{100} = 2,8 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}.$$

Структурная схема ЭДС представлена на рисунке 17.

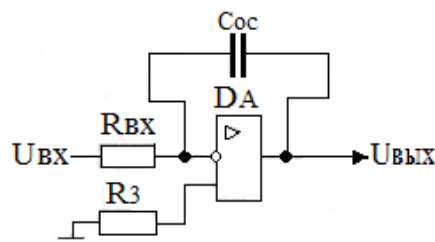


Рисунок 17 - Регулятор ЭДС

Принимаем:

$$\frac{R_{\text{ВХ}}}{2} = R_{\text{б.р}} = 50 \text{ кОм};$$

$$R_{\text{ОС}} = K_{\text{р}\phi} \cdot R_{\text{ВХ}} = 1 \cdot 300 = 300 \text{ кОм};$$

$$C_{\text{ВХ}} = \frac{T_{\phi}}{R_{\text{ВХ}}} = \frac{4 \cdot 0,04}{300} = 0,5 \cdot 10^{-6} \text{ Ф};$$

$$C_{\text{ОС}} = \frac{4T_{\text{р}\phi}}{R_{\text{ВХ}}} = \frac{4 \cdot 0,07}{300} = 0,2 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}.$$



#### 4. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРОЕКТА

Правильность выбора той или иной схемы сказывается на электросбережении всего цеха и на стоимости готовой продукции. Для этой цели и проводится технико-экономический расчёт, который позволяет выяснить правильность выбора оборудования для данного прошивного стана.

Расчёт экономического эффекта при применении такой схемы для главного привода прошивного стана трубопрокатного агрегата ТПА 30-102 выполнен на основе сравнения реверсивного тиристорного преобразователя КУВ $\frac{3200 \times 6}{10 \times 2}$  АМ и тиристорного электропривода Simoreg-DC-Master 6RA7095-4LV62. В настоящее время на трубопрокатном стане для питания якорной цепи двигателя главного привода установлен реверсивный тиристорный преобразователь. КУВ $\frac{3200 \times 6}{10 \times 2}$  АМ. Замена на современные тиристорные преобразователи приводит к повышению надёжности электрооборудования и даёт ощутимый экономический эффект, так как это оборудование имеет меньшую стоимость и значительно удобной и надёжной в эксплуатации.

В данной дипломной работе осуществлена замена тиристорного преобразователя КУВ $\frac{3200 \times 6}{10 \times 2}$  АМ на тиристорный электропривод КТЭУ – 4000/930Е - 12Т208ДТ54-УХЛ4 который обладает рядом преимуществ: высокое быстродействие, высокая надёжность, малые габариты, возможность применения прогрессивных технологических методов, применим ряд технологических решений, обеспечивающих высокое качество управления, удобство эксплуатации и настройки.

Состав капитальных затрат:

- 1) стоимость основного оборудования;
- 2) транспортные расходы;
- 3) стоимость монтажных и наладочных работ.

Для экономического обоснования вариантов необходимо рассматривать только изменяющиеся статьи эксплуатационных расходов. При расчёте вариантов

стоимость двигателя главного привода и вспомогательных механизмов принимается одинаково для обоих вариантов и учитываться не будет. При расчёте капитальных затрат не учитываем стоимость повторяющихся в каждом варианте элементов и аппаратов, имеющие одинаковые параметры и стоимость [12,13].

Эксплуатационные расходы:

- 1) амортизационные отчисления;
- 2) расходы на ремонт оборудования.

Стоимость потерь электроэнергии и расходы не учитываем, так как они одинаковы для обоих вариантов.

Расчёт балансовой стоимости действующего оборудования на основе реверсивного тиристорного преобразователя КУВ $\frac{3200 \times 6}{10 \times 2}$  АМ (таблица 7).

Таблица 7 - Балансовая стоимость действующего оборудования

Наименование	Руб.
1.Преобразователь КУВ $\frac{3200 \times 6}{10 \times 2}$	72341
2.Преобразователь для цепи возбуждения ВУК 50/500	914
3.Шкаф с блоками	15716
4.Сглаживающий реактор	21070
5.Масленный выключатель	3317
Монтаж и наладка	
Установка КУВ $\frac{3200 \times 6}{10 \times 2}$	5432
Установка ВУК 50/500	523
Монтаж шкафов с блоками УБСР-АИ	602
Монтаж	498
Установка сглаживающего реактора	130
Наладочные работы	15331
Итого	135464

Транспортные расходы:

Транспортные расходы принимаем в размере 5% от стоимости оборудования:

$$K_{\text{тр}1} = 0,05 \cdot 113448 = 5672,4 \text{ руб.}$$

Суммарная стоимость оборудования, действующего варианта:

$$K_{01} = K_{11} + K_{21} + K_{\text{тр}} = 113448 + 22016 + 5672,4 = 141136,4 \text{ руб.}$$

### Эксплуатационные расходы

Амортизационные отчисления. Затраты на амортизацию оборудования определяются из его балансовой стоимости и нормы амортизационных отчислений на реновацию:

$$A_1 = K_{o1} \cdot a_p = 141136,4 \cdot 0,1 = 14113,64 \text{ руб.}$$

где  $a_p$  – средневзвешенная годовых амортизационных отчислений.

Расходы на ремонт. Затраты на ремонт и содержание оборудования складываются из основной и дополнительной заработной платы, стоимости материалов и согласно единой системы ППР:

$$P_1 = (T_{\Sigma} \cdot Z_{и} \cdot K) \cdot R,$$

где  $T_{\Sigma}$  – трудоёмкость ремонта в нормочасах;

$Z_{и} = 142,69$  руб. – часовая тарифная ставка рабочих ремонтной бригады 5 разряда.

$K$  – коэффициент, учитывающий премию, дополнительную заработную плату, ремонтный коэффициент и отчисления;

$R = 20$  – ремонтная сложность электрооборудования.

$$T_{\Sigma} = T_1 m_{т} + T_2 m_{ср} = 1,2 \cdot 3 + 7 \cdot 1 = 10,6 \text{ чел./час.}$$

где  $T_1, T_2$  – нормативная трудоёмкость чел./час;

$m_{т}$  – количество текущих ремонтов в год;

$m_{ср}$  – количество средних ремонтов в год.

$$K = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 = 1,35 \cdot 1,15 \cdot 1,356 = 2,105,$$

где  $K_1 = 35\%$  – дополнительная заработная плата;

$K_2 = 15\%$  – районный коэффициент;

$K_3 = 30\%$  – страховой взнос.

Таким образом расходы на ремонт составят:

$$P_1 = 10,6 \cdot 142,69 \cdot 2,105 \cdot 20 = 63676,84 \text{ руб.}$$

Суммарные эксплуатационные расходы действующего варианта:

$$C_{\Sigma} = A_1 + P_1 = 141113,64 + 63676,84 = 204790,48 \text{ руб.}$$

Расчёт затрат при модернизированном спроектированном оборудовании на основе тиристорного электропривода Simoreg-DC-Master 6RA7095-4LV62 приведены в таблице 8.

Таблица 8 - Затраты на модернизацию

Наименование	Руб.
1 Комплектное тиристорное устройство со встроенными возбудителем, шкафами.	108322,0
2 Стоимость монтажа и наладки.	2317,0
3 Транспортные расходы.	5416,1
Итого	116055,1

$$K_{\text{тр2}} = 0,05 \cdot 108322 = 5416,1 \text{ руб.}$$

Общие капитальные затраты на проект:

$$K_{02} = K_{12} + K_{22} + K_{\text{тр2}} = 108322 + 2317 + 5416,1 = 116055,1 \text{ руб.}$$

Эксплуатационные расходы

Амортизационные отчисления. Затраты на амортизацию оборудования определяются из его балансовой стоимости и нормы амортизационных отчислений на реновацию [14,16]:

$$A_2 = 0,1 \cdot K_{02} = 0,1 \cdot 116055,1 = 11605,51 \text{ руб.}$$

Расходы на ремонт по проектному варианту:

$$P_2 = (T_{\Sigma} \cdot Z_{\text{и}} \cdot K) \cdot R = 9,4 \cdot 142,69 \cdot 2,105 \cdot 20 = 56468,14 \text{ руб.}$$

где  $T_{\Sigma} = T_1 m_T + T_2 m_{\text{ср}} = 1,2 + 2 + 7 \cdot 1 = 9,4 \text{ чел./час.}$

Суммарные эксплуатационные расходы по проектному варианту:

$$C_{\Sigma 2} = A_2 + P_2 = 11605,51 + 56468,14 = 68073,65 \text{ руб.}$$

## Оценка экономической эффективности инвестиций

В настоящее время стан ТПА 30-102 осуществляет прошивку труб из требуемой марки стали 30ХГСНМА-ВД производительностью 120 м/час.

По технической характеристике стана прошивка заготовки осуществляется при различной скорости прошивки. От скорости прошивки зависит производительность стана. В данном дипломном проекте сравниваем и проводим расчёт прошивки заготовки номинальной и 20% выше номинальной, из опытов увеличение скорости прошивки на повышенной не понижает качества трубы, не приводит к увеличению её брака и расхода инструмента. Величина необходимого тягового усилия и механические свойства металла тоже мало зависят от скорости прошивки.

В данном дипломном проекте осуществлено увеличение скорости прошивки за счёт увеличения мощности главного привода стана. Прошивка заготовки всех труб производится на повышенной скорости. Производительность стана увеличивается.

Исходя из часовой производительности стана и процентного соотношения производства труб при разной скорости прошивки на стане определим производительность проектируемого стана при прошивке на номинальной скорости.

Прошивка заготовки на номинальной скорости производится со скоростью 120 м/час, а прошивка заготовки на повышенной скорости составляет 132 м/час. Следовательно, производительность стана увеличивается на 9,4%.

Фактическое время работы:

$$T_{\phi} = 5760 \text{ часов.}$$

Годовая производительность стана:

$$П_{г1} = П_1 \cdot T_{\phi} = 120 \cdot 5760 = 691200 \text{ м,}$$

где  $T_{\phi}$  – фактическое время работы стана,

$П_1$  – производительность стана до модернизации (м. в год).

Годовая производительность при увеличении скорости прошивки:

$$П_{г2} = П_2 \cdot T_{\phi} = 132 \cdot 5760 = 760320 \text{ м,}$$

где  $P_2$  – производительность стана после модернизации (м. в год).

Экономия достигается в результате повышения производительности стана за счёт сокращения условно – постоянных расходов:

$$\begin{aligned} \Delta_{y.n} &= \left( C_{y.n} - C_{y.n} \cdot \frac{P_{r1}}{P_{r2}} \right) \cdot P_{r2} = \left( 0,288 - 0,288 \cdot \frac{691200}{760320} \right) \cdot 760320 = \\ &= 199\,065,3 \text{ руб}, \end{aligned}$$

где  $C_{y.n} = 0,288$  – руб. условно постоянные расходы (по данным ОАО «ПНТЗ»)

Срок окупаемости:

$$T_{ок} = \frac{K_{02}}{\Delta_{y.n}} = \frac{116055,1}{199065,3} = 0,59 \text{ года.}$$

В таблице 9 приведены технико-экономическим показатели.

Таблица 9 - Техничко-экономические показатели

Наименование показателей	Единицы измерения	Существующие оборудование	Проектируемое оборудование
1.Стоимость оборудования	тыс. руб.	113448	108322,0
2 Капитальные затраты	руб.	–	116055,1
3 Эксплуатационные расходы	руб.	204790,48	68073,65
4Амортизационные отчисления	руб.	192053	11605,51
5.Стоимость ремонта	руб.	5935,260	4640,74
6.Рост производительности	%	–	9,40
7.Экономия на эксплуатационных расходах	руб.	–	25081,30
7.Экономия на условно-постоянных расходах	руб.	–	199065,30
8.Срок окупаемости	год	–	1 год

Вывод: В результате проведенных мероприятий по модернизации оборудования экономические расчёты показали эффективность проведения реконструкции, после которой ожидается снижение эксплуатационных расходов за счёт роста производительности прошивного стана.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной дипломной работе разработан электропривод постоянного тока и система двузонного регулирования скорости для головного стана трубопрокатного агрегата по производству горячекатаных бесшовных труб народнохозяйственного значения – прошивного стана с индивидуальным приводом валков от электродвигателя постоянного тока тип П2-20/40-2,5УХЛ4.

Мощность 2500кВт, напряжение якоря 930В, ток якоря цепи 2870А, обороты 125/250 в минуту (скорость вращения).

В качестве источника питания управления для главного привода прошивного стана принят комплектный тиристорный электропривод постоянного тока типа КТЭУ 4000/930 (модернизированный). Указанный КТЭУ позволяет обеспечить прошивку заготовки в гильзу для всех марок сталей, которые требуются для производства чистовой трубы диаметром от 20 до 110 мм с толщиной стенки от 3,5 до 8 мм. Примененный КТЭУ позволяет поддерживать заданную скорость прошивки с точностью не хуже 0,5% и временем восстановления заданной скорости в течении 0,5 секунды. В КТЭУ применена двузонная система регулирования скорости двигателя прошивного стана, которая позволяет обеспечить двузонное регулирование скорости. Реализация двузонной системы регулирования выполняется в двух вариантах.

1 вариант: аналоговая система регулирования на элементах УБСР-АИ (унифицированная блочная система регуляторов-аналоговая, интегральная). При модернизации указанная система легко заменяется на цифровую микропроцессорную систему регулирования фирмы Siemens, при этом силовая часть комплектного тиристорного электропривода сохраняется существующей. Силовые тиристоры остаются отечественными в связи с их высокой надежностью и значительно меньшей стоимостью.

Применение источника питания и управления типа КТЭУ вызваны необходимостью обеспечить унификацию силового оборудования с другими

главными приводами трубных станов, входящих в состав трубопрокатного агрегата ТП2 30-102.

В дипломной работе выполнена экономическая часть полученные расчеты показывают хороший срок окупаемости примененного электрооборудования-1 год.

Проведённое технико-экономическое обоснование проекта доказывает целесообразность принятого решения по замене существующего электрооборудования.

При работе над дипломной работой широко использовано современное научно-техническая справочная литература, а также методические разработки кафедры ФЭУ.



## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. 3-е изд., испр.- М.: Наука, 2004. 767с.
2. Вольдек А.И. Электрические машины: Учебник для студентов высш. техн. учебн. заведений. 3-е изд., перераб. Л.: Энергия, 2009. 832с.
3. Евстафиева С. В. Протокол PROFIDRIVE в задачах управления электроприводом / С. В. Евстафиева, А. Е. Сорокоумов // Модернизация машиностроительного комплекса России на научных основах технологии машиностроения (ТМ-2011) : сб. тр. междунар. науч.-техн. конф. – Брянск, 2011. – С. 269-270
4. Ключев В.И. Теория электропривода: Учеб. Для вузов. М.:Энергоатомиздат, 2008. 704с.
5. Браславский И.Я., Лихошерст В.И. Полупроводниковые преобразователи электрической энергии для электроприводов с двигателями постоянного тока: Учебное пособие. Свердловск: УПИ, 2004. 80с.
6. Экономическая теория. /Под ред. А.А.Кочеткова. — М.: Дашков и К. — 2011. – 696с.
7. Особенности систем двухзонного регулирования скорости: Методические указания к проекту/ М.Ю. Бородин, В.П. Метельков. Свердловск: УПИ, 2011. 29с.
8. Система автоматизации S7-200. Системное руководство. Выпуск 1, 2010. 384с.
9. Туровец О.Г. Гилянкис В.Д. Вопросы экономики и организации производства в дипломных проектах. М.: Высшая школа, 1988. 174с
10. Терехов В.М., Осипов О.И. Системы управления электроприводов. – Учебник. – М.: Академия, 2005. – 304с.
11. Микроэкономика: учебное пособие / А.Г. Ивасенко, Я.И. Никонов. – М.: КноРус. 2013.
12. Основы экономической теории /Н.П. Костеров. – М.: Академия; Московские учебники. – 2011.

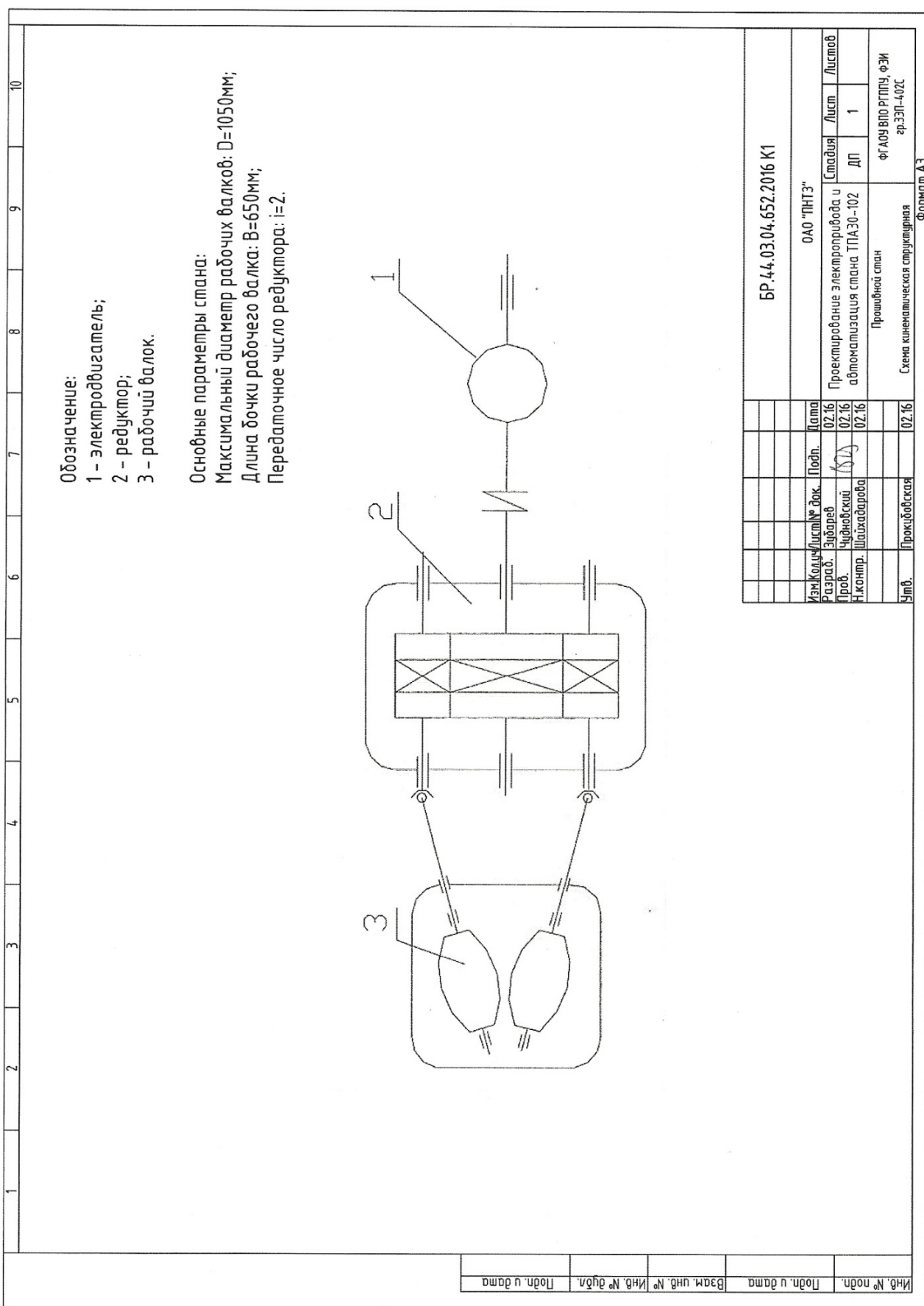
13. Современная экономическая теория. /Под ред. Дж. Харвея. — М.: Юнити-Дана. — 2012. — 703 с.

14. Терехов В. М. Системы управления электроприводов. / В.М. Терехов, О.И. Осипов; под ред. В.М. Терехова. – М.: Изд-во Академия, 2008. – 304 с.

Экономическая теория. Учебник. /Под ред. В.И.Видяпина. — М.: ИНФРА. — 2011. — 714 с.



# ПРИЛОЖЕНИЕ Б



Обозначение:

- 1 - электродвигатель;
- 2 - редуктор;
- 3 - рабочий валок.

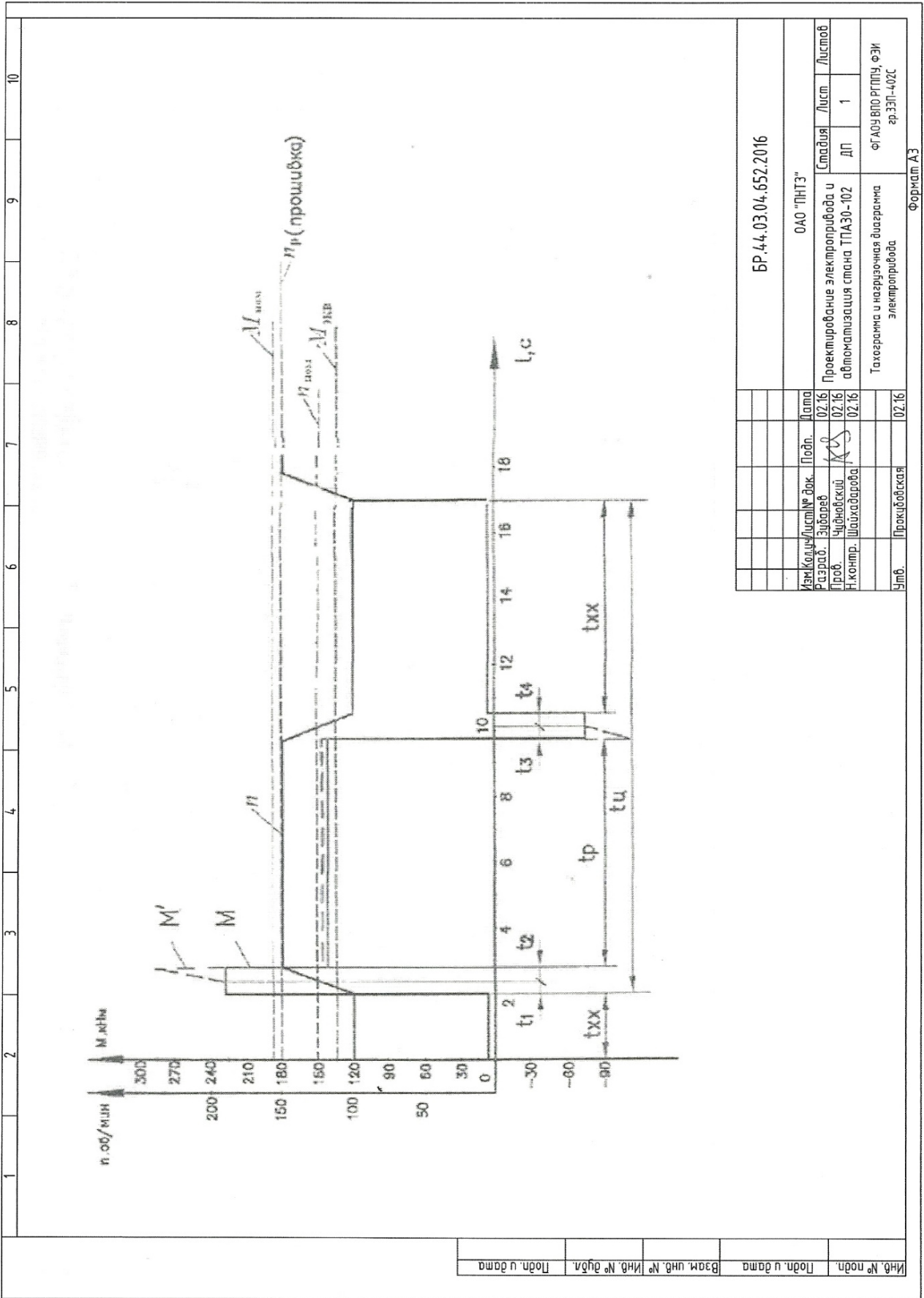
Основные параметры стана:

Максимальный диаметр рабочих валков:  $D=1050\text{мм}$ ;  
 Длина бочки рабочего валка:  $V=650\text{мм}$ ;  
 Передаточное число редуктора:  $i=2$ .

Инд. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инд. № инв.	Инд. № дудл.	Подп. и дата
--------------	--------------	--------------	-------------	--------------	--------------

БР.44.03.04.652.2016 К1					
ОАО "ПНТЗ"					
Изм.	Кол.	Лист	№ док.	Подп.	Дата
			Эдвард		02.16
			Чудновский		02.16
			Шайдарова		02.16
Проектирование электропривода и автоматизация стана ТПА30-102			Складия		
Проектный стан			Лист		
Схема кинематическая структурная			ДП		
Формат А3			1		
ФГАОУ ВПО РГПУ, ФЭИ			ер.ЭЭП-402С		

# ПРИЛОЖЕНИЕ В



Изм.	Кол.	Лист	№ док.	Подп.	Дата
Разработ.	Эксперт	02.16			
Проект.	Чудновский	02.16			
Н.контр.	Шойдарова	02.16			
Умб.	Преклюбовская	02.16			

БР.4.4.03.04.652.2016

ОАО "ПНТЗ"

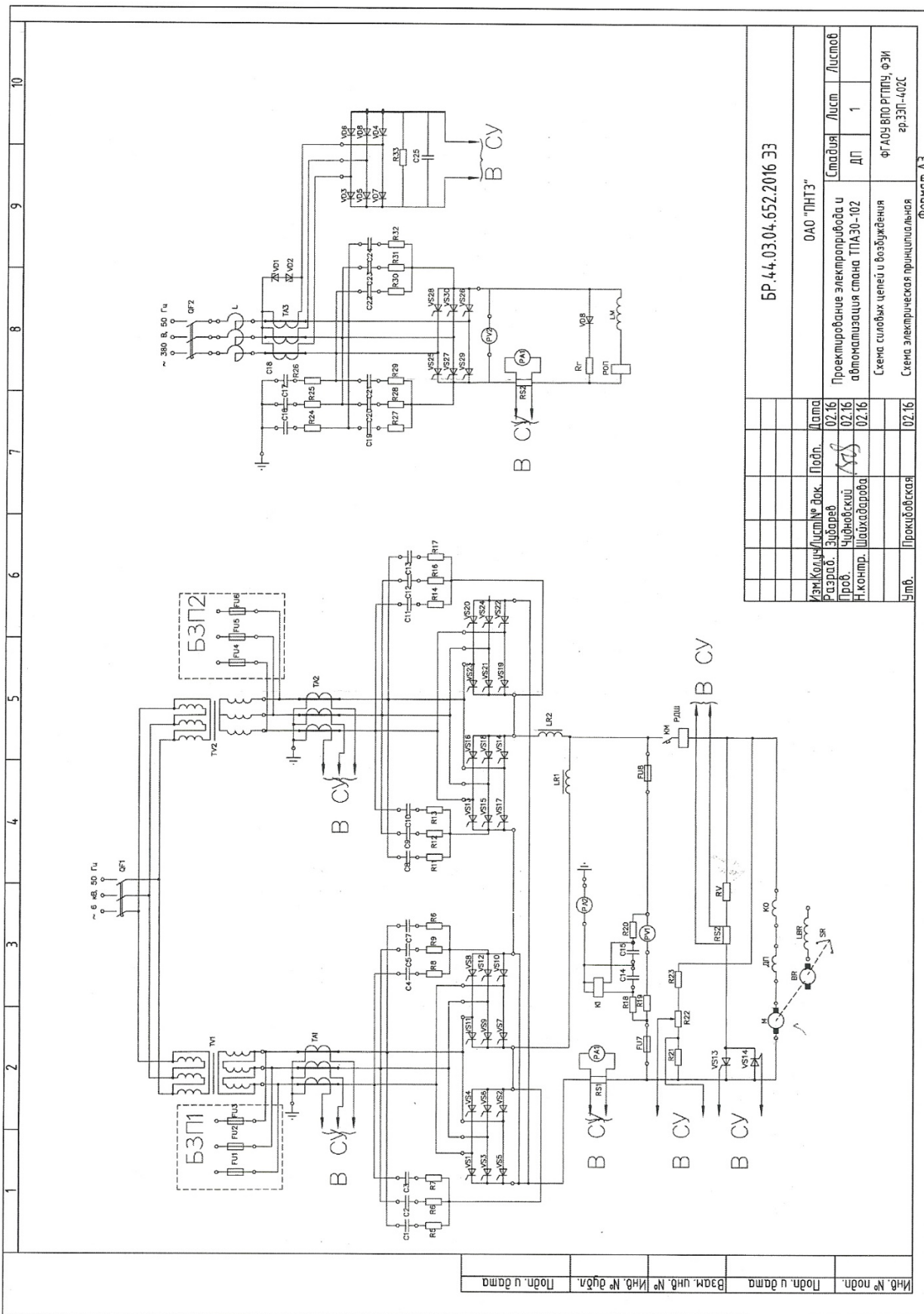
Проектирование электропровода и автоматизация стана ТПА30-102	Лист	Листов
ДП	1	

Техсхема и накрывочная диаграмма электропровода

Формат А3

Инд. № подл.	Подп. и дата	Взам. инд. №	Инд. № подл.

# ПРИЛОЖЕНИЕ Г

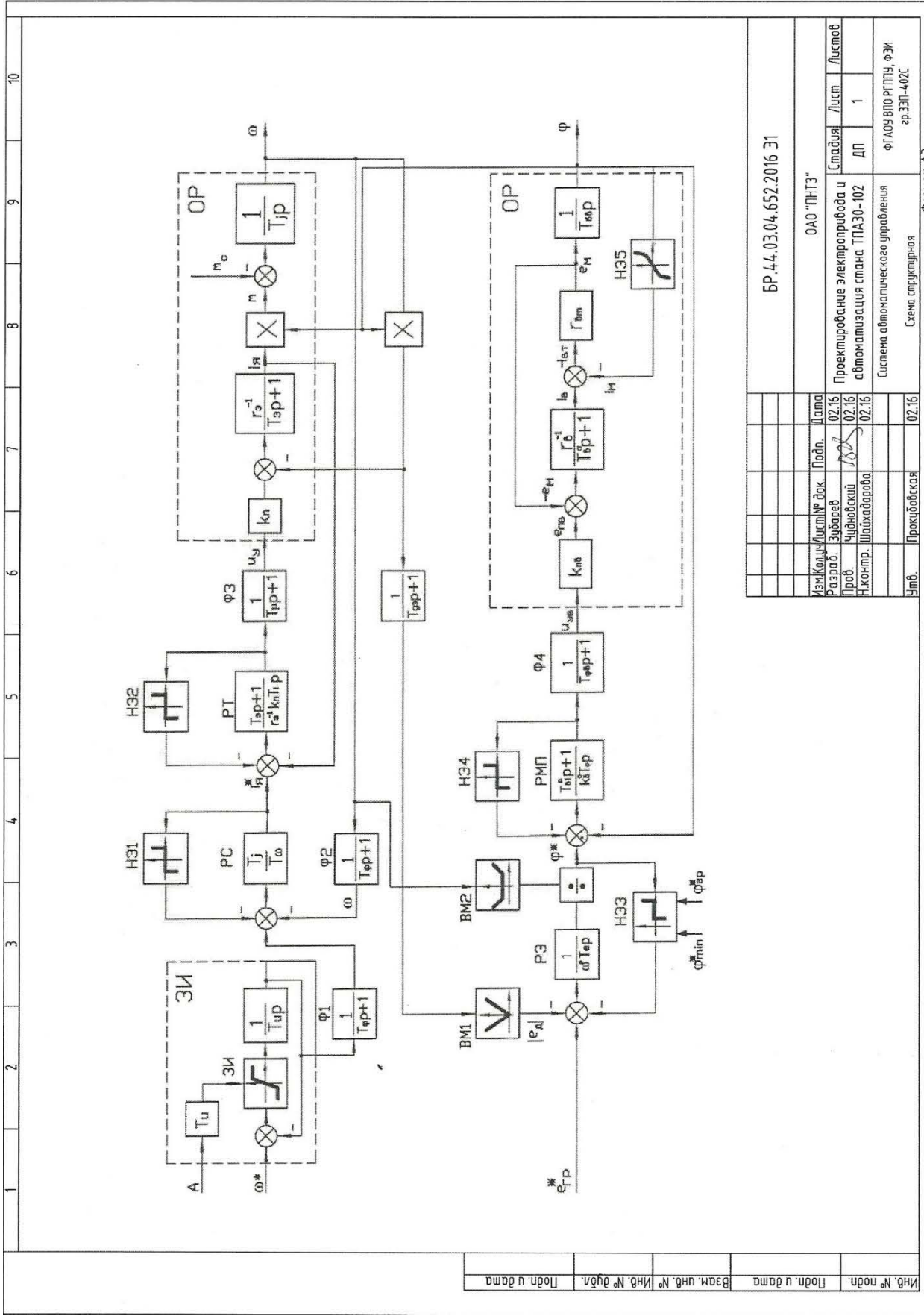


БР 44.03.04.652.2016 ЭЗ	
ОАО "ПНТЗ"	
Проектирование электроприбора и автоматизация стана ТПА30-102	
Изм./Корр./Лист	Дата
Разработ. Зубарев	02.16
Проб. Чудовский	02.16
Н.контр. Шахобарова	02.16
Учв. Проклябовская	02.16
Схема силовых цепей и возбуждения	
Схема электрическая принципиальная	
Формат А3	

10 9 8 7 6 5 4 3 2 1

И№, № подл. Подл. и дата  
Вам. И№, № дубл. И№, № дубл.  
И№, И№, № И№, № дубл. И№, № дубл.

# ПРИЛОЖЕНИЕ Д



1    2    3    4    5    6    7    8    9    10

БР.44.03.04.652.2016 Э1		ОАО "ПНТЗ"	
Изм./Кодч./Лист/№ док.	Дата	Статус/Лист	Листов
Разраб. Зубарев	02.16	ДП	1
Проб. Чудовский	02.16		
Инспр. Шахадарова	02.16		
Система автоматического управления		ФГАОУ ВПО РГПУ, ФЭИ	
Умб. Прокцобская		Схем. структурная	
		Формат А3	

Имб. № подл.	Взам. умб. №	Имб. № дубл.	Подл. и дата