

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

**ГЛАВНЫЙ ПРИВОД РЕДУКЦИОННОГО СТАНА
ТРУБОПРОКАТНОГО АГРЕГАТА**

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

Идентификационный код ВКР: 156

Екатеринбург 2016

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа выполнена на 65 страницах, содержит 15 рисунков, 3 таблицы, 20 источника литературы, а также 6 приложения.

Ключевые слова: ТРУБОПРОКАТНЫЙ АГРЕГАТ, ГЛАВНЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД, ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС, КЛЕТЬ, РЕДУКЦИОННЫЙ СТАН.

Объектом исследования выпускной квалификационной работы является электрооборудование главного привода редукционного стана трубопрокатного агрегата ТПА-80.

Предметом исследования является главный привод редукционного стана трубопрокатного агрегата ТПА-80.

Цель работы – выполнить разработку главного привода редукционного стана трубопрокатного агрегата ТПА-80.

Данная ВКР посвящена разработке главного привода редукционного стана трубопрокатного агрегата ТПА-80 горячей прокатки.

Дано описание технологического процесса стана и его характеристики, представлена кинематическая схема одной клетки стана. Сформулированы требования к электроприводу.

Произведён выбор типа электропривода. На основании исходных данных рассчитана мощность электродвигателя одной клетки, и выбранный двигатель проверен по нагреву и перегрузочной способности.

Произведен технико-экономический расчет эффективности проекта от внедрения нового оборудования.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
1 ОПИСАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ТРУБОПРОКАТНОГО АГРЕГАТА ТПА-80.....	8
2 ОПИСАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА РЕДУКЦИОННОГО СТАНА.....	14
2.1 Устройство и характеристика редукционного стана	14
2.2 Требования к главному электроприводу редукционного стана.....	15
3. ВЫБОР ОСНОВНОГО ОБОРУДОВАНИЯ	17
3.1 Выбор типа электропривода одной клетки редукционного стана.....	17
3.2 Поверочный расчет мощности электродвигателя	17
3.3 Проверка двигателя на нагрев	22
3.4 Проверка двигателя по перегрузочной способности	23
4 ВЫБОР ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО АГРЕГАТА	24
4.1 Выбор преобразователя для питания двигателей главного привода.....	24
4.2 Тиристорный преобразователь.....	25
4.3 Двигатель с механизмом	27
4.4 Двигатель с тиристорным преобразователем	27
4.5 Расчет режимов преобразователя.....	28
5 РАСЧЕТ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ, ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ РЕГУЛЯТОРОВ.....	31
4.1 Выбор системы автоматического регулирования	31
4.2 Разработка функциональной схемы.....	33
4.3 Разработка структурной схемы	36
4.4 Расчет контура тока якоря	39
4.5 Расчет контура скорости	41

4.6 Расчет задатчика интенсивности.....	43
4.7 Расчет напряжений ограничения регулятора мощности	45
4.8 Расчет ограничения di/dt	45
4.9 Расчет системы возбуждения.....	46
5 ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ РАСЧЕТЫ	53
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	56
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	58
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	60
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	61
ПРИЛОЖЕНИЕ В	62
ПРИЛОЖЕНИЕ Г.....	63
ПРИЛОЖЕНИЕ Д.....	64
ПРИЛОЖЕНИЕ Е	65

ВВЕДЕНИЕ

Рост производства горячекатаных, стальных бесшовных труб является одним из приоритетных направлений мировой и отечественной трубной промышленности.

Характерной чертой технологического процесса трубопрокатного производства в настоящее время является применение научно-технических достижений в области автоматизированного электропривода систем автоматического регулирования, устройств вычислительной техники и логического управления. При этом обеспечивается рост качества выпускаемых труб (прокатка с минусовыми допусками при получении заданной точности геометрических размеров по наружному диаметру, толщине стенки, обеспечении минимальной продольной и поперечной разнотолщинности готовой трубы).

Техническое перевооружение и реконструкция уже действующего и отлаженного производства является наиболее эффективным способом достижения заданных показателей по увеличению роста производства трубной продукции при наименьших капитальных затратах.

Реконструкция существующего в настоящее время трубопрокатного производства горячекатаных бесшовных труб в цехе ОАО «Синарский трубный завод» заключается в модернизации его редуционного стана.

Результатом реконструкции является повышение производства и качества готовых труб.

Темой выпускной квалификационной работы является разработка автоматизированного электропривода редуционного стана с индивидуальным приводом клеток трубопрокатного агрегата ТПА-80 на базе научно-технических разработок в области силовой преобразовательной техники и унифицированных систем подчиненного регулирования координат электроприводов постоянного тока с двухзонным управлением.

Объектом исследования выпускной квалификационной работы является электрооборудование главного редукционного стана трубопрокатного агрегата ТПА-80.

Предметом исследования является главный привод редукционного стана трубопрокатного агрегата ТПА-80.

Цель работы: выполнить разработку главного привода редукционного стана трубопрокатного агрегата.

Задачи выпускной квалификационной работы:

1. Описать технологический процесс;
2. Выбрать подходящий электропривод;
3. Рассчитать мощность электродвигателя;
4. Проверить электродвигатель на нагрев;
5. Проверить электродвигатель по перегрузочной способности;
6. Выбрать преобразовательный агрегат;
7. Рассчитать систему автоматического управления;
8. Выбрать параметры регуляторов;
9. Произвести технико-экономическое обоснование проекта.

1. ОПИСАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ТРУБОПРОКАТНОГО АГРЕГАТА ТПА-80

Трубопрокатный агрегат ТПА-80 предназначен для производства горячекатаных стальных бесшовных труб. Готовые трубы используются для нефтяной, газовой промышленности и других отраслей народного хозяйства.

Для изготовления труб применяют заготовку диаметром 150 мм.



Рисунок 1 – Заготовка.

При приёмке производится взвешивание пакетов заготовки, визуальный контроль поверхности и выборочно проверяют: диаметр, длину штанг (6-12 м) и маркировку. Предельные отклонения по диаметру - ± 1 мм, по длине - +60 мм. Измерение диаметра штанг производят с помощью кронциркуля и металлической измерительной линейки, длину - с помощью рулетки.

Из особенностей конструкции секционных печей в прокатку задаются штанги мерной или кратной длины. Загрузка штанг на рольганги секционных печей осуществляется в шахматном порядке.

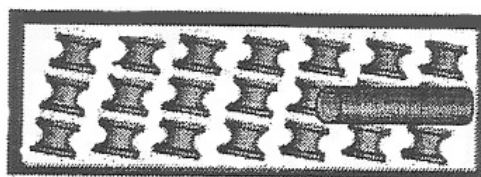


Рисунок 2 – Загрузка заготовки в нагревательные секционные печи

Нагрев заготовки до заданной температуры производят равномерно по длине и сечению в нагревательных секционных печах непрерывного действия, состоящих из секционной нагревательной части и камеры выдачи (8 зон, 51 секция). Для работы используется природный газ.

Разрезка нагретой в печи заготовки производится на ножницах консольного типа с нижним резом.

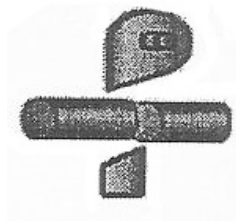


Рисунок 3 – Ножницы горячей резки

Резка заготовки производится на длину в соответствии с графиком проката. Установку упора на заданную длину заготовки производит оператор. Длина последней отрезаемой заготовки мерной штанги должна находиться в пределах ± 25 мм от установленного раскроя.

После резки заготовка попадает в прошивной стан.

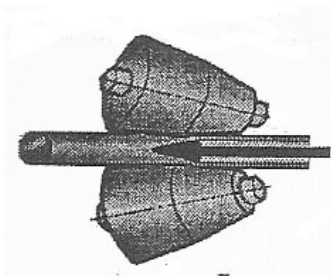


Рисунок 4 – Прошивной стан

Прошивка заготовки производится с целью получения полый гильзы из сплошной заготовки. Для устойчивого протекания процесса ось заготовки, лежащей в приемном желобе, совмещают с осью прошивки. В валки прошивного стана заготовка подается пневматическим вталкивателем через вводную проводку. Валки рабочей клетки приводятся в действие электродвигателем через шестеренную клетку, соединенную с рабочей клетью универсальными шпинделями на подшипниках качения.

Очаг деформации прошивного стана формируется валками и линейками. Нижняя линейка закрепляется в линейкодержателе неподвижно, верхняя закреплена в траверсе, которая может перемещаться вверх или вниз. Положением верхней линейки регулируют степень овализации гильзы. Валки, линейки и оправка, за исключением специально оговоренных случаев, непрерывно охлаждаются водой.

После прошивного стана полученная гильза попадает в непрерывный стан.

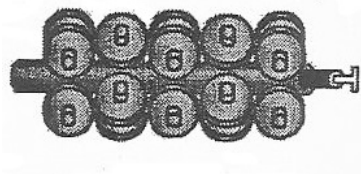


Рисунок 5 – Непрерывный стан

Прокатку труб в непрерывном стане производят для получения «черновых» труб с заданной толщиной стенки.

Гильза по рольгангу доходит до упора и пальцами выбрасывателя передаётся на наклонную решётку, на которой установлен специальный дозатор. Далее гильза по наклонной решётке поступает на входную сторону непрерывного стана, где в неё вводится оправка.

Для введения оправки гильза прижимается рычагом, который приводится в движение от пневматического цилиндра.

Непрерывный стан, предназначенный для прокатки труб одного диаметра, имеет девять двухвалковых клеток, установленных на общем постаменте. Клетки расположены взаимно-перпендикулярно и попеременно образуют угол 45° к горизонту. Все девять рабочих клеток стана одинаковы и только первая и последняя клетки имеют соответственно вводную и выводную проводки. Кроме того, на предчистовых клетях № 6 и 7 установлены электрогидравлические наемные механизмы системы гидроутончения концов труб.

Нагрев черновых труб в индукционных печах производится для повышения и выравнивания температуры по длине и сечению перед редуцированием или калиброванием.

Перед редуцирующим станом установлено 14 индукторов мощность 12000 кВт и частотой 2500 Гц.

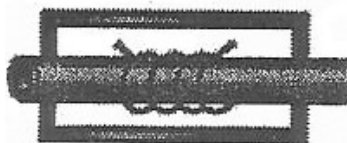


Рисунок 6 – Индукционные подогревательные установки

Индукционные установки оборудованы системой регулирования температуры, обеспечивающей выравнивание температуры трубы по ее длине в пределах 50°C, высокочастотными ИК-пирометрами «Термоскоп-004 (ТС-004), измерителями-регуляторами технологическими ИРГ 5920, безбумажными регистраторами «ЭКОГРАФ». Выравнивание температуры труб по длине осуществляется за счет изменения мощности генераторов и времени задержки на их включение.

После нагрева «черновая» труба попадает в редуционный стан.

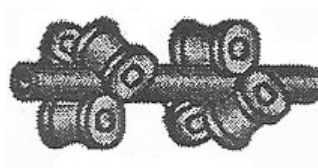


Рисунок 7 – 20-ти клетевой редуционный стан

Редуцирование труб производят для получения необходимого диаметра и толщины стенки. На 20-ти клетевом редуционном стане осуществляют прокатку труб диаметром от 32 до 114 мм.

После 20-ти клетевого редуционного стана трубы разрезают летучей пилой горячего резания фирмы «KOCKS» на длины 10,0-24,0 м.

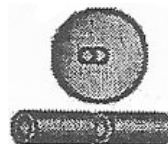


Рисунок 8 – Летучая пила «KOCKS»

Летучая пила установлена в линии за редуционным станом, ее назначение заключается в резке, выходящей из редуционного стана трубы в соответствии с заданием заказа.

Разрезанная труба транспортируется по разгонному рольгангу со скоростью до 11-13 м/с, с тем чтобы обеспечить разрыв между трубами перед их поступлением в сбрасывающее устройство. Затем, попадая в паз между его рёбрами, труба тормозится и благодаря вращению барабана сбрасывается на настил винтовой секции охлаждающего стола.

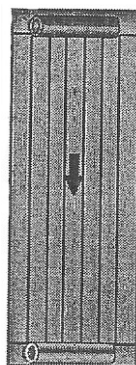


Рисунок 9 – Охладительный стол

Охладительный стол предназначен для охлаждения и транспортировки труб длиной 10,0; 24,0 м. На участке охлаждающего стола производится отбор технологических проб от готовых труб.

Технологические пробы служат для контроля размеров, качества наружной и внутренней поверхностей труб в процессе настройки стана и периодического контроля труб для своевременного устранения возникающих несоответствий.

Отделка труб на поточных линиях включает в себя операции правки, резки, торцовки, продувки, а также ремонта (дополнительной подрезки и/или торцовки) забракованных труб, целью которых является придание трубам свойств, требуемых заказом. Поточных линий шесть.

Правку труб в холодном состоянии осуществляют для устранения кривизны труб на 7- валковых правильных станах типа «20-114».

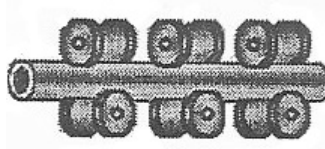


Рисунок 10 – Правильный стан

Резку труб осуществляют для получения необходимых длин готовых труб, обрезки утолщенных концов, подрезки переднего и заднего концов каждой трубы после правильного стана на дисковых трубоотрезных станках конструкции УЗТМ.

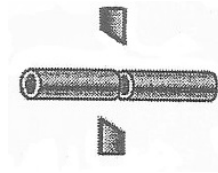


Рисунок 11 – Трубоотрезной станок

Торцовку труб производят для получения торцов труб без заусенцев и вырывов перпендикулярных к продольной оси. Она осуществляется на трубоподрезных станках моделей 2К84 и 2К84А. установленных попарно в линиях отделки.

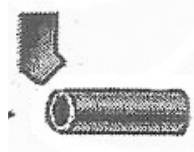


Рисунок 12 – Трубоподрезной станок

После операции торцовки производится удаление окалина и стружки из труб параллельно оси трубы. При пересечении трубой осей форсунок окалина выдувается струёй воздуха. После продувки трубы поступают на инспекционные столы УТК.

2. ОПИСАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА РЕДУКЦИОННОГО СТАНА

2.1. Устройство и характеристика редуционного стана

Редуционный стан предназначен для редуцирования черновой трубы в чистовую, что означает её удлинение в 2-4 раза и уменьшение её наружного диаметра до заданного значения для готовой трубы при сохранении внутреннего диаметра неизменным.

Редуционный стан состоит из 20-ти последовательно расположенных двухвалковых клеток, идентичных по конструкции. Каждая клетка приводится во вращение от индивидуального электродвигателя постоянного тока через понижающий цилиндрикоконический редуктор. Вращение от редуктора к рабочим валкам передается через шестерённую клетку.

Стальные литые станины рабочих клеток стана сделаны в виде разъемных коробок с проемами для подушек рабочих валков. Установка рабочих валков по высоте осуществляется нажимными винтами, которые приводятся во вращение вручную. По оси валки регулируются рычажно-винтовыми устройствами, расположенными на подушках с неприводной стороны клетки. Максимальная длина прокатанной трубы равна 24 м.

К двигателям клеток присоединены тахогенераторы. Для питания и управления электроприводом каждой клетки выбран комплектный терристорный электропривод КТУ-320/440 в состав которого входят:

- реверсивный тиристорный якорный преобразователь;
- нереверсивный тиристорный возбудитель;
- коммутационная и защитная аппаратура;
- САР скорости двигателя постоянного тока, реализованная на блоках управления УБРС-АИ (унифицированная блочная система регуляторов – аналоговая, на интегральных системах).

Регулирование скорости вращения в пределах 400-1500 об/мин. Осуществляется ослаблением поля по блочной схеме ТП-Д с двухзонной САР частоты вращения. Режим работы длительный, нормальный, нереверсивный с периодическим набросом нагрузки. Прокатка трубы проходит в каждой клетке на установившейся скорости. Управление редукционного стана (задание и коррекция скоростных режимов, цифровая индикация фактической скоростной настройки) производится от общего микропроцессорного устройства УЗС-Р.

Для повышения уровня сигнала ОС по току предусмотрена замена шунтов, установленных в КТЭ.

2.2. Требования к главному электроприводу редукционного стана

Главной особенностью прокатки труб на редукционном стане является движение трубы только в направлении прокатки и одновременное нахождение её в нескольких клетках.

Основное условие непрерывной прокатки труб – поддержание постоянства секундных объемов металла в валках клеток.

Электропривод стана должен:

- создать надежную и экономичную конструкцию, удовлетворяющую назначению стана и конкретным условиям, его установки в цехе завода;
- обеспечить прокатку труб заданного сортамента с требуемыми показателями их качества и технико-экономической эффективности всего технологического процесса;
- удовлетворять требованиям эксплуатации в части обслуживания оборудования.

Исходя из сказанного, можно сформулировать требования к электроприводу редукционного стана:

- нормальный нереверсивный режим работы длительный с периодическим набросом нагрузки – прокатка трубы в каждой клетке; прокатка трубы проходит на установившейся скорости;

- реверс аварийный;

- диапазон регулирования скорости 1 к 10;

- привод каждой клетки индивидуальный от электродвигателя постоянного тока.

Требования по быстродействию системы автоматического регулирования скорости двигателя каждой клетки. Время восстановления скорости при набросе и сбросе нагрузке не более 0,5 секунды.

3. ВЫБОР ОСНОВНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

3.1. Выбор типа электропривода одной клетки редукционного стана

При проектировании редукционного стана одним из наиболее ответственных вопросов является выбор типа привода, так как он предопределяет конструкцию стана и ряд его важнейших технико-экономических показателей.

Для каждой клетки установлен электродвигатель постоянного тока, который подключен к сети через токоограничивающий генератор. Для увеличения диапазона регулирования скорости якорная обмотка и обмотка возбуждения подключены к регулируемому источнику постоянного тока.

По технологии процесса реверс аварийный. Он может быть необходим для возврата трубы на входную сторону стана и для монтажных операций при замене клеток стана. Силовая часть электропривода выбрана по схеме ТП-Д.

Применяются комплектные терристорные электроприводы (КТЭ), в состав которых входят:

- реверсивный тиристорный якорный преобразователь;
- нереверсивный тиристорный возбудитель;
- система автоматического регулирования скорости двигателя постоянного тока, реализованная на блоках управления УБСР-АИ;
- устройства защиты;
- коммутационная аппаратура.

Задание скоростного режима электропривода осуществляется устройством задания скорости УЗС-Р.

3.2. Поверочный расчет мощности электродвигателя

Исходные данные для расчета

Редуцирование трубы 90×3,25 мм на 30×2,5 мм.

Скорость входа трубы в 1-ую клеть:

$$V_{\text{ВХ}} = 1,5 \text{ М/с.}$$

Скорость выхода из последней клетки:

$$V_{\text{ВЫХ}} = 7,2 \text{ М/с.}$$

Коэффициент вытяжки:

$$K_{\text{в}} = \frac{V_{\text{ВЫХ}}}{V_{\text{ВХ}}} = \frac{7,2}{1,5} = 4,8.$$

Скоростной режим клеток 8, 9 и 10:

Клеть 8:

$$\omega_8 = \frac{n_{\text{в8}} \cdot \pi}{30} \cdot U_8 = \frac{180 \cdot 3,14}{30} \cdot 2,8 = 52,8 \text{ 1/с.}$$

Клеть 9:

$$\omega_9 = \frac{n_{\text{в9}} \cdot \pi}{30} \cdot U_9 = \frac{194 \cdot 3,14}{30} \cdot 2,8 = 56,9 \text{ 1/с.}$$

Клеть 10:

$$\omega_{10} = \frac{n_{\text{в10}} \cdot \pi}{30} \cdot U_{10} = \frac{209 \cdot 3,14}{30} \cdot 2,5 = 54 \text{ 1/с.}$$

где $n_{\text{в}}$ – скорость волков (об/мин);

U – Напряжение редуктора.

Коэффициент фиктивного момента:

Клеть 8:

$$K_{\text{ф8}} = \frac{\omega_8}{\omega_{\text{н}}} = \frac{52,8}{41,8} = 1,26.$$

Клеть 9:

$$K_{\text{ф9}} = \frac{\omega_9}{\omega_{\text{н}}} = \frac{56,9}{41,8} = 1,36.$$

Клеть 10:

$$K_{\text{ф10}} = \frac{\omega_{10}}{\omega_{\text{н}}} = \frac{54}{41,8} = 1,29.$$

Для расчетов моментов на валу двигателя и мощности приводного двигателя клетки рассматриваются три наиболее загруженные клетки - № 8,9,10.

Исходные данные приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Исходные данные

№ клетки	Скорость волков, (n) об/мин	Редуктор	Момент прокатки на волках, кНм	Время прокатки в клетки, с	Время паузы, с	Время цикла, с
8	180	2,8	4,85	8	4	12
9	194	2,8	4,67	8	4	12
10	209	2,5	4,6	8	4	12

Расчет моментов прокатки

Момент статический, приведенный к валу двигателя клеток 8,9,10 определяются по формуле:

$$M_{д} = \frac{M_{пр} \cdot K_{ф}}{U \cdot \eta},$$

где $M_{пр}$ – статический момент прокатки, кНм;

U – передаточное число редуктора;

$\eta = 0,9$ – КПД редуктора;

$K_{ф}$ – коэффициент фиктивного момента.

Момент прокатки, приведенный к валу двигателя:

Клеть 8:

$$M_{8} = \frac{4850 \cdot 1,26}{2,8 \cdot 0,9} = 2426 \text{ Нм.}$$

Клеть 9:

$$M_{9} = \frac{4670 \cdot 1,36}{2,8 \cdot 0,9} = 2524 \text{ Нм.}$$

Клеть 10:

$$M_{10} = \frac{4600 \cdot 1,29}{2,5 \cdot 0,9} = 2638 \text{ Нм.}$$

На основании полученных результатов строятся нагрузочные диаграммы и тахограммы для электроприводов клеток 8,9,10.

Момент холостого хода принимается для всех клеток одинаковым и равным:

$$M_{\text{хх}} = 200 \text{ Нм.}$$

Эквивалентный момент двигателя, приведенный к валу:

$$M_{\text{экв}} = \sqrt{\frac{M_{\text{д}}^2 \cdot t_{\text{п}} + M_{\text{хх}}^2 \cdot t_{\text{н}}}{t_{\text{ц}}}},$$

где $M_{\text{д}}$ – момент прокатки, приведенный к валу двигателя, кНм;

$t_{\text{п}}$ – время прокатки в клетке, с;

$t_{\text{н}}$ – время паузы, с;

$t_{\text{ц}}$ – время цикла, с.

Клеть 8:

$$M_{\text{Э8}} = \sqrt{\frac{(2426)^2 \cdot 8 + (200)^2 \cdot 4}{12}} = 1985,38 \text{ Нм.}$$

Клеть 9:

$$M_{\text{Э9}} = \sqrt{\frac{(2524)^2 \cdot 8 + (200)^2 \cdot 4}{12}} = 2065,49 \text{ Нм.}$$

Клеть 10:

$$M_{\text{Э10}} = \sqrt{\frac{(2638)^2 \cdot 8 + (200)^2 \cdot 4}{12}} = 2158,63 \text{ Нм.}$$

Расчет мощности приводного двигателя клетки:

$$P_{\text{дв}} = K_3 \cdot M_{\text{Э}} \cdot \omega_{\text{д}},$$

где $K_3 = 0,9$ – коэффициент, учитывающий снижение требуемой мощности двигателя при прокатке основной части сортамента трубопрокатного агрегата.

Клеть 8:

$$P_8 = 1985,38 \cdot 52,8 \cdot 0,9 = 94,3 \text{ кВт.}$$

Клеть 9:

$$P_9 = 2065,49 \cdot 56,9 \cdot 0,9 = 105 \text{ кВт.}$$

Клеть 10:

$$P_{10} = 2158,63 \cdot 54 \cdot 0,9 = 104 \text{ кВт.}$$

Для электропривода всех клеток редукционного стана принимается ближайший по мощности электродвигатель постоянного тока, серийно выпускаемый электропромышленностью.

Для привода клеток редукционного стана выбирается электродвигатель типа:

МП2-450-121-4-У4

- мощность электродвигателя:	$P_{\text{дв.н}} = 110 \text{ кВт};$
- номинальное напряжение двигателя:	$U_{\text{дв.н}} = 440 \text{ В};$
- номинальный ток двигателя:	$I_{\text{дв.н}} = 280 \text{ А};$
- номинальная угловая скорость:	$n_{\text{дв.н}} = 400 \text{ об/мин};$
- максимальная угловая скорость:	$n_{\text{дв.мах}} = 1500 \text{ об/мин};$
- перегрузка по току при $\omega_{\text{дв.н}}$:	$\lambda_{\text{н}} = 2,5;$
- перегрузка по току при $\omega_{\text{дв.мах}}$:	$\lambda_{\text{мах}} = 2;$
- номинальный поток одного полюса:	$\Phi_{\text{н}} = 15,43 \cdot 10^{-2} \text{ Вб};$
- минимальный поток одного полюса:	$\Phi_{\text{мин}} = 4,85 \cdot 10^{-2} \text{ Вб};$
- сопротивление обмотки якоря ($t=15^\circ\text{C}$):	$R_{\text{я}} = 0,01926 \text{ Ом};$
- сопротивления добавочных полюсов:	$R_{\text{дп}} = 0,00427 \text{ Ом};$
- сопротивление компенсационной обмотки:	$R_{\text{ко}} = 0,0011 \text{ Ом};$
- сопротивление обмотки возбуждения:	$R_{\text{ов}} = 1,525 \text{ Ом};$
- момент инерции двигателя:	$J_{\text{дв}} = 47,8 \text{ кг} \cdot \text{м}^2;$
- число витков обмотки возбуждения:	$\omega_{\text{в}} = 345;$
- число активных проводников:	$N = 248;$
- диаметр якоря:	$D_{\text{я}} = 0,59 \text{ м};$

- индуктивность якоря: $L_{\text{я}} = 0,42 \text{ мГн};$
- величина воздушного зазора: $\delta = 0,4 \text{ мм};$
- число пар полюсов: $2p-4;$
- число параллельных ветвей: $a = 2;$
- коэффициент для компенсированного двигателя: $k = 0,2;$
- падение напряжение на щетках: $U_{\text{щ}} = 2 \text{ В};$
- температурный коэффициент: $k_T = 1,4;$
- скорость изменения производной тока якоря: $\frac{dI_{\text{я}}}{dt} = 10;$
- номинальная угловая частота вращения:

$$\omega_{\text{дн}} = \frac{\pi \cdot n_{\text{дн}}}{30} = \frac{3,14 \cdot 400}{30} = 41,8 \text{ 1/с};$$

- максимальная угловая частота вращения:

$$\omega_{\text{дм}} = \frac{\pi \cdot n_{\text{м}}}{30} = \frac{3,14 \cdot 1500}{30} = 157 \text{ 1/с};$$

- номинальный момент электродвигателя:

$$M_{\text{дн}} = \frac{P}{\omega_{\text{дн}}} = \frac{110}{41,8} = 2630 \text{ Нм};$$

3.3. Проверка двигателя на нагрев

На основании расчета строим нагрузочные диаграммы и тахограммы. Проверку на нагрев производим по эквивалентному моменту клетки 10, имеющему наибольшее значение.

$$M_{\text{н}} > M_{\text{экв10}}.$$

$$2630 \text{ Нм} > 2158,63 \text{ Нм},$$

где $M_{\text{н}}$ – номинальный момент электродвигателя;

$M_{\text{экв10}}$ – эквивалентный момент, приведенный к валу двигателя клетки №10.

Загрузка двигателя эквивалентным моментом:

$$\frac{M_{\text{экв10}}}{M_{\text{н}}} \cdot 100 = \frac{2158,63}{6230} \cdot 100 = 82\%.$$

Определим запас двигателя по нагреву:

$$M_{\text{т}} = 100 - \frac{M_{\text{экв10}}}{M_{\text{н}}} \cdot 100 = 100 - 82 = 18\%.$$

Таким образом, выбранный электродвигатель удовлетворяет по условиям нагревания.

3.4. Проверка двигателя по перегрузочной способности

Допустимый момент электродвигателя:

$$M_{\text{доп}} = \lambda_{\text{н}} \cdot M_{\text{н}} = 2,5 \cdot 2630 = 6575 \text{ Нм},$$

где $\lambda_{\text{н}}$ – перегрузка по току при $\omega_{\text{дв.н}}$.

Проверку по перегрузочной способности производим по статическому моменту прокатки, приведенному к валу двигателя:

$$M_{\text{доп}} > M_{\text{п}}.$$

$$6575 \text{ Нм} > 2638 \text{ Нм},$$

где $M_{\text{п}}$ – статический момент прокатки, приведенному к валу двигателя клетки №10.

Таким образом, двигатель удовлетворяет требованиям по перегрузке.

4. ВЫБОР ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО АГРЕГАТА

4.1. Выбор преобразователя для питания двигателей главного привода

В состав комплектного тиристорного электропривода входят: преобразовательный агрегат для питания двигателя (индивидуальный для каждого двигателя), силовой трансформатор, сглаживающий реактор, быстродействующий выключатель, тиристорный возбудитель для питания обмотки возбуждения.

В реверсивных преобразователях существует два способа управления: раздельное и совместное. Достоинствами раздельного управления являются: меньшие габариты, масса и стоимость, лучшее использование трансформатора, более высокий КПД и коэффициент мощности. И, несмотря на то, что здесь более сложная система управления преобразователем в связи с наличием РНТ и ЛПУ, наличие уравнивающих токов при сбое в СИФУ и другие недостатки, в настоящее время применяются в основном преобразователи с раздельным управлением.

В двухкомплектных реверсивных преобразователях с раздельным управлением уравнивающие токи отсутствуют и, поэтому используются встречно - параллельные схемы без уравнивающих реакторов.

Включение и выключение вентильных комплектов производится подачей и снятием импульсов управления тиристорами соответствующего комплекта. Система управления ТП с раздельным управлением содержит логическое переключающее устройство, которое выдает сигналы запрета или разрешения комплектов.

Преобразователи с раздельным управлением содержат датчики наличия тока, которые выдают логические сигналы наличия тока якоря или каждого вентильного комплекта, если их ток превышает ток удержания одного тиристора.

4.2. Тиристорный преобразователь

Тип трансформатора преобразовательного агрегата ТСЗП-1600 кВт.

Технические данные на трансформатор:

- первичное напряжение: $U_1 = 10 \text{ кВ};$
- вторичное напряжение: $U_2 = 410 \text{ В};$
- ЭДС короткого замыкания: $e_k = 6,1\%;$
- потери короткого замыкания: $P_{кз} = 6000 \text{ Вт};$
- выпрямленный ток: $I_{дв.н} = 280 \text{ А};$
- выпрямленное напряжение $U_{дв.н} = 440 \text{ В};$
- напряжение управления, соответствующее ЭДС холостого хода преобразователя: $U_y = 6 \text{ В};$
- угол запаса при инвертировании: $\delta = 10 \text{ эл. гр};$
- пульсность схемы: $m = 6;$
- коэффициент выпрямления:
 - по напряжению: $K_{BU} = 1,35;$
 - по току: $K_{BI} = 0,815;$
- коэффициент снижения напряжения сети: $K_C = 0,9;$
- угловая частота питающей сети:
 $\omega_c = 2\pi \cdot f = 2 \cdot 3.14 \cdot 50 = 314 \text{ рад/с},$

где f – частота питающей сети, Гц;

- ЭДС холостого хода преобразователя ($a=0$):

$$E_{do} = K_{BU} \cdot U_2 = 1,35 \cdot 410 = 553,5 \text{ В},$$

где K_{BU} – коэффициент выпрямления по напряжению

U_2 – вторичное напряжение, В;

- коэффициент передачи преобразователя по напряжению:

$$K_{ТП} = \frac{E_{do}}{U_y} = \frac{553,5}{6} = 92,3,$$

где E_{do} – ЭДС холостого хода преобразователя ($a=0$), В;

U_y – напряжение управления, соответствующее ЭДС холостого хода преобразователя, В;

- сопротивление фазы трансформатора, приведенное к вторичной обмотке:

Индуктивное:

$$X = \frac{U_2 \cdot \sqrt{3} \cdot e_k}{K_{ВI} \cdot I_{дв.н} \cdot 100} = \frac{410 \cdot \sqrt{3} \cdot 6,1}{0,815 \cdot 280 \cdot 10} = 0,183 \text{ Ом},$$

где U_2 – вторичное напряжение, В;

e_k – ЭДС короткого замыкания, %;

$K_{ВI}$ – коэффициент выпрямления по току;

$I_{дв.н}$ – выпрямленный ток, А.

Активное:

$$R = \frac{P_{КЗ} \cdot (\sqrt{3})^2}{3 \cdot (K_{ВI} \cdot I_{дв.н})^2} = \frac{6000 \cdot (\sqrt{3})^2}{3 \cdot (0,815 \cdot 280)^2} = 0,115 \text{ Ом},$$

где $P_{КЗ}$ – потери короткого замыкания, Вт;

$K_{ВI}$ – коэффициент выпрямления по току;

$I_{дв.н}$ – выпрямленный ток, А.

- сопротивление фазы трансформатора, приведенное к вторичной обмотке эквивалентной звезды:

Индуктивное:

$$X^* = \frac{X}{3} = \frac{0,053}{3} = 0,0117 \text{ Ом},$$

где X^* - индуктивное сопротивление фазы трансформатора, приведенное к вторичной обмотке, Ом.

Активное:

$$R^* = \frac{R}{3} = \frac{0,00903}{3} = 0,00301 \text{ Ом},$$

где R^* - активное сопротивление фазы трансформатора, приведенное к вторичной обмотке, Ом.

- эквивалентное сопротивление преобразователя:

$$R_{\text{экв}} = \frac{3}{\pi} \cdot X^* + 1,75 \cdot R^* = \frac{3}{3,14} \cdot 0,0117 + 1,75 \cdot 0,00301 = 0,022 \text{ Ом.}$$

- индуктивность трансформатора:

$$L_{\text{тр}} = \frac{3}{2} \cdot \frac{X^*}{\omega_c} = \frac{3}{2} \cdot \frac{0,0117}{314} = 0,0845 \cdot 10^{-3} \text{ Гн,}$$

где ω_c – угловая частота питающей сети, рад/с;

- индуктивность реактора: $L_p = 0,35 \cdot 10^{-3} \text{ Гн.}$

4.3. Двигатель с механизмом

Маховый момент механизма, приведенный к валу двигателя:

$$GD_{\text{мех}}^2 = 675 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Момент инерции механизма:

$$J_{\text{мех}} = \frac{GD_{\text{мех}}^2}{4} = 168,6 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Момент инерции двигателя и механизма:

$$J = J_{\text{дв}} + J_{\text{мех}} = 47,8 + 168,6 = 214,4 \text{ кг} \cdot \text{м}^2,$$

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

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

4.4. Двигатель с тиристорным преобразователем

Суммарное сопротивление якорной цепи:

$$R_a = R_{\text{яд}} + R_{\text{ш}} + R_{\text{экв}} = 0,035 + 0,0035 + 0,022 = 0,0605 \text{ Ом,}$$

где $R_{\text{яд}}$ – сопротивление якорной цепи двигателя при рабочей температуре, Ом;

$R_{\text{ш}}$ – сопротивление ошиновки, Ом;

$R_{\text{экв}}$ – эквивалентное сопротивление преобразователя, Ом.

Суммарная индуктивность якорной цепи:

$$L_a = L_d + L_{\text{тр}} + L_p = (1,69 + 0,0845 + 0,35) \cdot 10^{-3} = 2,12 \cdot 10^{-3} \text{ Гн,}$$

где L_d – индуктивность якорной цепи двигателя, Гн;

$L_{тр}$ – индуктивность трансформатора, Гн;

L_p – индуктивность реактора, Гн.

Электромагнитная постоянная времени якорной цепи:

$$T_a = \frac{L_a}{R_a} = \frac{2,12 \cdot 10^{-3}}{6,05 \cdot 10^{-2}} = 0,035 \text{ с},$$

где L_a – суммарная индуктивность якорной цепи, Гн;

R_a – суммарное сопротивление якорной цепи, Ом.

4.5. Расчет режимов преобразователя

Минимальный угол опережения при токе инвертирования $2I_{дв.н}$:

$$\beta_{\min} = \arccos\left(\cos \delta - \frac{2I_{дв.н} \cdot X^* \cdot \sqrt{3}}{k_c \cdot \sqrt{2 \cdot U_2 \cdot \sin \frac{2\pi}{m}}}\right) = \arccos\left(\cos 10^\circ - \frac{2 \cdot 280 \cdot 0,0117 \cdot \sqrt{3}}{0,9 \cdot \sqrt{2 \cdot 410 \cdot \sin \frac{2\pi}{6}}}\right) =$$
$$= 10,16 \text{ эл. гр.},$$

где δ – угол запаса при инвертировании, эл.гр.;

$I_{дв.н}$ – номинальный ток двигателя, А;

X^* – индуктивное сопротивление фазы трансформатора, приведенное к вторичной обмотке эквивалентной звезды, Ом;

k_c – коэффициент снижения напряжения сети;

U_2 – вторичное напряжение трансформатора, В;

m – пульсность схемы.

ЭДС преобразователя, соответствующая β_{\min} :

$$E_n = E_{до} \cdot \cos \beta_{\min} = 553,5 - 0,98 = 552,5 \text{ В},$$

где $E_{до}$ – ЭДС холостого хода преобразователя, В.

Максимальный темп изменения тока в процессе разгона выше основной скорости:

$$\left(\frac{dI_{дв}}{dt}\right) = \frac{I_{дв.н} \cdot \omega_c}{\pi} = \frac{280 \cdot 20}{3,14} = 1783,5 \text{ А},$$

где $I_{дв.н}$ – номинальный ток двигателя, А;

ω_c – частота среза контура скорости, рад/с.

ЭДС преобразователя, соответствующая α_{\min} :

$$E_d = \frac{E_{\text{дв.н}} \cdot 2I_{\text{дв.н}} \cdot R_a}{0,9} = \frac{410,33 \cdot 2 \cdot 280 \cdot 0,0605}{0,9} = 493,5 \text{ В.}$$

Минимальный угол управления в выпрямительном режиме:

$$\alpha_{\min} = \arccos\left(\frac{E_d}{E_{\text{до}}}\right) = \arccos\left(\frac{493,5}{553,5}\right) = 26,9 \text{ эл. гр.},$$

где $E_{\text{до}}$ – ЭДС холостого хода преобразователя.

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

$$\alpha_n = \arccos\frac{E_{\text{дв.н}} + I_{\text{дв.н}} \cdot R_a}{E_{\text{до}}} = \arccos\frac{410,33 + 280 \cdot 0,0605}{553,5} = \arccos\frac{427,3}{553,5} =$$

38,7 эл. гр.,

Закон изменения угла рассогласования:

$$\alpha = 90^\circ - k_\phi \cdot U_y,$$

где k_ϕ – фазовый коэффициент, эл.гр./В;

U_y – напряжение управления, соответствующее ЭДС холостого хода, В.

Напряжение преобразователя при пилообразном опорном напряжении:

$$E^*_d = E_{\text{до}} \cdot \cos \alpha = E_{\text{до}} \cdot \cos(90^\circ - k_\phi \cdot U_y) = E_{\text{до}} \cdot \sin(k_\phi \cdot U_y) = 553,5 \cdot \sin(20 \cdot 6) = 479,3.$$

Напряжение управления, соответствующее α_{\min} :

$$U_{y1} = \frac{90^\circ - \alpha_{\min}}{k_\phi} = \frac{90^\circ - 26,9}{20} = 3,1 \text{ В,}$$

где α_{\min} - минимальный угол управления в выпрямительном режиме, эл.гр.

Напряжение управления соответствующее α_n :

$$U_{y1} = \frac{90^\circ - \alpha_n}{k_\phi} = \frac{90^\circ - 38,7}{20} = 2,56 \text{ В,}$$

где α_n - угол управления, соответствующий работе привода с $E_{\text{дв.н}}$ и $I_{\text{дв.н}}$.

Допустимое амплитудное значение пульсации тока якоря двигателя на максимальной скорости в % от номинального тока $i_{\text{доп}} = 7\%$.

Амплитудное значение пульсации тока якоря при установленном реакторе в % от номинального тока:

$$i = \frac{\bar{E} \cdot E'' \cdot 100 \cdot \sqrt{2}}{L_a \cdot \omega_c \cdot m \cdot I_{дв.н}} = \frac{0,15 \cdot 553,5 \cdot 100 \cdot \sqrt{2}}{2,12 \cdot 10^{-3} \cdot 314 \cdot 6 \cdot 280} = 6,9 \%,$$

где \bar{E} - эффективное значение первой гармоники пульсаций напряжения в отношении к $E_{до}$ для $\alpha = 24$ эл.гр. и $m = 6$ В.

Так как $i_{доп} > i$, то в применении дросселя для сглаживания пульсаций нет необходимости, и индуктивности L_a достаточно для ограничения пульсаций.

5. РАСЧЕТ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ, ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ РЕГУЛЯТОРОВ

5.1. Выбор системы автоматического регулирования

Основной задачей системы автоматического управления электроприводом является выполнение требований технологий, обусловленной картой проката. Основным требованием является поддержание заданной скорости вращения двигателя с точностью $\pm 10\%$ при номинальной скорости.

В настоящее время применяется унифицированная система управления и регулирования, построенная на использовании блоков управления УБСР-АИ (Унифицированная система регуляторов – аналоговая, на интегральных микросхемах), позволяющих контролировать все регулируемые координаты электропривода.

Любая замкнутая система регулирования должна удовлетворять следующим основным требованиям:

1. Система должна быть устойчивой.
2. Погрешность в установившемся режиме не должна превышать заданной.
3. Система должна обеспечить необходимое качество переходных процессов.

Часто эти требования оказываются противоречивыми. В простейшей системе на вход преобразователя подается управляющее воздействие, пропорциональное разности между заданными и фактическими значениями входной величины. Но воздействие таких систем недостаточно, а статическая точность низка. Для улучшения качества регулирования необходимо увеличить коэффициент усиления системы, что приводит к неустойчивости системы. Увеличение коэффициента усиления до величины, обеспечивающей заданную статическую точность при приемлемом качестве регулирования,

достигается путем введения специальных корректирующих звеньев, изменяющих динамику системы в нужном направлении. При этом изменяется (уменьшается и даже устраняется) перерегулирование, увеличивается быстродействие.

В настоящее время различают три вида систем с тиристорным преобразователем:

1. Система с одним регулятором и нелинейной обратной связью по току. Такая система наиболее проста, так как требуется один регулятор, на вход которого поступают сигналы рассогласования между заданным и действительными значениями регулируемого параметра. При токе меньше заданного значения система работает как регулятор скорости или регулятор ЭДС, а при повышении тока – как регулятор тока.

2. Система с независимым регулированием или система параллельного действия. В таких системах возможна отдельная настройка каждого контура регулирования величины, учитывающих разницу в передаточных функциях объекта регулирования, что дает получение оптимальных переходных процессов. Такая система удовлетворяет требованиям электропривода в отношении динамики, но настройка и расчет такой системы представляют значительные затруднения, а в связи с этим уменьшается надежность системы.

3. Многоконтурная система с подчиненным регулированием. Система построена по принципу многоконтурного регулирования. Каждый контур имеет свой регулятор, настраиваемый в соответствии с передаточной функцией объекта регулирования этого контура. На вход каждого контура поступают сигналы, задающие действительные значения регулируемых параметров, причем предыдущее звено вырабатывает сигнал задания для последующего регулятора. Такой способ регулирования позволяет легко осуществить расчет и наладку системы.

Исходя из вышесказанного, принимаем для главного привода одной клетки редукционного стана систему ТП-Д с подчиненным регулированием параметров.

В качестве регулируемых параметров можно выделить скорость и ЭДС двигателя, ток якоря двигателя и ток обмотки возбуждения.

Напряжения на выходах регуляторов являются заданием для последующего контура регулирования. Регулирование скорости до основной производится изменением напряжения якоря, в диапазоне выше основной – за счет изменения тока возбуждения при номинальной ЭДС двигателя. Регулирование проводится путем последовательной оптимизации контуров начиная с внутреннего. Под оптимальной настройкой понимается технически оптимальная система – компромиссная между перерегулированием и быстродействием системы.

На практике используют настройку регулятора $T_i = 2T_1$. Данный вариант носит название - настройка системы на модульный или технический оптимум.

Настройка на модульный оптимум – полная компенсация большой постоянной времени объекта регулирования. Такая настройка служит определенным стандартом оптимальным решениям, сочетающим высокое быстродействие с относительно малым перерегулированием. Данная настройка обеспечивает так называемый нормированный или стандартный процесс.

Выбираем настройку на модульный оптимум.

5.2. Разработка функциональной схемы

Для автоматического управления главным приводом редукционного стана принимаем систему с двухзонным регулированием скорости. Двухзонная система регулирования скорости выбрана в связи с тем, что

прокатка некоторых сортов труб ведется на скорости выше основной, то есть при ослабленном потоке.

Поскольку частота вращения двигателя – основной параметр, то контур регулирования частоты вращения будет внешним, а контур регулирования тока – внутренним.

Система управления возбуждением – одноконтурная. До номинальной скорости регулятор ЭДС работает как регулятор тока возбуждения, а при скорости выше номинальной – как регулятор ЭДС двигателя. Во всем диапазоне регулирование частоты вращения двигателя осуществляется изменением одного сигнала – задания по скорости.

Функциональная схема управления электропривода стана представлена на рисунке 13.

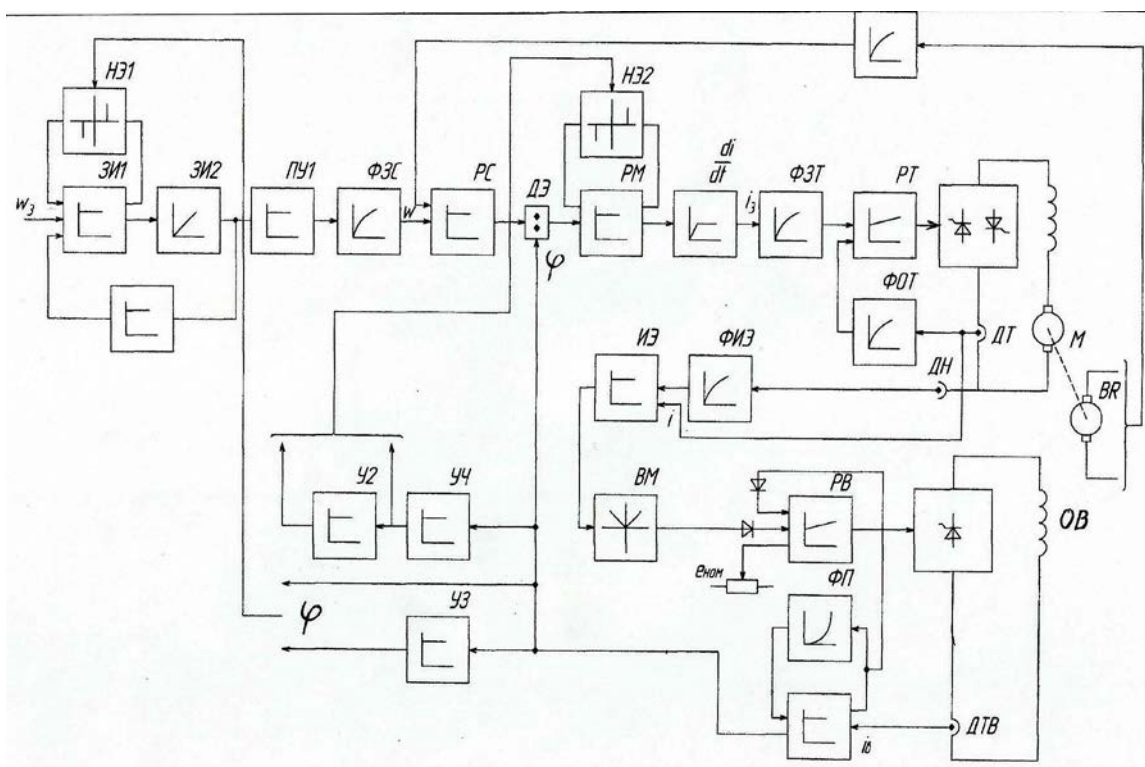


Рисунок 13 – Функциональная схема управление электропривода

Описание схемы

На вход регулятора скорости через задатчик интенсивности (ЗИ) и промежуточный усилитель ПУ1 подается сигнал задания частоты вращения от УЗС. ЗИ преобразует ступенчатый сигнал задания скорости в плавно

изменяющейся. Скорость изменения выходного напряжения ЗИ определяется выходным напряжением ЗИ1, которое определяется величиной ограничения.

Регулятор скорости реализует пропорциональный закон регулирования. В цепи обратной связи по скорости ставится фильтр для уменьшения влияния пульсаций тахогенератора.

Двигатель постоянного тока является нелинейным объектом регулирования. Для компенсации нелинейности объекта регулирования при изменении потока возбуждения в системе регулирования скорости между регулятором скорости и регулятором тока должен быть установлен делительный элемент, реализующий зависимость $i_3 = \frac{m_3}{\varphi}$. Выходное напряжение делительного устройства $U_{\text{вых}} = xy: z$, x, y, z - входы ячейки делительного устройства. В схеме на вход z подается сигнал, пропорциональный потоку, так что осуществляется деление на величину, пропорциональную потоку двигателя. С делительного элемента сигнал подается на регулятор мощности. Регулятор мощности имеет пропорциональную структуру. В обратной связи РМ включено регулируемое ограничение, с помощью которого устанавливается величина допустимого тока двигателя, так как установка токоограничения снижается с увеличением скорости выше основной.

Применение узла ограничения скорости нарастания тока вызвано тем, что применяются электродвигатели постоянного тока, которые имеют невысокую допустимую величину скорости нарастания тока, а уменьшение ее за счет уменьшения частоты среза регулятора тока приведет к снижению быстродействия регулятора скорости, что крайне нежелательно.

Сигналы задания и действительного значений тока подаются через фильтры ФЗТ и ФОТ с постоянной времени - Т.

Выделение ЭДС двигателя осуществляется в схеме измерителем ЭДС (ИЭ).

Схема регулирования полем двигателя - одноконтурная. Это сделано с целью повышения быстродействия контура ЭДС и простоты настройки.

Здесь один регулятор возбуждения РВ - ПИ, который до номинальной скорости привода работает как регулятор тока возбуждения, а при скоростях привода выше номинальной работает как регулятор ЭДС.

Диодный дискриминатор VI и V2 выделяет больший из двух сигналов и тем обеспечивает замыкание обратной связи либо по току возбуждения, либо по ЭДС.

Сигнал о действующем значении потока формируется на измерителе потока с помощью датчика тока возбуждения и звена, охваченного обратной связью через нелинейный элемент, имеющий характеристику, обратную кривой намагничивания.

На входе РВ при работе на повышенной скорости сравниваются сигналы задания ЭДС - $e_{ном}$ и сигнал $e_{дв}$, который перед поступлением на вход РВ проходит через схему выделения модуля, так как при изменении направления вращения полярность сигнала на входе РВ меняться не должна.

5.3. Разработка структурной схемы

На основании известных свойств тиристорного преобразователя и электродвигателя, а также с помощью выявленных на функциональной схеме взаимосвязей составим структурную схему.

При регулировании скорости до основной, объект управления представлен двумя последовательно соединенными звеньями: апериодическим и интегрирующим.

При регулировании скорости выше основной двигатель постоянного тока может быть представлен нелинейным объектом регулирования.

Структурная схема представлена на рисунке 14.

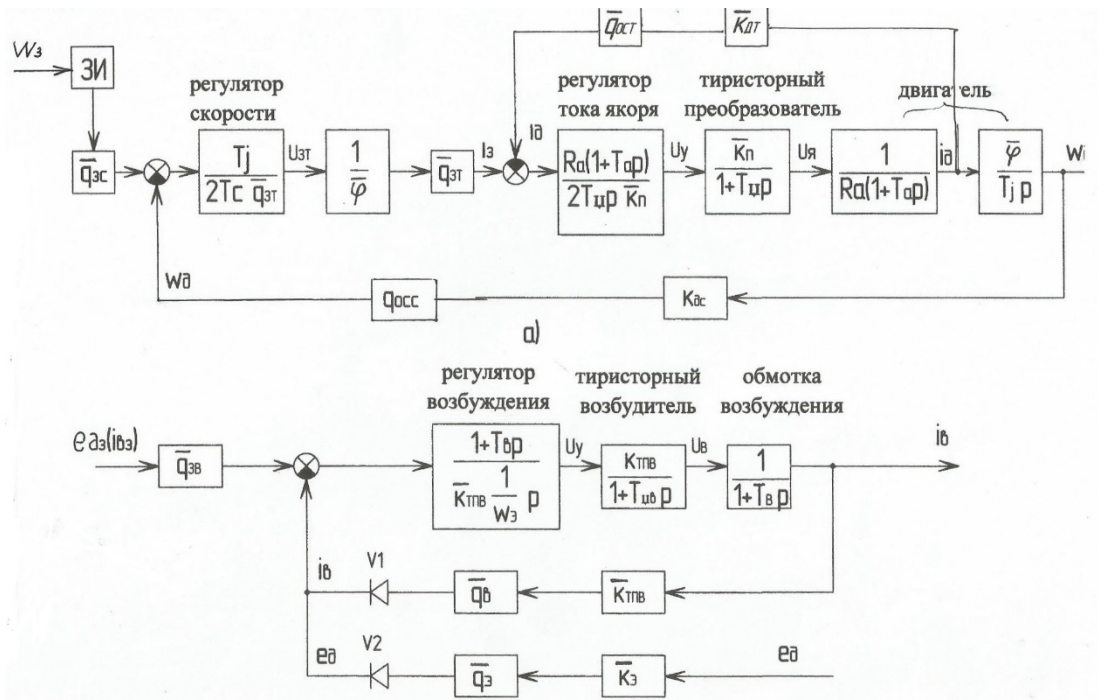


Рисунок 14 – структурная схема системы регулирования

Всю систему управления условно можно разделить на две части: систему управления скоростью, управляемую напряжением тиристорного преобразователя и систему регулирования ЭДС, управляемую полем двигателя.

Передаточные функции регуляторов будут определены в процессе дальнейшего расчета САУ из условия получения оптимальных свойств системы.

Базовые величины электропривода в относительных единицах:

Напряжение главной цепи: $U_\sigma = E_{\text{дв.н}} = 410,33 \text{ В.}$

Ток главной цепи: $I_\sigma = I_{\text{дв.н}} = 280 \text{ А.}$

Сопротивление главной цепи: $R_\sigma = \frac{E_{\text{дв.н}}}{I_{\text{дв.н}}} = 1,46 \text{ Ом.}$

Ток возбуждения: $I_{\sigma\text{в}} = I_{\text{в.н}} = 45,2 \text{ А.}$

Сопротивление цепи возбуждения: $R_{\sigma\text{в}} = 2,135 \text{ Ом.}$

Напряжение возбуждения: $U_\sigma = I_{\sigma\text{в}} \cdot R_{\sigma\text{в}} = 96,5 \text{ В.}$

Угловая скорость: $\omega_\sigma = \omega_{\text{дв.н}} = 33 \text{ рад/с.}$

Поток двигателя: $\Phi_\sigma = \Phi_{\text{н}} = 15,43 \cdot 10^{-2} \text{ Вб.}$

Момент: $M_\sigma = M_{\text{дв.н}} = 9,6 \cdot 10^{-2} \text{ Вб.}$

Напряжение системы регулирования: $U_0 = 10 \text{ В.}$

Напряжение двигателя:

$$\bar{U}_{\text{дв.н}} = \frac{U_{\text{дв.н}}}{U_{\sigma}} = \frac{440}{410,33} = 1,072,$$

где $U_{\text{дв.н}}$ – номинальное напряжение, В;

U_{σ} – напряжение главной цепи, В.

Сопротивление якорной цепи двигателя с учетом ошиновки:

$$R_{\text{д}} = \frac{R_{\text{яд}} + R_{\text{ш}}}{R_{\sigma}} = \frac{0,03503 + 0,0035}{1,46} = 0,026 \text{ Ом},$$

где $R_{\text{яд}}$ – сопротивление якорной цепи двигателя при рабочей температуре, Ом;

$R_{\text{ш}}$ – сопротивление оцинковки, Ом;

R_{σ} – сопротивление главной цепи, Ом.

Суммарное сопротивление якорной цепи в относительных единицах:

$$\bar{R}_{\text{а}} = \frac{R_{\text{а}}}{R_{\sigma}} = \frac{0,0605}{1,46} = 0,04,$$

где $R_{\text{а}}$ – суммарное сопротивление якорной цепи, Ом;

R_{σ} – сопротивление главной цепи, Ом.

Коэффициент усиления преобразователя:

$$\bar{k}_{\text{тп}} = k_{\text{тп}} \cdot \frac{U_0}{U_{\sigma}} = 92,3 \cdot \frac{10}{410,33} = 2,28,$$

где $k_{\text{тп}}$ – напряжение управления, соответствующее α_{min} ;

U_0 – напряжение системы регулирования, В;

U_{σ} – напряжение главной цепи, В.

Напряжение на выходе датчика тока при максимальном токе двигателя принимаем $U_{\text{дтм}} = 10 \text{ В}$.

Напряжение на выходе датчика тока при номинальном токе двигателя:

$$U_{\text{дтн}} = \frac{U_{\text{дтм}} \cdot I_{\text{дв.н}}}{\lambda_{\text{рн}} \cdot I_{\text{дв.н}}} = \frac{10 \cdot 280}{2,5 \cdot 280} = 4 \text{ В},$$

где $I_{\text{дв.н}}$ – номинальный ток двигателя, А;

$\lambda_{\text{рн}}$ – рабочая перегрузка по току при $n_{\text{дв.н}}$.

Передаточный коэффициент датчика тока:

$$\bar{K}_{дт} = \frac{U_{дтн}}{U_0} = \frac{4}{10} = 0,4,$$

где $U_{дтн}$ – напряжение на выходе датчика тока при номинальном токе двигателя, В;

U_0 – напряжение системы регулирования, В.

Базовое сопротивление САР: $R_0 = 100 \cdot 10^{-3}$ Ом.

5.4. Расчет контура тока якоря

Некомпенсированная постоянная времени контура тока:

$T_{\mu} = 0,005$ с (по требованию технологии).

Передаточная функция РТ якоря:

$$W_{РТ} = \frac{\bar{R}_a \cdot (1 + T_{ap})}{\rho_{ост} \cdot \bar{K}_{дт} \cdot 2T_{\mu} \cdot \bar{K}_{тп}} = \frac{0,0605 \cdot (1 + 0,035p)}{0,0228p} = 2,75,$$

где \bar{R}_a – суммарное сопротивление якорной цепи в относительных единицах;

T_a – электромагнитная постоянная времени якорной цепи, с;

$\rho_{ост}$ – проводимость по каналу ОС по току;

$\bar{K}_{дт}$ – передаточный коэффициент датчика тока;

$\bar{K}_{тп}$ – коэффициента усиления преобразователя.

Коэффициент усиления пропорциональной части РТ:

$$r_T = \frac{\bar{R}_a \cdot T_a}{\rho_{ост} \cdot \bar{K}_{дт} \cdot 2T_{\mu} \cdot \bar{K}_{тп}} = \frac{0,0605 \cdot 0,035}{1 \cdot 0,01 \cdot 2,28} = 0,09,$$

где \bar{R}_a – суммарное сопротивление якорной цепи в относительных единицах;

T_a – электромагнитная постоянная времени якорной цепи, с;

$\rho_{ост}$ – проводимость по каналу ОС по току;

$\bar{K}_{дт}$ – передаточный коэффициент датчика тока;

T_{μ} – некомпенсированная постоянная времени контура тока, с;

$\bar{K}_{тп}$ – коэффициента усиления преобразователя.

Входная проводимость РТ по каналу задания:

$$\bar{\rho}_{зт} = \frac{\lambda_{рн} \cdot U_0}{U_{дтм}} = \frac{2,5 \cdot 10}{10} = 2,5,$$

где $\lambda_{рн}$ – рабочая перегрузка по току при $n_{дв.н}$;

U_0 – напряжение системы регулирования, В;

$U_{дтм}$ – напряжение на выходе датчика тока при максимальном токе двигателя, В.

Сопротивление в цепи ОС РТ:

$$R_{12РАСЧ} = r_T \cdot R_0 = 0,09 \cdot 100 \cdot 10^3 = 9 \cdot 10^3 \text{ Ом},$$

где r_T – коэффициент усиления пропорциональной части РТ;

R_0 – базовое сопротивление САР, Ом.

Емкость в цепи ОС РТ:

$$C_{5РАСЧ} = \frac{T_a}{R_{12РАСЧ}} = \frac{0,035}{9 \cdot 10^3} = 3,9 \cdot 10^{-6} \text{ Ф},$$

где T_a – электромагнитная постоянная времени якорной цепи, с;

$R_{12РАСЧ}$ – сопротивление в цепи ОС РТ, Ом.

Входное сопротивление регулятора по каналу ОС:

$$R_{3РАСЧ} = \bar{k}_{дт} \cdot R_0 = 0,44 \cdot 100 \cdot 10^3 = 44 \cdot 10^3 \text{ Ом},$$

где $\bar{k}_{дт}$ – передаточный коэффициент датчика тока;

R_0 – базовое сопротивление РТ по каналу ОС по току.

Сопротивление на входе РТ по цепи ОС по току:

$$R_3^* = R_{3РАСЧ} \cdot \frac{C_{5РАСЧ}}{C_3^*} = 44 \cdot 10^3 \cdot \frac{3,9 \cdot 10^{-6}}{0,47 \cdot 10^{-6}} = 365 \cdot 10^3 \text{ Ом},$$

где $R_{3РАСЧ}$ – входное сопротивление регулятора тока по каналу ОС, Ом;

$C_{5РАСЧ}$ – ёмкость в цепи ОС РТ, Ф;

C_3^* – принятая ёмкость в цепи ОС РТ, Ф.

Сопротивление на входе РТ по каналу задания тока:

$$R_2^* = R_{2РАСЧ} \cdot \frac{C_{5РАСЧ}}{C_3^*} = 40 \cdot 10^3 \cdot \frac{3,9 \cdot 10^{-6}}{0,47 \cdot 10^{-6}} = 331,9 \cdot 10^3 \text{ Ом},$$

где $R_{2РАСЧ}$ – входное сопротивление регулятора тока по каналу ОС, Ом;

$C_{5РАСЧ}$ – ёмкость в цепи ОС РТ, Ф;

C_3^* - принятая ёмкость в цепи ОС РТ, Ф.

Сопротивление в цепи ОС РТ:

$$R_{17}^* = R_{17РАСЧ} \cdot \frac{C_{5РАСЧ}}{C_3^*} = 9 \cdot 10^3 \cdot \frac{3,9 \cdot 10^{-6}}{0,47 \cdot 10^{-6}} = 74,7 \cdot 10^3 \text{ Ом},$$

где $R_{17РАСЧ}$ – входное сопротивление регулятора тока по каналу ОС, Ом;

$C_{5РАСЧ}$ – ёмкость в цепи ОС РТ, Ф;

C_3^* - принятая ёмкость в цепи ОС РТ, Ф.

Сопротивления, шунтирующие входное сопротивление регулятора тока R4 и R5, подбираются при наладке для компенсации коэффициента преобразователя в зоне прерывистых токов.

Типа изменения тока якоря:

$$\frac{dI}{dt} = 10 \cdot 280 = 2800 \text{ А/с}.$$

5.5. Расчет контура скорости

Некомпенсируемая постоянная времени контура скорости:

$$T_{\omega} = 2(2T_{\mu}) + T_{\phi} = 2(2 \cdot 0,005) + 0,005 = 0,025 \text{ с},$$

где T_{ω} – некомпенсированная постоянная времени, с;

T_{ϕ} – постоянна времени фильтра, с.

Механическая постоянная времени привода:

$$T_{\omega} = \frac{J \cdot \omega_{\sigma}}{M_{\sigma}} = \frac{216,4 \cdot 33}{9,6 \cdot 10^3} = 0,745 \text{ с},$$

где J – момент инерции двигателя и механизма, кг · м²;

ω_{σ} – угловая скорость, базисная, рад/с;

M_{σ} – момент базисный, Н · м.

Передачный коэффициент тахогенератора:

$$K_{ТГ} = \frac{U_{ТГ}}{\omega_{ТГ}} = \frac{230}{105} = 2,1 \text{ В/с},$$

где $U_{ТГ}$ – напряжение тахогенератора, В;

$\omega_{\text{ТГ}}$ – частота вращения тахогенератора, рад/с.

В качестве датчика скорости принимаем тахогенератор: ТП-180-1П.

Напряжение выхода датчика скорости при максимальной скорости принимаем: $U_{\text{дсmax}} = 10 \text{ В}$.

Напряжение выхода датчика скорости при номинальной скорости:

$$U_{\text{дсн}} = \frac{U_{\text{дсmax}} \cdot \omega_{\text{дв.н}}}{\omega_{\text{max}}} = \frac{10 \cdot 33}{105} = 3,1 \text{ В},$$

где $U_{\text{дсmax}}$ – напряжение выхода датчика скорости при максимальной скорости, В;

$\omega_{\text{дв.н}}$ – номинальная частота вращения двигателя, рад/с;

$\omega_{\text{max}} = \omega_{\text{ТГ}}$ – частота вращения тахогенератора, рад/с.

Передачный коэффициент датчика скорости:

$$\bar{K}_{\text{дс}} = \frac{U_{\text{дсн}}}{U_0} = \frac{3,1}{10} = 0,31,$$

где $U_{\text{дсн}}$ – напряжение выхода датчика скорости при номинальной скорости, В;

U_0 – напряжение системы регулирования, В.

Входная проводимость регулятора по каналу ОС:

$$\bar{\rho}_{\text{осс}} = \frac{1}{\bar{K}_{\text{дс}}} = \frac{1}{0,31} = 3,2,$$

где $\bar{K}_{\text{дс}}$ – передачный коэффициент датчика скорости.

Коэффициент усиления пропорциональной части РС:

$$r_c = \frac{T_j}{2T_\omega \cdot \bar{\rho}_{\text{зт}}} = \frac{0,745}{0,05 \cdot 2,5} = 6,6,$$

где T_j – механическая постоянная времени, с;

T_ω – некомпенсируемая постоянная времени скорости контура, с;

$\bar{\rho}_{\text{зт}}$ – входная проводимость РТ по каналу задания.

Передачная функция регулятора скорости:

$$W_{\text{рс}} = \frac{T_j}{2T_\omega \cdot \bar{\rho}_{\text{зт}}} = r_c,$$

где T_j – механическая постоянная времени, с;

T_ω – некомпенсируемая постоянная времени скорости контура, с;

$\bar{\rho}_{зт}$ – входная проводимость РТ по каналу задания.

Сопротивление в цепи ОС РС:

$$R_{21РАСЧ} = r_c \cdot R_0 = 6,6 \cdot 10^3 \text{ Ом},$$

где r_c – коэффициент усиления пропорциональной части РС;

R_0 – базовое сопротивление САР, Ом.

Сопротивление на входе РС по каналу ОСС:

$$(R_{13}^* + R_{14})_{РАСЧ} = \frac{R_0}{\bar{\rho}_{осс}} = \frac{100 \cdot 10^3}{3,2} = 31,25 \cdot 10^3 \text{ Ом},$$

где R_0 – базовое сопротивление САР, Ом;

$\bar{\rho}_{осс}$ – входная проводимость регулятора по каналу ОС.

Сопротивление на входе РС по каналу задания скорости:

$$(R_{13}^* + R_{14})_{РАСЧ} = \frac{R_0}{\bar{\rho}_{зс}} = \frac{R_0}{\bar{\rho}_{осс}},$$

где R_0 – базовое сопротивление САР, Ом;

$\bar{\rho}_{осс}$ – входная проводимость регулятора по каналу ОС;

$\bar{\rho}_{зт}$ – входная проводимость РТ по каналу задания.

Сопротивления:

$$R_{21}^* = 660 \cdot 10^3 \text{ Ом};$$

$$R_{14}^* = R_{15} = 10 \cdot 10^3 \text{ Ом};$$

$$R_{12}^* = R_{13} = 22 \cdot 10^3 \text{ Ом}.$$

5.6. Расчет задатчика интенсивности

Динамический момент двигателя:

$$M_{дин} = 1,5 \cdot M_{дв.н} = 1,5 \cdot 2,7 \cdot 10^3 = 14,05 \text{ кНм},$$

где $M_{дв.н}$ – момент двигателя номинальный, кНм.

Время разгона клетки до ω_n :

$$t_p = \frac{\omega_{\text{дв.н}} \cdot J}{1,5 \cdot M_{\text{дв.н}}} = \frac{\omega_{\text{дв.н}} \cdot J}{M_{\text{дин}}} = \frac{33 \cdot 216,4}{14,05 \cdot 10^3} = 0,48 \text{ с},$$

где $\omega_{\text{дв.н}}$ – частота вращения номинальная, рад/с;

J – момент инерции двигателя и механизма, кг · м²;

$M_{\text{дв.н}}$ – момент двигателя номинальный, кНм.

Напряжение выхода ЗИ, соответствующее $\omega_{\text{н}}$:

$$U_{\text{зи}} = U_0 \cdot \frac{\omega_{\text{дв.н}}}{\omega_{\text{мах}}} = 10 \cdot \frac{33}{157} = 2,1 \text{ В},$$

где U_0 – напряжение системы регулирования, В;

$\omega_{\text{дв.н}}$ – частота вращения номинальная, рад/с;

$\omega_{\text{мах}}$ – угловая скорость двигателя максимальная, рад/с.

Темп изменения выходного напряжения, соответствующее $\omega_{\text{дв.н}}/t_p$:

$$\frac{dU_{\text{вых}}}{dt} = \frac{U_{\text{зи}}}{t_p} = \frac{3,14}{0,48} = 6,54 \text{ В/с},$$

где $U_{\text{зи}}$ – напряжение выхода ЗИ, соответствующее $\omega_{\text{н}}$, В;

t_p – время разгона клетки до $\omega_{\text{н}}$, с.

Устанавливаем:

$$C_{10}^* = 1 \cdot 10^{-6} \text{ Ф};$$

$$C_{11}^* = 10 \cdot 10^{-6} \text{ Ф};$$

$$C_{32}^* = 100 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}.$$

Постоянная интегрирования:

$$T_{\text{и}} = C_{10}^* \cdot R_{32} = 1 \cdot 10^{-6} \cdot 100 \cdot 10^3 = 0,1 \text{ с},$$

где R_{32} – заданное сопротивление, Ом.

Напряжение ограничения темпа изменения скорости:

$$U_{\text{огр}} = \frac{dU_{\text{вых}}}{dt} \cdot T_{\text{и}} = 6,54 \cdot 0,1 = 0,654 \text{ В},$$

где $\frac{dU_{\text{вых}}}{dt}$ – темп изменения выходного напряжения, соответствующее

$\omega_{\text{дв.н}}/t_p$, В/с;

$T_{\text{и}}$ – постоянная интегрирования, с.

5.7. Расчет напряжений ограничения регулятора мощности

Напряжение ограничения регулятора мощности (PM), соответствующее $2,5I_{дв.н}$ и номинальному потоку, формируется на усилителе А2.3.

Принимаем: $U_{огр1} = 10$ В.

Напряжение ограничения регулятора мощности, соответствующее $2I_{дв.н}$ и минимальному потоку:

$$U_{огр2} = U_{огр1} \cdot \frac{\lambda_{ро}}{\lambda_{рн}} = 10 \cdot \frac{2,5}{2} = 12,5 \text{ В,}$$

где $\lambda_{ро}$ – рабочая перегрузка по току при $n_{дв.н}$;

$\lambda_{рн}$ – рабочая перегрузка по току при $n_{дв.мах}$.

Напряжение выхода формирователя потока, соответствующее номинальному потоку, принимаем: $U_{ф1} = 10$ В.

Напряжение выхода формирователя потока, соответствующее минимальному потоку:

$$U_{ф2} = U_{ф1} \cdot \frac{\omega_{дв.н}}{\omega_{мах}} = 10 \cdot \frac{33}{105} = 12,5 \text{ В,}$$

где $U_{ф1}$ – напряжение выхода формирователя потока, соответствующее номинальному потоку, В;

$\omega_{дв.н}$ – частота вращения номинальная, рад/с;

$\omega_{мах}$ – угловая скорость двигателя максимальная, рад/с.

5.8. Расчет ограничения di/dt

Напряжение ограничения выхода усилителя А2.4. устройства А8, соответствующее заданию тока $2I_{дв.н}$ принимаем: $U_{вых} = 10$ В.

Темп изменения выходного напряжения, соответствующий темпу изменения тока якоря $\frac{dI_{я}}{dt}$:

$$\frac{dU_{вых}}{dt} = \frac{dI_{я}}{dt} \cdot \frac{U_{вых}}{2} = 10 \cdot \frac{10}{2} = 50 \text{ В/с,}$$

где $\frac{dI_{\text{я}}}{dt}$ – скорость изменения производной тока якоря, А/с.

Постоянная интегрирования ограничения di/dt :

$$T_{\text{и}}^* = C_{13}^* \cdot R_{37} = 0,47 \cdot 10^{-6} \cdot 15 \cdot 10^3 = 0,007 \text{ с,}$$

где $C_{13}^* = C_5^*$ – принятая ёмкость в цепи РТ, Ф;

R_{37} – заданное сопротивление, Ом.

Напряжение ограничения усилителя А2.2. устройства А8, соответствующее темпу изменения тока двигателя:

$$U_{\text{огр}} = \frac{dU_{\text{вых}}}{dt} \cdot T_{\text{и}}^* = 50 \cdot 0,007 = 0,35 \text{ В,}$$

где $\frac{dU_{\text{вых}}}{dt}$ – темп изменения выходного напряжения, соответствующий темпу изменения тока якоря $\frac{dI_{\text{я}}}{dt}$, В/с;

$T_{\text{и}}^*$ – постоянная интегрирования ограничения di/dt , с.

5.9. Расчет системы возбуждения

Базовые величины:

Базовый ток: $I_{\text{ош}} = I_{\text{вн}} = 45,2 \text{ А.}$

Базовое напряжение: $U_{\text{обв}} = 96,5 \text{ В.}$

Напряжение датчика тока возбуждения

При $1,2I_{\text{вн}}$: $U_{\text{дт.мах}} = 10 \text{ В.}$

Напряжение датчика тока возбуждения при $1I_{\text{вн}}$:

$$U_{\text{вн}} = \frac{U_{\text{дт.мах}} \cdot I_{\text{вн}}}{1,2 \cdot I_{\text{вн}}} = \frac{10}{1,2} = 8,3 \text{ В,}$$

где $U_{\text{дт.мах}}$ – напряжение датчика тока возбуждения при $1,2I_{\text{вн}}$, В;

$I_{\text{вн}}$ – базовый ток, А.

Коэффициент датчика тока:

$$\bar{K}_{\text{ит}} = \frac{U_{\text{вн}}}{U_0} = \frac{8,3}{10} = 0,83,$$

где $U_{\text{вн}}$ – напряжение датчика тока возбуждения при $1I_{\text{вн}}$, В;

U_0 – напряжение системы регулирования, В.

Вводная проводимость РВ по каналу ОС:

$$\bar{\rho}_B = \frac{1}{\bar{K}_{ИТ}} \cdot \frac{U_{ВН}}{U_{\phi}} = \frac{8,3}{0,83 \cdot 10} = 1,$$

где $U_{ВН}$ – напряжение датчика тока возбуждения при $1I_{ВН}$, В;

$\bar{K}_{ИТ}$ – коэффициент датчика тока;

U_{ϕ} – выходное напряжение измерителя потока, В.

ЭДС холостого хода тиристорного возбудителя:

$$E_{dov} = k_{ВУ} \cdot U_{П} = 1,35 \cdot 380 = 513 \text{ В},$$

где $k_{ВУ}$ – коэффициент выпрямления по напряжению;

$U_{П}$ – напряжение питания тиристорного возбудителя, В.

Напряжение на обмотке возбуждения:

$$U_{ВН} = E_{dov} \cdot \cos(90^\circ - k_{\phi} \cdot U_{У}) = 513 \sin 20U_{У},$$

где E_{dov} – ЭДС холостого хода тиристорного возбудителя, В;

$k_{\phi} = 20$ эл. гр./В – коэффициент фазосмещения;

$U_{У}$ – напряжение управления, В.

Напряжение управления, соответствующее $U_{ВН}$:

$$U_{УН} = \frac{\arcsin \frac{U_{ВН}}{E_{dov}}}{k_{\phi}} = \frac{\arcsin \frac{96,5}{513}}{20} = 0,54 \text{ В},$$

где $U_{ВН}$ – базовое напряжение, В;

E_{dov} – ЭДС холостого хода тиристорного возбудителя, В;

$k_{\phi} = 20$ эл. гр./В – коэффициент фазосмещения.

Усредненный коэффициент тиристорного возбудителя:

$$K_{ТПВ} = \frac{E_{dov} - U_{ВН}}{U_{У0} - U_{УН}} = \frac{513 - 96,5}{6 - 0,54} = 76,3,$$

где E_{dov} – ЭДС холостого хода тиристорного возбудителя, В;

$U_{ВН}$ – базовое напряжение, В;

$U_{У0}$ – напряжение управления (данные завода), В;

$U_{УН}$ – напряжение управления, соответствующее $U_{ВН}$, В.

Коэффициент тиристорного возбудителя в относительных единицах:

$$\bar{k}_{\text{ТПВ}} = k_{\text{ТПВ}} \cdot \frac{U_0}{U_{\text{СВ}}} = 76,3 \cdot \frac{10}{96,5} = 7,9,$$

где $k_{\text{ТПВ}}$ – усредненный коэффициент тиристорного возбудителя;

U_0 – напряжение системы регулирования, В;

$U_{\text{СВ}}$ – базовое напряжение, В.

Передаточная функция цепи возбуждения двигателя ($\bar{k}_\phi = 1$):

$$W_{\text{ОВД}} = \frac{1}{1 + (T_{\text{В2}} + T_{\text{В1}} \cdot \bar{k}_\phi)p} = \frac{1}{1 + T_{\text{В1}}p} = \frac{1}{1 + 1,3p},$$

где $T_{\text{В2}}$ – вторая постоянная времени цепи возбуждения, с;

$T_{\text{В1}}$ – первая постоянная времени цепи возбуждения, с.

Передаточная функция регулятора ЭДС ($\bar{k}_\phi = 1$):

$$W_{\text{РВ}} = \frac{1 + T_{\text{В1}}p}{\bar{k}_{\text{ТПВ}} + 2T_{\text{МВ}}p} = r_{\text{В}} \cdot \frac{1 + T_{\text{В1}}p}{T_{\text{В1}}p} = 4,1 \cdot \frac{1 + 1,3}{1,3} = 7,2,$$

где $T_{\text{МВ}}$ – некомпенсируемая постоянная времени контура потока возбуждения, с;

$T_{\text{В1}}$ – первая постоянная времени цепи возбуждения, с;

$\bar{k}_{\text{ТПВ}}$ – усредненный коэффициент тиристорного возбудителя;

$r_{\text{В}}$ – коэффициент пропорциональности.

Частота среза контура регулирования потока возбуждения:

$$\omega_{\text{В}} = \frac{1}{2T_{\text{МВ}}} = \frac{1}{2 \cdot 0,02} = 25 \text{ рад/с},$$

где $T_{\text{МВ}}$ – некомпенсируемая постоянная времени контура потока возбуждения, с.

Сопротивление в цепи ОС регулятора ЭДС:

$$R_{11\text{РАСЧ}} = r_{\text{В}} \cdot R_0 = 4,1 \cdot 100 \cdot 10^3 = 410 \cdot 10^3 \text{ Ом},$$

где $r_{\text{В}}$ – коэффициент пропорциональности;

R_0 – базовое сопротивление САР, Ом.

Ёмкость в цепи регулятора ЭДС:

$$C_2 = \frac{T_{\text{В1}}}{R_{11\text{РАСЧ}}} = \frac{1,3}{410 \cdot 10^3} = 3,2 \cdot 10^{-6} \text{ Ф},$$

где $T_{в1}$ – первая постоянная времени цепи возбуждения, с;

$R_{11РАСЧ}$ – сопротивление в цепи ОС регулятора ЭДС $R_{11РАСЧ} = R_{11}, \text{Ом}$.

Экономический ток возбуждения:

$$I_{\text{ЭКВ}} = 0,5 \cdot I_{\text{ВН}} = 0,5 \cdot 45,2 = 22,6 \text{ А},$$

где $I_{\text{ВН}}$ – ток возбуждения номинальный, А.

Входное сопротивление по каналу задания номинального тока возбуждения:

$$R_7 = \frac{U_{\text{ПИТ}}}{U_0} \cdot R_0 = \frac{12}{10} \cdot 100 \cdot 10^3 = 120 \cdot 10^3 \text{ Ом},$$

где $U_{\text{ПИТ}}$ – питающее напряжение, В;

U_0 – напряжение системы регулирования, В;

R_0 – базовое сопротивление САР, Ом.

Сопротивление, вводимое для задания тока возбуждения, равного $0,5I_{\text{ВН}}$:

$$R^{**} = \frac{U_{\text{ПИТ}}}{0,5 - \frac{U_0}{R_0}} - R_7 = \frac{12}{0,5 - \frac{10}{100 \cdot 10^3}} - 120 \cdot 10^3 \text{ Ом},$$

где $U_{\text{ПИТ}}$ – питающее напряжение, В;

U_0 – напряжение системы регулирования, В;

R_0 – базовое сопротивление САР, Ом;

R_7 – входное сопротивление по каналу задания номинального тока возбуждения, Ом.

Измеритель ЭДС

Входное напряжение датчика напряжения, соответствующее $U_{\text{дв.н max}} = 1,15U_{\text{дв.н}}$:

$$U'_{\text{дв.н}} = 10 \text{ В}.$$

Выходное напряжение датчика напряжения, соответствующее $U_{\text{дв.н}}$:

$$U'_{\text{дв.н1}} = U'_{\text{дв.н}} \cdot \frac{U_{\text{дв.н}}}{1,5 \cdot U_{\text{дв.н}}} = 10 \cdot \frac{440}{1,5 \cdot 440} = 8,7 \text{ В},$$

где $U'_{дв.н}$ – входное напряжение датчика напряжения, соответствующее

$$U_{дв.маx} = 1,15U_{дв.н}, \text{ В};$$

$U_{дв.н}$ – номинальное напряжение двигателя, В.

Передаточный коэффициент датчика напряжения:

$$K_{дн} = \frac{U'_{дв.н}}{1,15 \cdot U_{дв.н}} = \frac{10}{1,15 \cdot 440} = 0,0198,$$

где $U'_{дв.н}$ – входное напряжение датчика напряжения, соответствующее

$$U_{дв.маx} = 1,15U_{дв.н}, \text{ В};$$

$U_{дв.н}$ – номинальное напряжение двигателя, В.

В относительных единицах:

$$\bar{K}_{дн} = \frac{U'_{дв.н} \cdot E_{дв.н}}{1,15 \cdot U_{дв.н} \cdot U_0} = \frac{10 \cdot 410,33}{1,15 \cdot 440 \cdot 10} = 0,81,$$

где $U'_{дв.н}$ – входное напряжение датчика напряжения, соответствующее

$$U_{дв.маx} = 1,15U_{дв.н}, \text{ В};$$

$E_{дв.н}$ – ЭДС двигателя номинальное, В;

$U_{дв.н}$ – номинальное напряжение двигателя, В;

U_0 – напряжение системы регулирования, В.

Передаточный коэффициент ДТ: $\bar{K}_{дн} = 0,44$.

Напряжение выхода усилителя А3 устройства А7, соответствующее $E_{дв.н}$ принимаем: $U_{уэ} = 8,3$ В.

Передаточный коэффициент измерителя ЭДС:

$$K_э = \frac{U_{уэ}}{E_{дв.н}} = \frac{8,3}{410,33} = 0,02,$$

где $E_{дв.н}$ – ЭДС двигателя номинальная, В.

В относительных единицах:

$$K_э = \frac{U_{уэ} \cdot E_{дв.н}}{E_{дв.н} \cdot U_0} = \frac{8,3}{10} = 0,83,$$

где $U_{уэ}$ – напряжение выхода усилителя А3 устройства А7, соответствующее $E_{дв.н}$, В;

$E_{\text{дв.н}}$ – ЭДС двигателя номинальная, В;

U_0 – напряжение системы регулирования, В.

Вводная проводимость регулятора ЭДС по каналу ОС по ЭДС:

$$\bar{\rho}_3 = \frac{1}{\bar{K}_3} = \frac{1}{0,83} = 1,2,$$

где \bar{K}_3 – передаточный коэффициент измерителя ЭДС в относительных единицах.

Коэффициент передачи датчика напряжения и тока:

$$K_1 = \frac{\bar{K}_3}{K_{\text{дн}}} = \frac{0,83}{0,81} = 1,02;$$

$$K_2 = \frac{\bar{K}_3 \cdot \bar{R}_д}{\bar{K}_{\text{дт}}} = \frac{0,83 \cdot 0,074}{0,81} = 0,14,$$

где \bar{K}_3 – передаточный коэффициент измерителя ЭДС в относительных единицах.

$\bar{R}_д$ – сопротивление якорной цепи двигателя с учетом ошиновки, Ом;

$\bar{K}_{\text{дт}}$ – передаточный коэффициент ДТ.

Сопротивление в цепи ОС усилителя АЗ:

$$R_{18} = K_1 \cdot R_0 = 1,02 \cdot 100 \cdot 10^3 = 102 \cdot 10^3,$$

где K_1 – коэффициент передачи датчика напряжения;

R_0 – базовое сопротивление САР, Ом.

Постоянная фильтра на входе по каналу напряжения: $T_\phi = 0,005$ с.

Общее сопротивление входной цепи АЗ от датчика напряжения:

$$R_{13} + R_{15} = 100 \cdot 10^3 \text{ Ом.}$$

Ёмкость входной цепи:

$$C_6^* = \frac{T_\phi}{\frac{R_{13} \cdot R_{15}}{R_{13} + R_{15}}} = \frac{0,005}{25,5 \cdot 10^3} = 0,2 \cdot 10^{-6} \text{ Ф,}$$

где R_{13}, R_{15} – сопротивления входной цепи АЗ от датчика напряжения, Ом;

T_ϕ – постоянная фильтра на входе по каналу напряжения, с.

Сопротивление на входе измерителя ЭДС по каналу тока:

$$R^* = \frac{R_0}{k_2} = \frac{100 \cdot 10^3}{0,14} = 714 \cdot 10^3 \text{ Ом},$$

где R_0 – базовое сопротивление САР, Ом;

k_2 – коэффициент передачи датчика тока.

Ёмкость в цепи дифференцирования сигнала от датчика тока:

$$C^* = \frac{T_d}{R^*} = \frac{0,005}{714 \cdot 10^3} = 7 \cdot 10^{-9} \text{ Ф},$$

где T_d – постоянная дифференцирования, с;

R^* - сопротивление на входе измерителя ЭДС по каналу тока, Ом.

Принципиальная схема измерителя ЭДС представлена на рисунке 15.

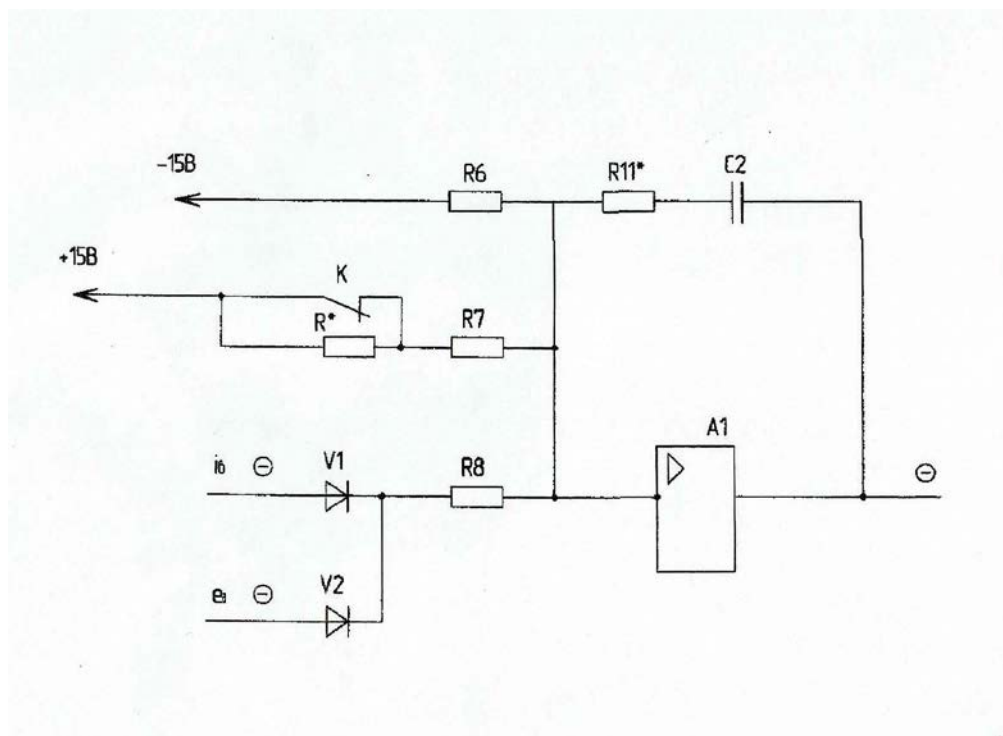


Рисунок 15 – Принципиальная схема измерителя ЭДС

6. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ

Проведем расчет затрат на капитальный ремонт редукционного стана трубопрокатного агрегата ТПА-80.

Капитальный ремонт заключается в замене старого электропривода на новый унифицированный комплектный тиристорный электропривод КТУ-320/440 и замене трансформаторов.

Затраты на капитальный ремонт предполагают затраты на покупку оборудования и выплату заработной платы рабочим.

Проведем расчет затрат на покупку необходимого оборудования.

Затраты на покупку унифицированного комплектного тиристорного электропривода КТУ – 320/440:

$$Z_{эл} = 600.000 \cdot 21 = 12.600.000 = 12.600 \text{ т. р.}$$

Затраты на покупку трансформаторов:

$$Z_{тр} = 300.000 \cdot 20 = 6.000.000 = 6.000 \text{ т. р.}$$

Прочие затраты составляют 10% от стоимости всего купленного оборудования:

$$Z_{пр} = (12.600 + 6.000) \cdot 10\% = 1.860 \text{ т. р.}$$

Итого на покупку всего оборудования было затрачено:

$$Z_{пр} = 12.600 + 6.000 + 1.860 = 20.460 \text{ т. р.}$$

Опираясь на расчеты затрат на покупку оборудования составим таблицу 2.

Таблица 2 – Затраты на покупку оборудования.

Оборудование	Кол-во	Цена, т.р.	Единица, шт.	Итого затрат, т.р.
Унифицированный комплектный тиристорный электропривод КТУ-320/440	1	600	20 + 1 (в холодный резерв) = 21	$Z_1 = 12\ 600$
трансформатор	1	300	20	6 000
Прочие затраты (10% от стоимости оборудования)	-	-	-	1 860
			итого	$\Sigma_{об} = 20\ 460$

Стоимость всего оборудования взята из данных завода производителя.

Капитальный ремонт производится планоно - 1 раз в год, поэтому затраты на выплату заработной платы работникам не оплачиваются отдельно и уже включены в оклад.

Капитальный ремонт длится 1 месяц, а именно 20 рабочих дней.

По данным ОАО «Синарский трубный завод» для замены оборудования нам понадобятся рабочие бригады следующих специальностей:

- электромонтажник (бригада из 6 человек);
- наладчик (бригада из 6 человек);
- производитель работ.

Рассчитаем затраты на выплату заработной платы каждой бригаде.

Расчет заработной платы бригаде электромонтажников:

$$ЗП_{эм} = 6 \cdot 25 = 150 \text{ т. р.}$$

Расчет заработной платы бригаде наладчиков:

$$ЗП_{нал} = 6 \cdot 25 = 150 \text{ т. р.}$$

Сумма всех затрат на выплату заработной платы рабочим всех специальностей:

$$\Sigma_{зп} = 150 + 150 + 30 = 330 \text{ т. р.}$$

Трудоёмкость работ:

$$Т = 20 \cdot 8 = 160 \text{ ч.}$$

Заработная плата 1 рабочего:

$$ЗП_1 = 156,25 \cdot 160 = 25 \text{ т. р.}$$

Заработная плата бригады электромонтажников:

$$ЗП_м = 25 \cdot 6 = 150 \text{ т. р.}$$

Заработная плата бригады наладчиков:

$$ЗП_н = 25 \cdot 6 = 150 \text{ т. р.}$$

Заработная плата

Опираясь на данные расчетов, составим таблицу 3.

Таблица 3 - Затраты на выплату заработной платы рабочим

Специальность	Количество человек в бригаде	Трудоёмкость работ, ч.	Часовая ставка 1 рабочего	Итого Заработная плата, т.р.
Электромонтажник	6	160	156,25	150
Наладчик	6	160	156,25	150
Начальник цеха	-	-	-	30
			итого	$\Sigma_{зп} = 330$

Расчет затрат на заработную плату рабочим, учитывая дополнительную заработную плату, страховые взносы:

$$ЗП = 330\ 000 \cdot 1,2 \cdot 1,3 \cdot 1,15 = 592,02 \text{ т. р.}$$

Рассчитав затраты на покупку оборудования и выплату заработной платы рабочим, можно рассчитать затраты на капитальный ремонт редуционного стана трубопрокатного агрегата ТПА-80:

$$З = \Sigma_{об} + ЗП = 20460 + 592,02 = 21052,02 \text{ т. р.}$$

Плановый капитальный ремонт позволит увеличить производительность всего трубопрокатного агрегата на 10%, так как редуционный стан является заключительным станом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В выпускной квалификационной работе разработан современный электропривод многоклетьевого редукционного стана для производства горячекатаных бесшовных труб различного назначения – для нефтяной и газовой промышленности, строительства промышленных и жилищных зданий. Параметры от 20 до 110 с толщиной стенки от 3,5 до 6 мм длиной от 6 до 12 метров.

При разработке ВКР были изучены вопросы технологий производства горячекатаных бесшовных труб на трубопрокатном агрегате ТПА-80. Редукционный стан предназначен для редуцирования черновой трубы в чистовую, что означает её удлинение в 2-4 раза и уменьшение её наружного диаметра до заданного значения для готовой трубы при сохранении внутреннего диаметра неизменным. Примененные, в проекте, системы электропривода позволяет удовлетворить всем требованиям технологического процесса трубопрокатного агрегата ТПА-80 с целью получения необходимого качества готовых труб и снижения отходов металла при окончательном изготовлении чистовых труб на участке отделки труб

В качестве электропривода каждой клетки 20 клетьевого редукционного стана принят (одинаково для всех клеток) электродвигатель постоянного тока МП2»-(110 кВ,440 В,280 А, 400/1500 об/мин).

В качестве источника питания и управления скоростным режимом каждого двигателя принят комплектный тиристорный электропривод КТУ - 320/440, который позволяет реализовать двухзонную систему регулирования скорости во всем диапазоне требуемой частоты вращения прокатных двигателей для производства заданного сортамента труб. Элементная база КТУ – 320/440, силовые тиристоры отечественного производства и аналоговая система регулирования на элементах унифицированной блочной системы регуляторов (УБСР-АИ).

Двухзонная система регулирования разработанная в ВКР состоит из 2-х частей, которые позволяют осуществлять регулирование скорости электропривода каждой клетки во всем диапазоне от минимальной до

максимально необходимой скоростей прокатки. Задание скоростного режима, а также управление процессом редуцирования труб осуществляется от микропроцессорного устройства задания скорости редуцирующего стана УЗС-РС, на входы которого поступают сигналы задания от автоматизированного рабочего места оператора (РМ) для количества катающих клетей их скоростных режимов. На входы УЗС-РС также поступает информация о технологическом процессе во время прокатки труб (температура подшипников клетей, фактическая скорость двигателя каждой клети, температура охлаждающей воды).

В проекте также разработана экономическая часть, которая показывает, что срок окупаемости не более 3-х лет.

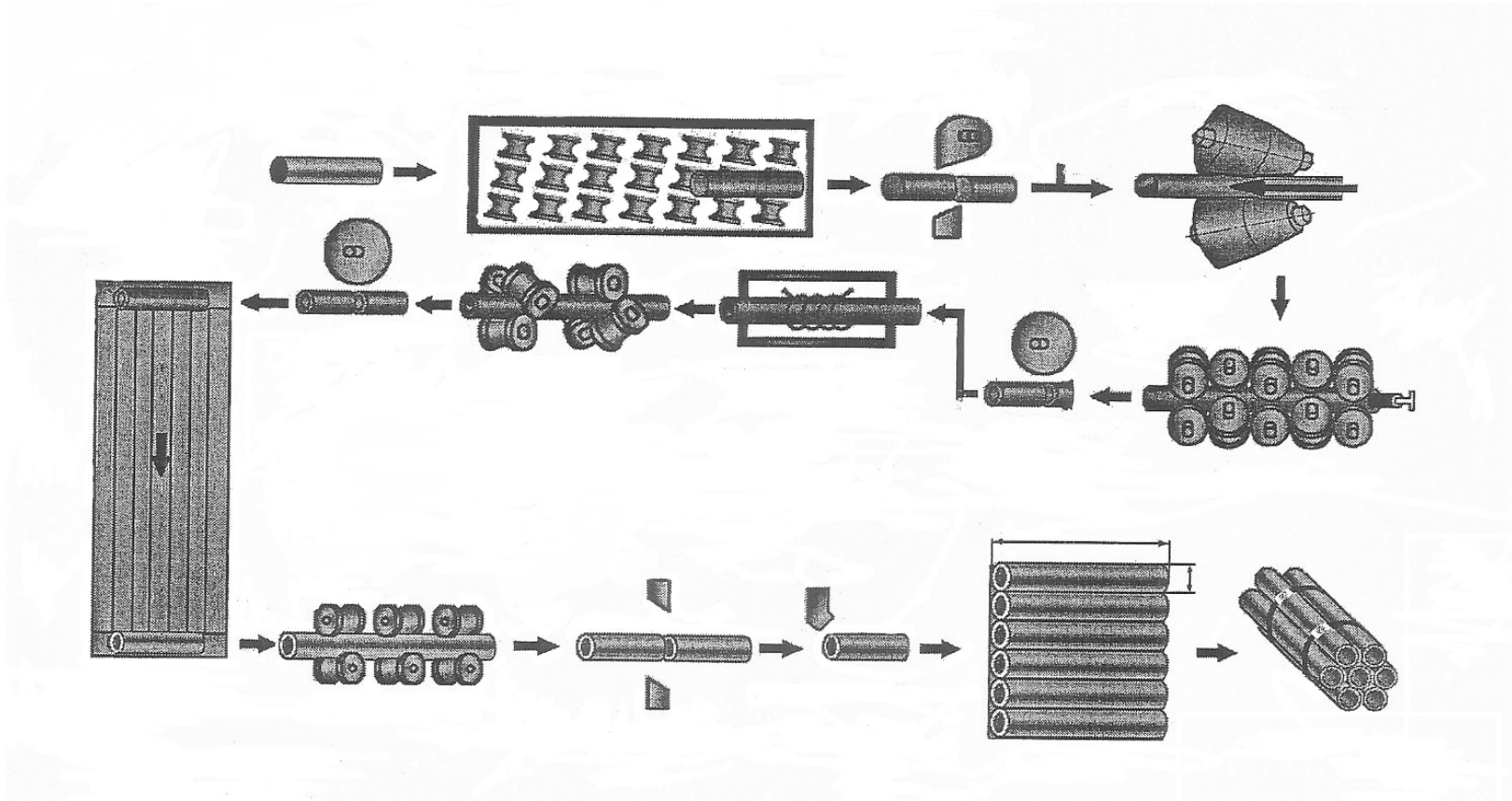
При работе над ВКР была использована современная научно-техническая и справочная литература.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Горячая прокатка и прессование труб. Изд. 3-е, переработанное и доп. / Данилов А.Ф., Глейберг А.З., Балакин В.Г., – М.: Издательство «Металлургия», 1994. - 576 с.
2. Двигатели постоянного тока для автоматизированного электропривода: Учебное пособие / Заборщикова А. В., Мельников В.И. – СПб.: Петербургский гос. университет путей и сообщения, 2014. – 84 с.
3. Исследование зазоров в линии привода рабочих валков автоматического стана трубoproкатного агрегата [Текст] Металлургическая и горнорудная промышленность/ Рахманов, С. Р.,– СПб.: Издательство «Лениздат», 2012. – 85 с.
4. Технология и оборудование трубного производства [Текст]: Учебное пособие для студентов ВПО/В.Я.Осадчий, А.С.Вавилин, В.Г. Зимовец, А.П. Коликов – М.: Издательство «Инжиниринг» 2011. – 324 с.
5. Машины и агрегаты трубного производства / Коликов А.П., Романенко В.П., Самусев С.В. – СПб.: Издательство МИСиС, 1998. – 536 с.
6. Оборудование прокатных цехов (эксплуатация, надежность): Учебное пособие для студентов сред. спец. учеб. заведений / И.Н. Гулидов. – М.: «Интермет Инжиниринг», 2004. – 320 с.
7. Производство горячекатанных труб [Текст]: Учебное пособие для студентов СПО / Головкин Р.В., – Тюмень – Издательство «Металлургия», 1984. - 262 с.
8. Производство труб [Текст]: Учебное пособие для вузов / Шевакин Ю.Ф., Глейберг А.З. – М.: Издательство «Металлургия», 2012. - 440 с.
9. 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», 2007.

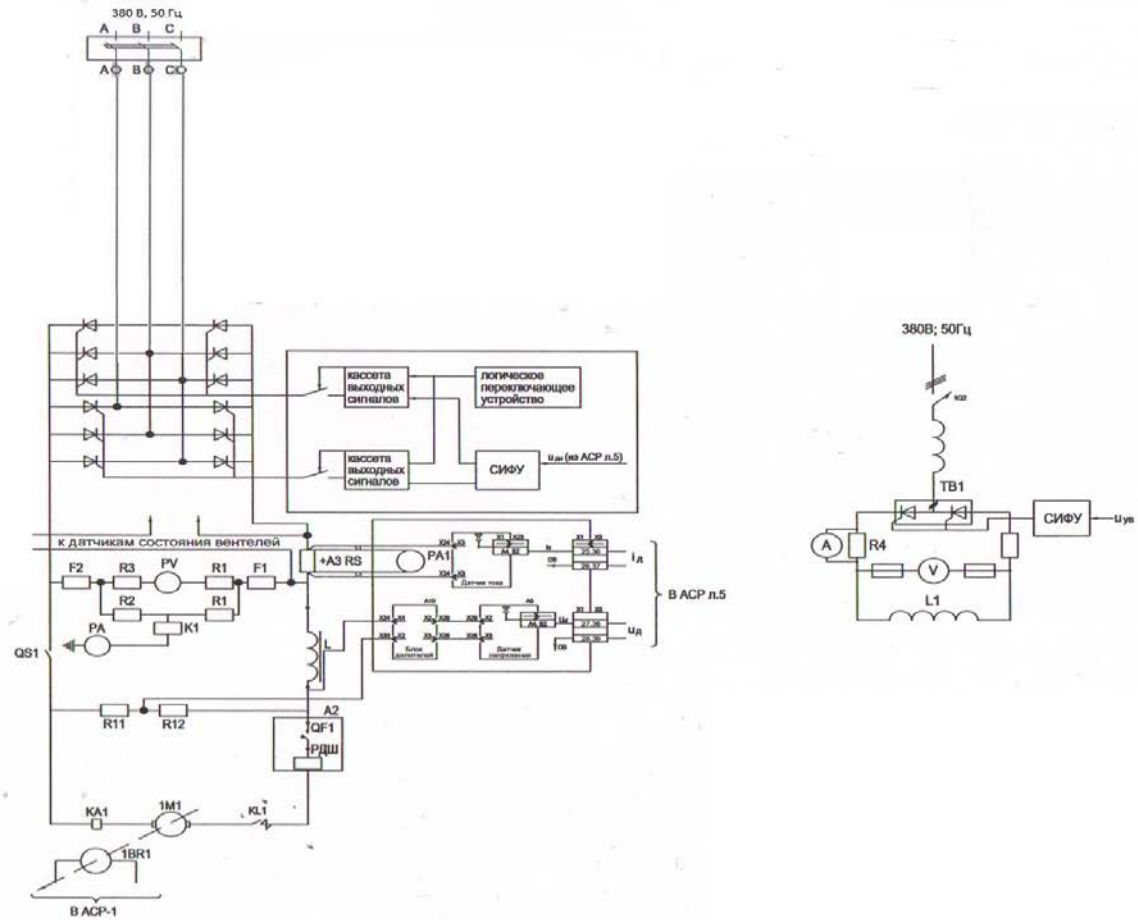
10. Расчеты рабочих клеток прокатных станов [Текст] Методическое пособие для студентов ВПО / Шилов В.А., Игнатович Ю.В. – Тюмень: УГТУ, 2011. - 68 с.
11. Сергеев, В. В. Пути совершенствования непрерывной прокатки труб. – М.: Metallurgical and Mining Industry, 2016. – С. 42-45.
12. Тартаковский Б.И., Новое оборудование для производства бесшовных труб. СПб.: Сталь, 2008. - 82 с.
13. Технология трубного производства: Учебное пособие / Данченко В.Н., - М.: Издательство «Интерметинжиниринг» 2002. - 640 с.
14. Трубное производство. Учебник / Романцев Б.А., Гончарук А.В., Вавилкин Н.М., Самусев С.В. - 2-е изд., испр. и доп. – М.: Издательство «НИТУ МИСиС», 2011. - 970 с.
15. Трубопрокатные станы [Текст] Учебник / Вердеревский В.А., Глейберг А.З., Никитин А.С., - М.: Издательство «Металлургия», 1983. - 240 с.
16. Управление электроприводами» [Текст]: Учебное пособие для вузов./ Башарин А.В., Новиков В.А., Соколовский Г.Г., – СПб.: Издательство «Энергоатомиздат», 2011. – 392с.
17. Уткин, Ю.Н. Совершенствование математической модели расчета энергосиловых параметров ТПА 159-426 [Текст] / Ю.Н. Уткин [и др.]. СПб.: Сталь, 2007. - 60 с.
18. Фотиев М.М. Электрооборудование прокатных и трубных цехов. – М.: Metallurgy, 1998. – 256 с.
19. Шефтель Н.И. Технология и производство проката. Изд. 4-е, дополненное. – М.: Издательство «Металлургия», 2004. - 462 с.
20. Экономика, организация и управление предприятием: Учебное пособие. – 2-е издание, доп. / Зайцев Н.Л. – М.: ИНФА-М, 2011. – 455 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А



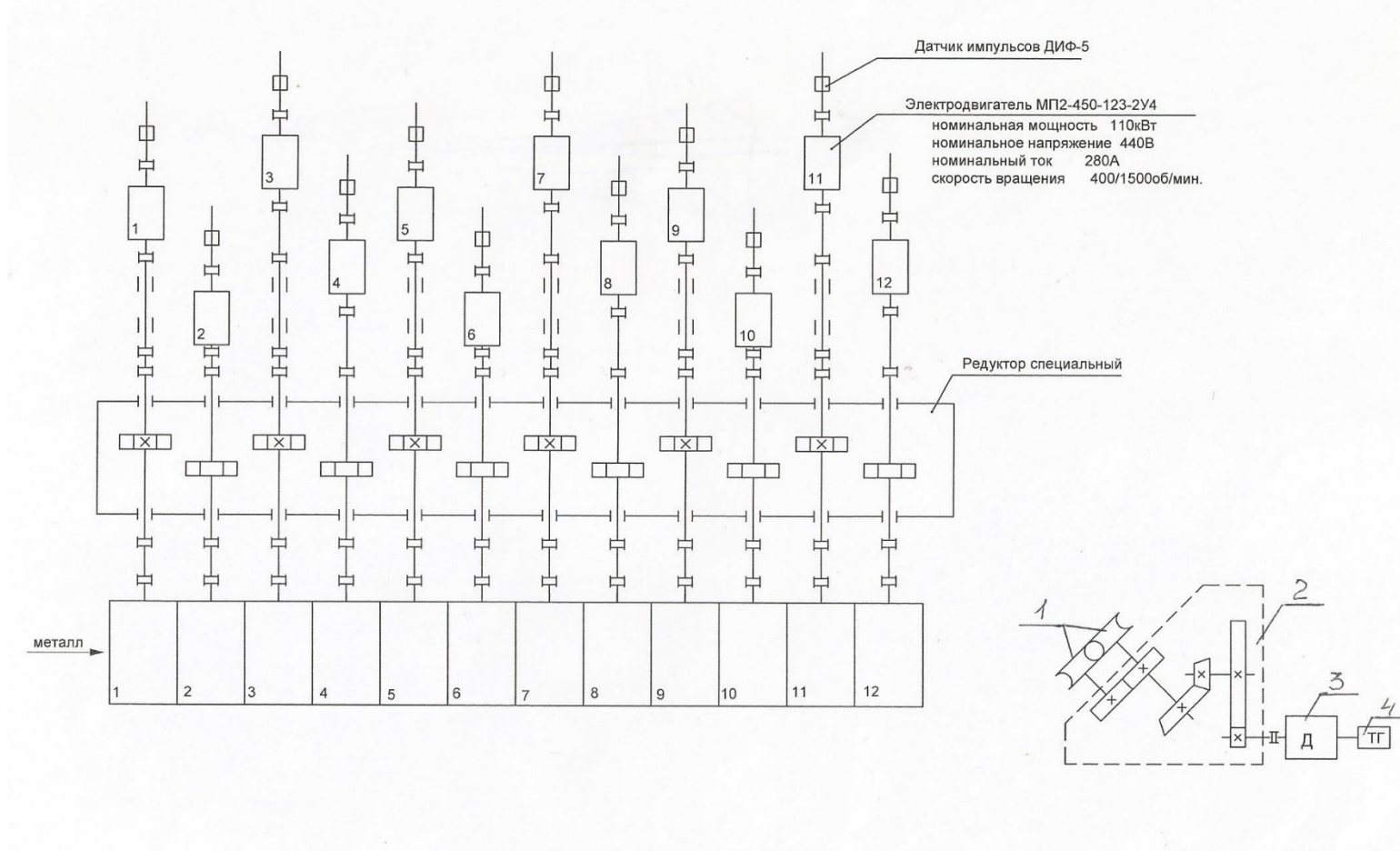
Производственный процесс трубопрокатного агрегата ТПА-80

ПРИЛОЖЕНИЕ Б



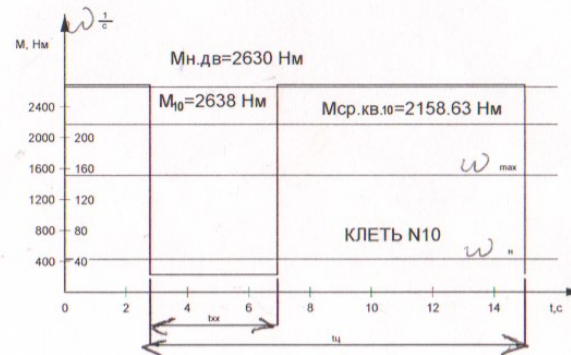
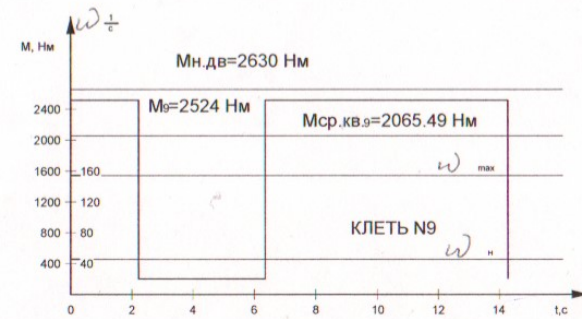
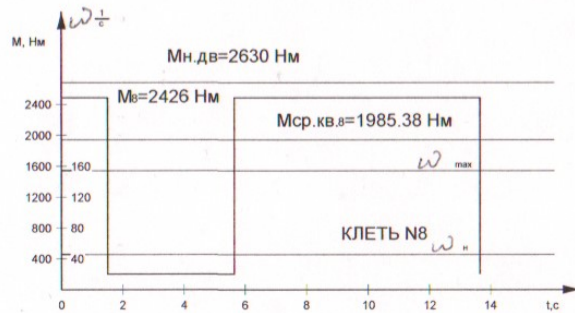
Кинематическая схема главного привода редукционного стана

ПРИЛОЖЕНИЕ В



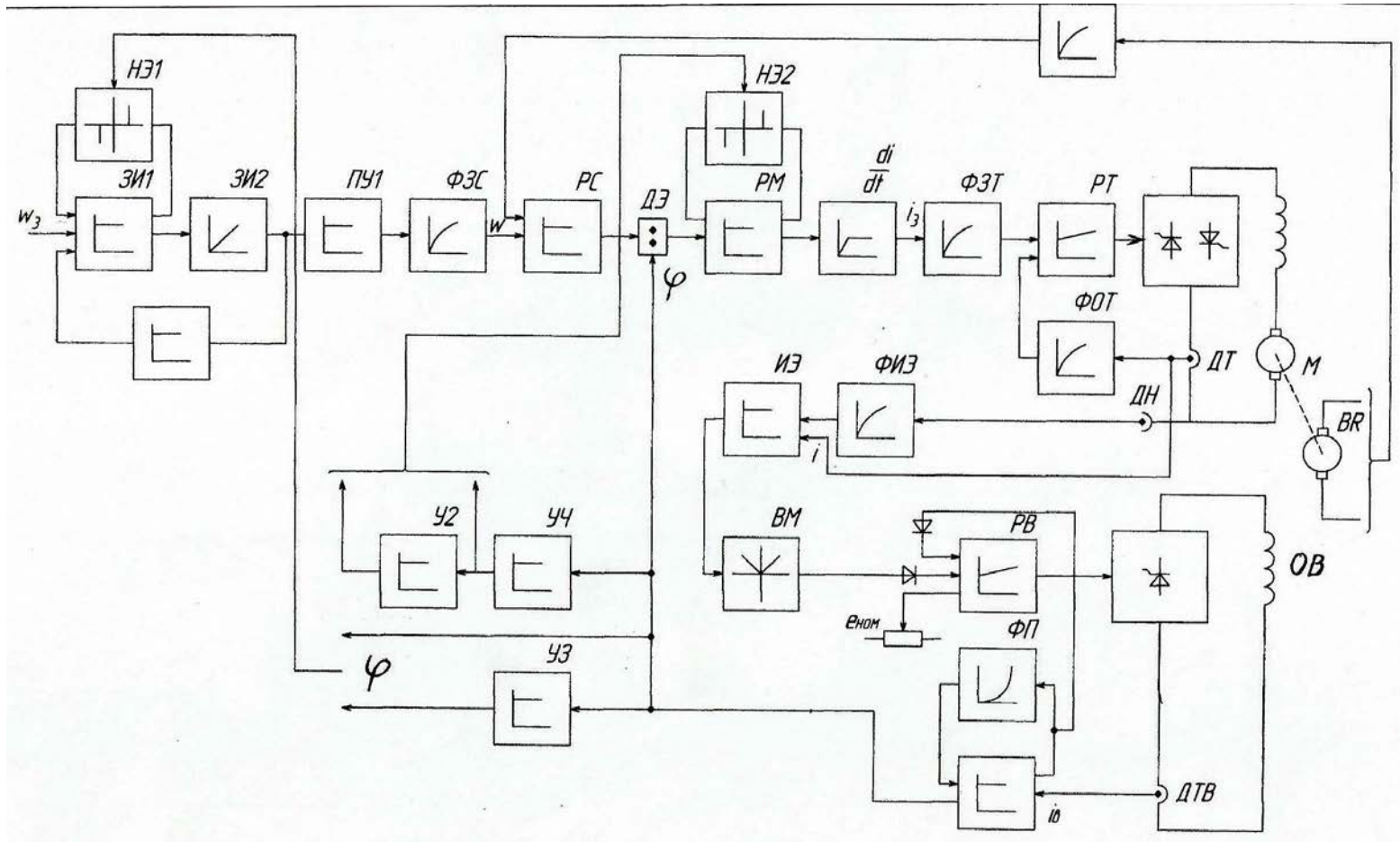
План расположения клеток. Кинематическая схема одной клетки.

ПРИЛОЖЕНИЕ Г



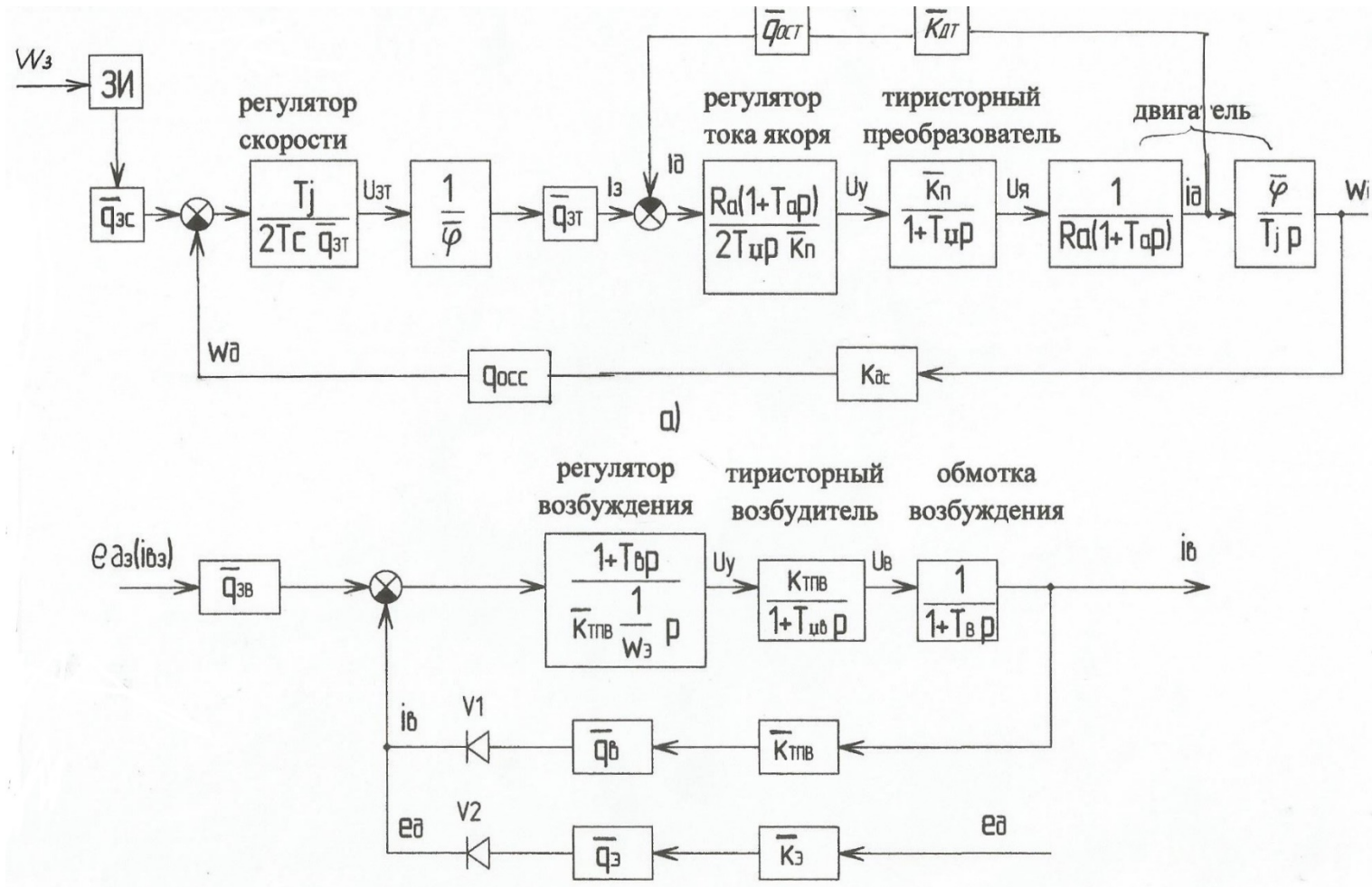
Нагрузочные диаграммы и тахограммы клеток стана № 8, 9, 10

ПРИЛОЖЕНИЕ Д



Функциональная система САР

ПРИЛОЖЕНИЕ Е



Структурная схема САУ : а) замкнутой по скорости. б) возбуждения