

Инженерная школа энергетики

Направление подготовки 13.03.02 - Электроэнергетика и электротехника (бакалавриат)

Отделение Электроэнергетики и электротехники

Профиль Электрооборудование и электрохозяйство предприятий, организаций и учреждений

**БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА**

Тема работы
<b>Электропривод горизонтальной клетки прокатного стана</b>

УДК 62-83:621.771.26.062

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
3-5Г4Б2	Пардабоев Ислон Абдукаримович		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Ланграф С.В.	К.Т.Н.		

**КОНСУЛЬТАНТЫ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Мелик-Гайказян М.В.	к.э.н., доцент		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Гуляев М.В.			

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

И. о. руководителя ОЭЭ ИШЭ	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Ивашутенко А.С.	К.Т.Н.		

## Планируемые результаты обучения по ООП

Код результата	Результат обучения
<b>Р 1</b>	Применять соответствующие гуманитарные, социально-экономические, математические, естественно-научные и инженерные знания, компьютерные технологии для решения задач расчета и анализа <i>электрических устройств, объектов и систем.</i>
<b>Р 2</b>	Уметь формулировать задачи в области <i>электроэнергетики и электротехники</i> , анализировать и решать их с использованием всех требуемых и доступных ресурсов.
<b>Р 3</b>	Уметь проектировать <i>электроэнергетические и электротехнические системы и их компоненты.</i>
<b>Р 4</b>	Уметь планировать и проводить необходимые экспериментальные исследования, связанные с определением параметров, характеристик и состояния <i>электрооборудования, объектов и систем электроэнергетики и электротехники</i> , интерпретировать данные и делать выводы.
<b>Р 5</b>	Применять современные методы и инструменты практической инженерной деятельности при решении задач в области <i>электроэнергетики и электротехники.</i>
<b>Р 6</b>	Иметь практические знания принципов и технологий <i>электроэнергетической и электротехнической</i> отраслей, связанных с особенностью проблем, объектов и видов профессиональной деятельности профиля подготовки на предприятиях и в организациях – потенциальных работодателях.
<b>Р 7</b>	Использовать знания в области менеджмента для управления комплексной инженерной деятельностью в области <i>электроэнергетики и электротехники</i>
<b>Р 8</b>	Использовать навыки устной, письменной речи, в том числе на иностранном языке, компьютерные технологии для коммуникации, презентации, составления отчетов и обмена технической информацией в областях <i>электроэнергетики и электротехники.</i>
<b>Р 9</b>	Эффективно работать индивидуально и в качестве члена или лидера команды, в том числе междисциплинарной, в области <i>электроэнергетики и электротехники.</i>
<b>Р 10</b>	Проявлять личную ответственность и приверженность нормам профессиональной этики и нормам ведения комплексной инженерной деятельности.
<b>Р 11</b>	Осуществлять комплексную инженерную деятельность в области <i>электроэнергетики и электротехники</i> с учетом правовых и культурных аспектов, вопросов охраны здоровья и безопасности жизнедеятельности.
<b>Р 12</b>	Быть заинтересованным в непрерывном обучении и совершенствовании своих знаний и качеств в области <i>электроэнергетики и электротехники.</i>

Инженерная школа энергетики

Отделение Электроэнергетики и электротехники

Направление подготовки 13.03.02 - Электроэнергетика и электротехника (бакалавриат)

Профиль Электрооборудование и электрохозяйство предприятий, организаций и учреждений

УТВЕРЖДАЮ:

И. о. руководителя ОЭЭ ИШЭ

\_\_\_\_\_ А.С. Ивашутенко

(Подпись)     (Дата)     (Ф.И.О.)

**ЗАДАНИЕ**

**на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

<b>Бакалаврской работы</b>
----------------------------

(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
3-5Г4Б2	Пардабоеву Ислому Абдукаримовичу

Тема работы:

<b>Электропривод горизонтальной клетки прокатного стана</b>	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	№ 3483/с от 06.05.2019г

Срок сдачи студентом выполненной работы:	30.05.2019г.
--	--------------

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<b>Исходные данные к работе</b>	Материалы преддипломной практики, техническая литература, техническая документация
---------------------------------	--

<b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b>	Введение; описание технологического процесса; обоснование и выбор системы электропривода; выбор элементов и расчет параметров силового канала регулируемого электропривода; синтез и анализ линеаризованной системы автоматического управления регулируемого электропривода; синтез и анализ нелинейной САУ РЭП; расчет статических и динамических характеристик, принципиальная электрическая схема, защита и сигнализация социальная ответственность проекта; финансовый менеджмент; заключение.
---	--

<b>Перечень графического материала</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- схема кинематическая;</li> <li>- схема электрическая принципиальная;</li> <li>- схема электрическая функциональная;</li> <li>- схема электрическая структурная;</li> <li>- демонстрационный лист;</li> <li>- технико-экономические показатели;</li> </ul>
--	--

**Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы**

Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Мелик-Гайказян Мария Вигеновна
Социальная ответственность	Гуляев Милий Всеволодович

**Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:**

**Заключение**

<b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b>	05.04.2019г.
---	--------------

**Задание выдал руководитель:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Ланграф С.В.	К.Т.Н.		05.04.2019г.

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
3-5Г4Б2	Пардабоев Ислон Абдукаримович		05.04.2019г.

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
 федеральное государственное автономное  
 образовательное учреждение высшего образования  
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Инженерная школа энергетике

Направление подготовки 13.03.02 - Электроэнергетика и электротехника (бакалавриат)

Отделение Электроэнергетики и электротехники

Профиль Электрооборудование и электрохозяйство предприятий, организаций и учреждений

Период выполнения весенний семестр 2018 /2019 учебного года

Форма представления работы:

**Бакалаврская работа**

(бакалаврская работа, дипломный проект/работа, магистерская диссертация)

**КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН**  
**выполнения выпускной квалификационной работы**

Срок сдачи студентом выполненной работы:	30.05.2019г.
--	--------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
23.05.2019	Основная часть	60
15.05.2019	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	20
17.05.2019	Социальная ответственность	20

**СОСТАВИЛ:**

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Ланграф С.В.	К.Т.Н.		

**СОГЛАСОВАНО:**

**И. о. руководителя ОЭЭ ИШЭ**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Ивашутенко А.С.	К.Т.Н.		

## РЕФЕРАТ

В выпускной квалификационной работе произведен расчет существующего оборудования горизонтальной клетки №10 непрерывно–заготовочного стана обжимного цеха.

Выпускная квалификационная работа включает в себя 131 листов печатного текста, 15 таблицы, 37 рисунков, состоит из четырех разделов: описание технологического процесса, выбор элементов и расчет параметров силового канала регулируемого электропривода, использовано 13 источников литературы.

В разделе описание технологического процесса описан технологический процесс участка, электропривод и механизм клетки, приведена кинематическая схема, а также дано обоснование рода тока.

В разделе выбор элементов и расчет параметров силового канала регулируемого электропривода произведен выбор электрооборудования, расчет параметров и характеристик элементов силовой цепи. В соответствии с кинематической схемой клетки и параметрами прокатываемого металла был выбран электродвигатель постоянного тока . Был произведен выбор комплектного регулируемого электропривода , выбран преобразователь цепи якоря и цепи возбуждения.

Целью раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» является определение перспективности и успешности проекта, оценка его эффективности, уровня возможных рисков, разработка механизма управления и сопровождения конкретных проектных решений на этапе реализации.

. В разделе «Социальная ответственность» рассмотрены вопросы охраны труда и ТБ. Проанализированы опасные и вредные факторы производства.

## ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ

Произвести проверочный расчет электропривода горизонтальной клетки, удовлетворяющего следующим заданным условиям и требованиям:

1. Напряжение питающей сети переменного трехфазного тока  $U_c = 10 \text{ кВ}$  с частотой  $f_c = 50 \text{ Гц}$ ;
2. Отклонение напряжения питающей сети от номинального значения  $+10 -15 \%$ ;
3. Нагрузка реактивная;
4. Режим работы – длительный;
5. Диапазон регулирования  $D = 1 : 10$ ;
6. Управление электроприводом – ручное с поста управления;
7. Работа электропривода должны осуществлять в режиме стабилизации скорости (РЭП);
8. РЭП должен обеспечить поддержание заданной частоты вращения с погрешностью не более  $10 \%$  во всем диапазоне регулирования;
9. Максимальное напряжение управления  $U_y = \pm 10 \text{ В}$ ;
10. Электродвигатель должен иметь максимально высокий КПД, минимальный момент инерции, большую нагрузочную способность;
11. Система управления электроприводом должна обеспечивать надежную защиту от перегрузок и аварий, простоту управления и обслуживания;
12. Выбранный электродвигатель должен быть предназначен для работы в условиях повышенной температуры, влажности и запыленности и иметь закрытое исполнение, и высокий класс изоляции;
13. Выбранный преобразователь должен быть предназначен для работы в закрытых стационарных помещениях при температуре окружающего воздуха от  $5^\circ$  до  $45^\circ\text{C}$  и относительной влажности не более  $80\%$ .

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	11
1 ОПИСАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА.....	15
1.1 Рабочий механизм. Назначение, описание. Кинематическая схема .....	15
1.2 Выбор рода тока и типа электропривода.....	15
1.3 Расчет и выбор электродвигателя.....	19
1.4 Расчет параметров механической системы привода .....	24
1.4.1 Определение моментов инерции элементов кинематической цепи привода	25
1.4.2 Определение приведенных моментов инерции сосредоточенных масс расчетной схемы.....	26
1.4.3 Определение угловой жесткости упругих элементов.....	26
1.4.4 Определение резонансных частот трехмассовой расчетной механической системы .....	27
1.4.5 Определение параметров двухмассовой расчетной схемы механической системы привода.....	28
2 ВЫБОР ЭЛЕМЕНТОВ И РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ СИЛОВОГО КАНАЛА РЕГУЛИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА .....	35
2.1 Выбор силового оборудования.....	35
2.1.1 Выбор тиристорного преобразователя для питания двигателя.....	35
2.1.2 Выбор силового преобразовательного трансформатора .....	37
2.1.3 Выбор сглаживающего реактора .....	38
2.2 Выбор тиристорного возбуждателя двигателя.....	40
2.2.1 Выбор трансформатора для питания тиристорного возбуждателя.....	41
2.2.2 Параметры обмотки возбуждения двигателя.....	42
2.2.3 Параметры тиристорного возбуждателя.....	43
2.2.4 Параметры силовой цепи обмотки возбуждения.....	43
2.3 Расчет параметров силовой цепи.....	44
2.3.1 Параметры тиристорного преобразователя якорной цепи.....	44
2.3.2 Параметры схемы “ТП - эквивалентный двигатель” .....	45
2.3.3 Расчет параметров тиристорного преобразователя якоря для схемы “ТП - эквивалентных двигателя” .....	47
2.4 Область работы и предельные характеристики схемы “ТП - эквивалентный двигатель” .....	48

2.5 Электромеханические характеристики системы преобразователь - двигатель	51
2.6 Структурная схема силового канала	55
2.7 Линеаризованная САУ РЭП	58
2.7.1 Структурная схема линеаризованной САУ ЭП	58
2.7.2 Оптимизация контура тока якоря	58
2.7.3 Оптимизация контура скорости двигателя	62
2.7.4 Контур скорости возмущающих воздействий	65
2.7.5 Оптимизация контура САУ ЭДС двигателя	67
2.7.5.1 Контур тока возбуждения	68
2.7.5.2 Контур ЭДС двигателя	72
2.8 Нелинейная САУ РЭП	76
2.8.1 Анализ основных нелинейностей электропривода	76
2.8.2 Структурная схема САУ ЭП	77
2.8.3 Исследование электропривода на имитационных моделях	80
2.8.4 Методика анализа статических характеристик	84
2.8.4.1 Режим стабилизации скорости	86
2.8.4.2 Режим стабилизации тока	89
ЗАДАНИЯ ДЛЯ РАЗДЕЛА «ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»	92
3. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ	93
3.1 SWOT-анализ электропривода горизонтальной клетки прокатного стана	93
3.2. Организация работ технического проекта	96
3.2.1. Структура работ в рамках технического проектирования	96
3.2.2. Определение трудоемкости выполнения ТП	98
3.2.3. Разработка графика проведения технического проекта	99
3.3. Составление сметы затрат на разработку ТП	102
3.3.1. Расчет материальных затрат	102
3.3.2. Полной заработной платы исполнителей темы	103
3.3.3. Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)	105
3.3.4. Накладные расходы	105
3.4. Формирование сметы затрат технического проекта	105
3.4. Определение ресурсоэффективности проекта	106

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ».....	109
4.СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ .....	111
4.1.Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасность.....	111
4.2.Производственная безопасность .....	113
4.2.1 Анализ опасных и вредных производственных факторов .....	113
4.2.2. Электробезопасность: .....	113
4.3. Экологическая безопасность .....	115
4.4.Безопасность в чрезвычайных ситуациях .....	116
4.4.1 Чрезвычайные ситуации.....	118
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	120
Список использованных источников .....	122
THE CONCLUSION .....	123
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	125

## **ВВЕДЕНИЕ**

Для того чтобы машина была современна более продолжительный срок, она должна обладать возможно большей новизной выполняемого ею рабочего процесса и более высокими технико-экономическими показателями по сравнению с тем, которые достигнуты на машинах этого назначения в мировой практике.

В то же время по своему научно-техническому уровню как машины, так и агрегаты в целом должны быть совершенней своих предшественников. Для преодоления этих творческих трудностей необходимо тщательное изучение в условиях эксплуатации и ремонта ранее созданного оборудования. Иными словами металлургические цехи, где установлены и работают новейшие металлургические машины и агрегаты, должны служить исходной базой для конструкторских замыслов.

Потребность в прокатном оборудовании продолжает расти и объясняется тем, что прокатка из всех способов обработки металлов пользуется наибольшим распространением вследствие непрерывности процесса, высокой производительности и возможности получения изделий самой разнообразной формы и улучшенного качества. Прокатные изделия как из стали, так и из цветных металлов (листы, полосы, ленты, различные сортовые профили, трубы, заготовки деталей машин) являются наиболее экономичным продуктом – конечным для металлургических предприятий и исходным в машиностроении, строительстве и других отраслей народного хозяйства.

Проблема снижения общегосударственных трудов и материальных затрат по производству проката должна прежде всего решаться в направлении экономии металла, в результате улучшения его физических и механических свойств и производства таких видов проката, которые давали бы возможность снижать конструктивную и технологическую металлоёмкость машин, строительных конструкций и других металлопотребляющих объектов.

Поэтому необходимо одновременно с увеличением объемов производства металлов значительно улучшить качество и расширить сортамент продукции черной металлургии. За счет повышения качества металлоизделий можно существенно снизить удельный расход стали и этим уменьшить капитальные затраты, необходимые для удовлетворения нашей страны металлом.

Особенно большими возможностями повышения качества металлопродукции обладает производство проката. Из числа основных направлений в развитии производства экономичных видов проката и труб следует выделить четыре:

1. Повышение точности размеров прокатываемых профилей и труб, т.е. снижение допустимого поля допусков на размеры профиля.

2. Придание профилю проката и трубы формы, обеспечивающей наилучшее использование металла как в самой конструкции, так и в процессе ее изготовления.

3. Повышение качества металла термическим или термомеханическим упрочнением.

4. Нанесение специальных покрытий на прокат и трубы для придания поверхности требуемых физико-химических свойств и главным образом для защиты их от коррозии.

Эффективность процесса непрерывного литья слэбов, блюмов или другой заготовки для ее последующей прокатки общеизвестна. Но эта эффективность еще более возрастает при объединении процесса литья с прокаткой в одном агрегате или стане. Применение этого технологического процесса для получения проката непрерывным методом из жидкого металла открывает большие перспективы в деле повышения эффективности металлургического производства.

При такой технологии удастся использовать первичную теплоту слитка для его деформации, исключить промежуточный склад металла и достичь полной непрерывности в процессе литья и прокатки, что обеспечит резкое повышение производительности труда.

Современные конструкции и системы регулирования прокатных станов позволяют значительно повысить точность прокатываемых изделий, т.е. уменьшить поле допусков по сравнению с действующими стандартами.

Основные способы точности повышения прокатки:

1. Применение возможно более стабильного температурного режима прокатки; при этом следует учитывать, что изменение температуры прокатки вдвойне влияет на точность размеров прокатываемого профиля.

2. Повышение жесткости рабочих клеток с целью снижения разницы в упругой деформации клетки в результате неизбежного изменения усилий, действующих на валки при прокатке.

3. Применение систем автоматического регулирования межвалкового расстояния в зависимости от показаний измерителя профиля или усилий на валки.

4. Автоматическое регулирование натяжения металла в процессе прокатки или полное его устранение (у непрерывных станов горячей прокатки).

Одним из экономических видов проката является листовая или широкополосовой, особенно холоднокатаный.

Из листового проката можно изготавливать весьма легкие и самые разнообразные штампованные и сварные конструкции. Применение сварных конструкций из листового проката вместо стальных отливок достигается уменьшение их массы в среднем на 30-50%. Сварные: трубы и многие другие профили, изготавливаемые из полосового проката, как правило, удается выполнять более тонкостенными по сравнению с горячекатаными, и их применение взамен последних снижает расход металла на 10-15%.

Экономические расчеты свидетельствуют, что наиболее эффективными для производства листов из стали являются широкополосовые непрерывные или полунепрерывные станы, которые по сравнению со станами других типов выгоднее как по эксплуатационным расходам, так и по первоначальным удельным затратам. Это объясняется меньшим расходным коэффициентом, большей производительностью

стана, а следовательно, и труда, меньшей массой оборудования, приходящейся на единицу выпускаемой продукции, и другими факторами.

Чем сложнее рабочий процесс, выполняемый агрегатом, больше производительность и размеры агрегата, тем более необходима автоматизация.

Управлять современным металлургическим оборудованием должны автоматические системы, способные устанавливать наивыгоднейший режим работы агрегатов и поддерживать требуемые параметры с целью получения продукции высокого качества.

# 1 ОПИСАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

## 1.1 Рабочий механизм. Назначение, описание. Кинематическая схема

Механизм прокатной клетки состоит из следующих частей (рисунок 1):

**клеть-11** – рабочая часть, состоит из двух валков горизонтального положения, предназначенных для обжатия металла необходимого калибра;

**шпиндели-9** – предназначены для передачи вращения от шестерной клетки валкам, прикрепляются и к валкам и к шестерной клетки шарнирами;

**шестеренная клеть-8** – предназначена для передачи вращения двум валкам. Представляет собой зубчатую передачу из шестерен одинакового диаметра, располагается в закрытой коробке.

**редуктор-13** – предназначен для того, чтобы при небольшой скорости прокатки можно было применять двигатель с относительно большой номинальной скоростью.

На рисунке 1 показана кинематическая схема механизма прокатной клетки.

Основные параметры частей механизма клетки:

- диаметр муфты – 750 мм;
- длина муфты – 550 мм;
- диаметр вала между двигателем и редуктором – 300 мм;
- длина вала – 6800 мм;
- диаметр малой шестерни редуктора – 400 мм;
- длина малой шестерни редуктора – 500 мм;
- диаметр большой шестерни редуктора – 600 мм;
- длина большой шестерни редуктора – 500 мм;
- диаметр шестерни шестеренной клетки – 600 мм;



- длина вала шестеренной клетки – 1100 мм;
- диаметр шпинделя – 450 мм;
- длина шпинделя – 1300 мм;
- диаметр бочки валка – 580 мм;
- длина бочки – 800 мм.

## **1.2 Выбор рода тока и типа электропривода**

Выбор рода тока и типа электропривода производится исходя из целого ряда условий, предъявляемых к режиму работы исполнительного механизма.

Наиболее распространенным типом электропривода переменного тока является электропривод с короткозамкнутым асинхронным двигателем.

Частотное регулирование скорости электроприводов переменного тока с короткозамкнутыми асинхронными двигателями находит все большее применение в различных областях техники.

Наиболее эффективные способы регулирования скорости двигателя связаны с изменением скорости вращения электромагнитного поля статора. Существует два основных способа регулирования скорости вращения электромагнитного поля: изменением числа пар полюсов и изменением частоты напряжения статора двигателя.

Преобразование переменного напряжения питающей сети в переменное напряжение с регулируемой частотой, напряжением и током осуществляют преобразователи частоты. В настоящее время преобразователи частоты выполняются на базе силовых полупроводниковых ключей.

По типу связи с питающей сетью преобразователи частоты на полупроводниковых элементах делятся на два больших класса:

- преобразователи частоты с непосредственной связью;
- преобразователи частоты со звеном постоянного тока.

Преобразователи частоты со звеном постоянного, тока в свою очередь подразделяются на:

- автономные инверторы тока (АИТ);
- автономные инверторы напряжения (АИН).

В своей структуре автономные инверторы содержат выпрямитель, силовой фильтр и инвертор, преобразующий постоянное напряжение (ток) в переменное напряжение (ток) заданной частоты.

#### *Преобразователи частоты с непосредственной связью*

Достоинством непосредственных преобразователей частоты являются:

- однократное преобразование энергии, что определяет высокий КПД преобразователя;
- возможность прохождения реактивной мощности как от сети к нагрузке, так и обратно;
- возможность получения напряжения без гармоник с частотами кратными частоте питающей сети.

Недостатки:

- сложность устройств управления. Большое число тиристоров требует большого числа систем импульсно фазового управления;
- коэффициент мощности преобразователя существенно меньше единицы ( $\cos\varphi \approx 0,15$ );
- существенно искажается форма напряжения питающей сети;
- трудности получения частот, близких к частоте питающей сети.

Для нулевой схемы максимальная частота выходного напряжения обычно ограничивается

$$f_{1max} = 16 \text{ Гц.}$$

Переход к мостовой схеме расширяет рабочий диапазон до

$$f_{1max} = 25 \text{ Гц}$$

Поэтому асинхронные электроприводы с непосредственными преобразователями частоты применяются для безредукторных электроприводов средней и большой мощности.

### *Автономные инверторы тока*

Основные достоинства преобразователей частоты с автономными инверторами тока:

- возможность рекуперации энергии в сеть;
- близкое к синусоидальному выходное напряжение;
- безаварийность режима короткого замыкания в нагрузке.

Недостатки:

- ограничение выходной частоты на уровне 100-125 Гц;
- коммутационные перенапряжения на тиристорах, что заставляет усложнять силовую схему;
- невозможность работы на групповую нагрузку;
- существенные вес и габариты индуктивного фильтра.

### *Автономные инверторы напряжения*

Преимущества инвертора напряжения заключаются:

- в более жесткой выходной вольтамперной характеристике;
- в возможности достижения больших пределов регулирования частоты;
- в способности работы, как с одиночным двигателем, так и с группой двигателей;

Недостатки:

- большая емкость электролитического конденсатора  $C_0$  фильтра. Емкость конденсатора должна быть не менее 1000 мкФ на каждый киловатт установленной мощности двигателя;
- мощности инверторов напряжения сравнительно небольшие 3 – 1500 кВт·А;
- трудности обеспечения рекуперации электрической энергии в сеть в тормозных режимах.

Для данного электропривода используется двигатель постоянного тока, имеющий следующие преимущества:

- более высокая перегрузочная способность, достигающая 2,5 –кратной величины (у асинхронных двигателей она не превышает 2,25 –кратной величины);
- мягкая механическая характеристика, которая дает более короткое время разгона механизма и двигатель легче переносит толчки нагрузки;
- минимальный момент инерции;
- электрическое торможение двигателей постоянного тока осуществляется проще и дает лучшие результаты, чем торможение асинхронного двигателя;
- допускают регулирование скорости в широких пределах;
- аппаратура управления на постоянном токе проще и надежнее в действии, чем аппаратура управления на переменном токе.

Для питания двигателя постоянного тока существуют системы управления:

- генератор – двигатель;
- транзисторный преобразователь – двигатель;
- тиристорный преобразователь – двигатель.

Кратко рассмотрим их достоинства и недостатки и выберем наиболее приемлемый управляемый выпрямитель.

Система генератор – двигатель (Г-Д) позволяющая плавно регулировать скорость двигателя и практически не вносящая искажений (помех) в питающую сеть, имеет большую установленную мощность электрических машин – следовательно, более низкий КПД, большие габариты и массу. Кроме того, эта система требует большого количества коммутационной аппаратуры и имеет высокую шумность.

Система транзисторный преобразователь – двигатель несмотря на простоту управления транзисторами (транзистор – полностью управляемый прибор) и высокий КПД (до 0,98%), но её применение ограничено мощностью элементной базы (транзисторов).

Система тиристорный преобразователь – двигатель (ТП-Д) имеет высокий КПД преобразователя (до 0,98%), меньшую мощность установленного оборудования, отсутствие подвижных частей, малые габариты и массу, бесшумность в работе, высокий уровень автоматизации, большой срок службы.

Проанализировав возможные варианты и сопоставив их с требованиями, приходим к выводу о необходимости исследования в качестве электропривода прокатной клетки систему - тиристорный преобразователь – двигатель.

### 1.3 Расчет и выбор электродвигателя

Расчет мощности электродвигателя произведем по методике, изложенной в [5, с. 83]. В расчетный формуляр (таблица 1) заносим основные технологические данные, необходимые для расчетов.

Таблица 1 – Формуляр для расчета мощности двигателя по кривым удельного расхода энергии

№ пп	Технические данные	Обозн.	Ед.изм.	Значение
1	2	3	4	5
	Размеры исходной заготовки			
1.	Масса	$m$	$m$	10
2.	Ширина	$b$	$мм$	127
3.	Высота	$h$	$м$	172
	Размеры конечного профиля			
4.	Толщина	$h_k$	$мм$	103
5.	Ширина	$b_k$	$мм$	103
6.	Длина	$l_k$	$м$	60

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5
7.	Размеры после клетки Толщина до прохода	$h_0$	мм	127
8.	Толщина после прохода	$h_1$	мм	103
9.	Длина после прохода	$l$	м	60
10.	Время прохода	$t$	с	31
11.	Удельный расход энергии за проход	$W$	кВт·ч/м	2,4
12.	Момент холостого хода	$M_{xx}$	Н·м	$10,6 \cdot 10^3$
13.	Маховый момент механизма, приведенный к валу приводного двигателя	$GD^2_{м.прив}$	кГ·м <sup>2</sup>	3199
14.	Окружная скорость волков	$V$	м/с	4,1
15.	Передаточное число редуктора	$i_{ред}$	-	1,83
16.	КПД редуктора	$\eta_{ред}$	-	0,93
17.	Длительность цикла прокатки	$t_u$	с	40

Определим момент прокатки

$$M_n = 10^5 \times \frac{m \times D \times W \times g}{l} = 10^5 \times \frac{10 \times 0,58 \times 1,6 \times 9,81 \times 10^3}{60} = 227,6 \times 10^3 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

где  $D = 0,58$  – диаметр валка, м;

$W = 2,4$  – удельный расход энергии по [5, с.157] при  $L = 2,05$ , кВт·ч/м;

$$L = 2,05 = \frac{b \times h}{b_k \times h_k} - \text{вытяжка.}$$

Находим общий момент с учетом моментов трения в механизме

$$M = M_n + M_{x.x.} = 227,6 \times 10^3 + 10,6 \times 10^3 = 238,2 \times 10^3 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Определяем среднеквадратичный момент

$$M_{ск} = \sqrt{\frac{M_n^2 \times t + M_{x.x.}^2 \times t_{x.x.}}{t_u}} = \sqrt{\frac{(227,6 \times 10^3)^2 \times 31 + (10,6 \times 10^3)^2 \times 9}{40}} = 200,4 \times 10^3 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Отношение Общего момента к среднеквадратичному

$$\frac{M}{M_{ск}} = \frac{238,2 \times 10^3}{200,4 \times 10^3} = 1,189.$$

Потребная мощность на валках

$$P_n = \frac{M_{ск} \times n_v}{0,975} = \frac{200,4 \times 10^3 \times 135}{0,975} = 2774,8 \text{ кВт}.$$

Скорость вращения валков

$$n_v = \frac{60 \times V}{\rho \times D} = \frac{60 \times 4,1}{\rho \times 0,58} = 135 \text{ об / мин}.$$

Скорость вращения двигателя

$$n_{дв.расч} = n_v \times i_{ред} = 135 \times 1,83 = 247 \text{ об / мин}.$$

Потребная мощность двигателя

$$P_{дв.расч} = \frac{P_n}{\eta_{ред}} = \frac{2774,8}{0,93} = 2983,6 \text{ кВт}.$$

По полученным расчетным параметрам двигателя:  $P_{дв.расч} = 2983,6 \text{ кВт}$ ;  $n_{дв.расч} = 247 \text{ об/мин}$ , выбираем электродвигатель типа П2-21/33-3,15. Справочные и расчетные параметры электродвигателя приведены в таблице 2

Таблица 2 – Параметры электродвигателя П2-21/33-3,15

Наименование	Обозначение, расчетная формула	Численное значение
1	2	3
1. Паспортные параметры		
Номинальная мощность, кВт	$P_{дв.ном}$	3150
Номинальное напряжение, В	$U_{дв.н}$	930
Номинальный ток, А	$I_{дв.н}$	3620
Номинальная скорость вращения, об/мин	$n_{дв.н}$	315
Максимальная скорость вращения, об/мин	$n_{дв.макс}$	500
Перегрузка по току	$I_{дв} = \frac{I_{макс}}{I_n}$	2,25
Номинальное напряжение возбуждения, В	$U_{вн}$	220
Номинальный ток возбуждения, А	$I_{вн}$	53
Число пар полюсов	$2p$	14

Продолжение таблицы 2

1	2	3
Число витков обмотки возбуждения на полюс Номинальный ток возбуждения полюса, <i>Вб</i> Сопротивление обмотки якоря, <i>Ом</i> Сопротивление обмотки добавочных полюсов, <i>Ом</i> Сопротивление компенсационной обмотки, <i>Ом</i> Сопротивление обмотки возбуждения, <i>Ом</i> Маховый момент, <i>кГ·м<sup>2</sup></i> Допустимая величина пульсаций тока якоря, %	$W_{\epsilon}$  $\Phi_n$ $R_{оя+15^{\circ}C}$  $R_{\partial n+15^{\circ}C}$  $R_{к\partial+15^{\circ}C}$  $R_{\epsilon}$ $GD^2_{\partial\epsilon}$  $p(1)\%$	201  0,115 0,00317  0,000662  0,0028  2,35 20500  (2-5)
2. Расчетные параметры		
Сопротивление цепи якоря двигателя горячее, <i>Ом</i>  Номинальная угловая скорость, <i>рад/с</i>  Максимальная угловая скорость, <i>рад/с</i> Индуктивность цепи якоря, <i>Гн</i>  Коэффициент ЭДС, <i>(В·с)/рад</i> , и электромагнитного момента, <i>(Н·м)/А</i>	$R_{\partial\epsilon.гор} = 1.38 \cdot (R_{оя+15^{\circ}C} + R_{\partial n+15^{\circ}C} + R_{к\partial+15^{\circ}C})$  $w_{\partial\epsilon.н} = \frac{\rho \times n_{\partial\epsilon.н}}{30}$  $w_{\partial\epsilon.макс} = \frac{\rho \times n_{\partial\epsilon.макс}}{30}$  $L_{\partial\epsilon} = 0.1 \frac{U_{\partial\epsilon.н}}{\rho \times I_{\partial\epsilon.н} \times w_{\partial\epsilon.н}}$  $k\Phi_n = c = \frac{U_n - I_n \times R_{\partial\epsilon.гор}}{w_{\partial\epsilon.н}}$	0,00915  32,98  52,36 0,111·10 <sup>-3</sup>  27,19

Продолжение таблицы 2

1	2	3
Конструктивный коэффициент двигателя	$k = \frac{k\Phi_n}{\Phi_n}$	236
Номинальная ЭДС двигателя, В	$E_{дв.н} = c \cdot \omega_{дв.н} + I_{дв.н} R_{дв.гор}$	929,85
Номинальный момент, Н·м	$M_{дв.н} = \frac{P_{дв.н}}{\omega_{дв.н}}$	95512,4
Электромагнитный момент, соответствующий номинальному току, Н·м	$M_{эм.н} = c \cdot I_{дв.н}$	98427,8
Момент трения на валу двигателя, Н·м	$M_{с.дв} = M_{эм.н} - M_{дв.н}$	2915,4
Момент инерции, кг·м	$J_{дв} = \frac{GD_{дв}^2}{4}$	5125
Максимальный допустимый ток двигателя, А	$I_{дв.макс} = I_{дв.н} \cdot \lambda_{дв}$	8145
Минимальный поток возбуждения, Вб	$\Phi_{мин} = \frac{W_{дв.н}}{W_{дв.макс}} \Phi_n$	0,072

Скорость вращения валков при номинальной скорости вращения двигателя

$$n_{валк} = \frac{n_{дв.н}}{i_{ред}} = \frac{315}{1,83} = 172,13 \text{ об/мин}$$

или

$$\omega_{валк} = \frac{\rho}{30} \times n_{валк} = \frac{\rho}{30} \times 172,13 = 18,016 \text{ рад/с}$$

Линейная скорость вращения валков (прокатки) при номинальной скорости двигателя

$$V_{валк} = R_{валк} \cdot \omega_{валк} = 0,29 \cdot 18,016 = 5,225 \text{ м/с},$$

где  $R_{валк} = 0,29$  – радиус бочки валка, м.

Скорость вращения валков при максимальной скорости вращения двигателя в режиме ослабления поля

$$n_{\text{валк.макс}} = \frac{n_{\text{дв.макс}}}{i_{\text{ред}}} = \frac{500}{1,83} = 273,22 \text{ об/мин}$$

или

$$\omega_{\text{валк.макс}} = \frac{\rho}{30} \times n_{\text{валк.макс}} = \frac{\rho}{30} \times 273,22 = 28,6 \text{ рад/с}.$$

Линейная скорость вращения валков (прокатки) при номинальной скорости двигателя

$$V_{\text{валк.макс}} = R_{\text{валк}} \cdot \omega_{\text{валк.макс}} = 0,29 \cdot 28,6 = 8,29 \text{ м/с}.$$

#### 1.4 Расчет параметров механической системы привода

Схема клетки с групповым приводом валков приведена на рисунке 2

Приведенный момент инерции механизма

$$J_{\text{м.пр}} = \frac{GD_{\text{м.прив}}^2}{4} = \frac{3190}{4} = 797,5 \text{ кг} \times \text{м}^2$$

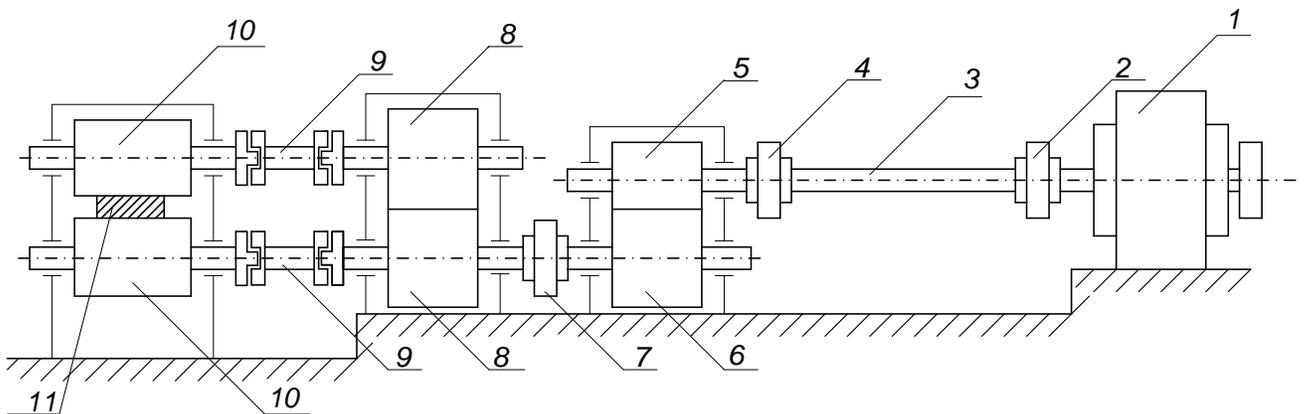


Рисунок 2 – Прокатная клетка с групповым приводом: 1 – электродвигатель; 2,4,7 – муфты; 3 – вал; 5- быстроходная шестерня редуктора; 6 – тихоходная шестерня редуктора; 8 – шестерни шестеренной клетки; 9 – шпиндели; 10 – прокатные валки; 11- слиток

В передаточном механизме прокатной клетки можно выделить два элемента: длинный вал 3 и шпиндели 9, жесткость которых наименьшая и может оказать существенное влияние на динамические процессы в электроприводе. Податливость остальных элементов кинематической цепи (муфты, шестерни, подшипники скольжения, прокатные валки, элементы конструкции) значительна и ей пренебрегают.

Взаимосвязанные процессы деформации слитка, валков и станины клетки при захвате слитка валками не будет учитывать, т.е. этот процесс будем рассматривать как скачкообразное приложение момента нагрузки ( прокатки)  $M_{с.прок.}$

С учетом влияния упругого скручивания вала и шпинделей механическую систему привода прокатной клетки можно представить в виде приведенной к валу двигателя трехмассовой расчетной схемы (рисунок 3). В силу упрощенного рассмотрения процесса захвата слитка валками две параллельные ветви из элементов 8,9 и 10 могут быть заменены одной эквивалентной (рисунок 4).

#### 1.4.1 Определение моментов инерции элементов кинематической цепи привода

Моменты инерции рассчитываются по выражению для определения момента инерции стержня

$$J = \rho \times \frac{R^4}{2} \times l \times g, \text{ кг} \cdot \text{м}^2,$$

где  $R$  – радиус, м;

$l$  – длина, м;

$\rho = 7800$  – плотность стали, кг/м<sup>3</sup>.

Результаты расчета:  $J_2 = J_4 = 206 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ ;  $J_3 = 62 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ ;  $J_5 = 12 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ ;  $J_6 = 131 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ ;  $J_7 = 420 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ ;  $J_8 = 78 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ ;  $J_9 = 83 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ ;  $J_{10} = 85 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ .

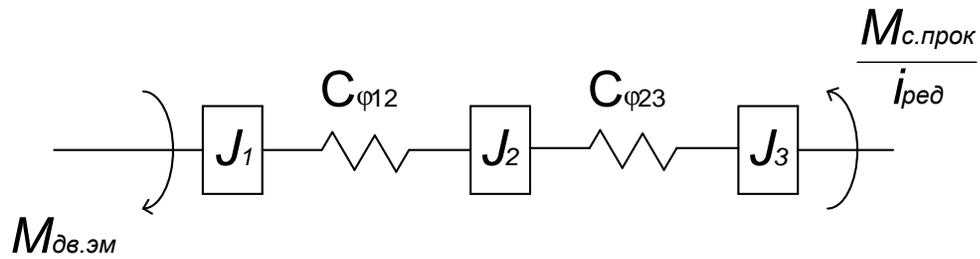


Рисунок 3 – Расчетная схема механической системы привода прокатной клети.

### 1.4.2 Определение приведенных моментов инерции сосредоточенных масс расчетной схемы

Массу упругих элементов 3 и 9 равномерно распределим между сосредоточенными массами.

Момент инерции первой массы

$$J_1 = J_{дв} + J_2 + 0,5 \cdot J_3 = 5125 + 206 + 0,5 \cdot 62 = 5362 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Момент инерции второй массы

$$J_2 = 0,5 \times J_3 + J_4 + J_5 + \frac{J_6 + J_7 + 2 \times (J_8 + 0,5 \times J_9)}{i_{ред}^2} =$$

$$= 0,5 \times 62 + 206 + 12 + \frac{131 + 420 + 2 \times (78 + 0,5 \times 83)}{1,83^2} = 484,9 \text{ кг} \times \text{м}^2.$$

Момент инерции третьей массы

$$J_3 = 2 \times (0,5 \times J_9 + J_{10}) \times \frac{1}{i_{ред}^2} = 2 \times (0,5 \times 83 + 85) \times \frac{1}{1,83^2} = 75,55 \text{ кг} \times \text{м}^2.$$

### 1.4.3 Определение угловой жесткости упругих элементов

Коэффициент угловой жесткости вала

$$C_{j12} = \frac{J_p \times G}{\kappa \times l_g} = \frac{\rho \times d_g^4 \times G}{32 \times \kappa \times l_g} = \frac{\rho \times 0,15^4 \times 8,1 \times 10^{10}}{32 \times 1,2 \times 6,8} = 493105,2 \frac{\text{Н} \times \text{м}}{\text{рад}},$$

где с учетом длины вала принято  $\kappa = 1,2$ ;

$J_p$  – полярный момент инерции сечения вала,  $m^4$ ;

$G$  – модуль сдвига для стали,  $H/m^2$ .

Приведенный эквивалентный коэффициент угловой жесткости шпинделей двух параллельных ветвей

$$C_{j\ 23} = 2 \times \frac{\rho \times d_{un}^4 \times G}{32 \times \kappa \times J_{un} \times i_{ред}^2} = 2 \times \frac{\rho \times 0,225^4 \times 8,1 \times 10^{10}}{32 \times 1,5 \times 1,3 \times 1,83^2} = 6238611,85 \frac{H \times m}{рад},$$

где с учетом длины шпинделей принято  $\kappa = 1,5$ .

#### 1.4.4 Определение резонансных частот трехмассовой расчетной механической системы

Трехмассовая система имеет две резонансные частоты

$$w_{12,23} = \sqrt{\frac{w_{01}^2 \times g_1 + w_{03}^2 \times g_2}{2} \pm \sqrt{\frac{g_3 \times w_{01}^2 \times w_{03}^2}{g_1 \times g_2} - \frac{g_3 \times w_{01}^2 \times w_{03}^2}{g_1 \times g_2}}}$$

$$= \sqrt{\frac{91,96 \times 12,06 + 82575,9 \times 1,16}{2} \pm \sqrt{\frac{12,21 \times 91,96 \times 82575,9}{12,06 \times 1,16} - \frac{12,21 \times 91,96 \times 82575,9}{12,06 \times 1,16}}}$$

где  $w_{01}^2 = \frac{C_{j\ 12}}{J_1} = \frac{493105,2}{5362} = 91,96$ ;

$$w_{03}^2 = \frac{C_{j\ 23}}{J_3} = \frac{6238611,85}{75,55} = 82575,9;$$

$$g_1 = \frac{J_1 + J_2}{J_2} = \frac{5362 + 484,9}{484,9} = 12,058;$$

$$g_2 = \frac{J_2 + J_3}{J_2} = \frac{484,9 + 75,55}{484,9} = 1,156;$$

$$g_3 = \frac{J_1 + J_2 + J_3}{J_2} = \frac{5362 + 484,9 + 75,55}{484,9} = 12,214.$$

В результате имеем  $\omega_{12} = 31,15 \text{ рад/с}$ ;  $\omega_{23} = 309,19 \text{ рад/с}$ .

Резонансные частоты трехмассовой механической системы привода существенно различаются (на порядок), что позволяет поставить вопрос о замене трехмассовой расчетной схемы двухмассовой системы.

#### 1.4.5 Определение параметров двухмассовой расчетной схемы механической системы привода

В трехмассовой системе выделяем вторую массу как парциальную систему типа Б. Парциальная частота второй массы

$$\omega_{n2} = \sqrt{\frac{C_{j23}}{J_2}} = \sqrt{\frac{6731717,05}{484,9}} = 117,825 \text{ рад/с}$$

или

$$f_{n2} = \frac{\omega_{n2}}{2\pi} = \frac{117,825}{2\pi} = 18,752 \text{ Гц},$$

где  $C_{\varphi23} = C_{\varphi12} + C_{\varphi23} = 493105,2 + 6238611,85 = 6731717,05 \text{ Н·м/рад}$ .

Хотя значение парциальной частоты второй массы существенно больше значения первой резонансной частоты трехмассовой системы и это позволяет преобразовать ее в двухмассовую, при этом следует иметь в виду то, что значение частоты  $\omega_{П2}$  лежит в области полосы пропускания электропривода.

Эквивалентные параметры двухмассовой расчетной схемы (рисунок 4):

$$C_{j_{12\alpha}} = \frac{C_{j_{12}} \times C_{j_{23}}}{C_{j_{12}} + C_{j_{23}}} = \frac{493105,2 \times 6238611,85}{493105,2 + 6238611,85} = 457247,3 \frac{H \times m}{рад};$$

$$J_{1\alpha} = J_1 + J_2 \times \frac{C_{j_{12\alpha}}}{C_{j_{23}}} = 5362 + 484,9 \times \frac{457247,3}{6238611} = 5397,54 \text{ кг} \times \text{м}^2;$$

$$J_{2\alpha} = J_3 + J_2 \times \frac{C_{j_{12\alpha}}}{C_{j_{12}}} = 75,55 + 484,9 \times \frac{457247,3}{493105,2} = 525,19 \text{ кг} \times \text{м}^2.$$

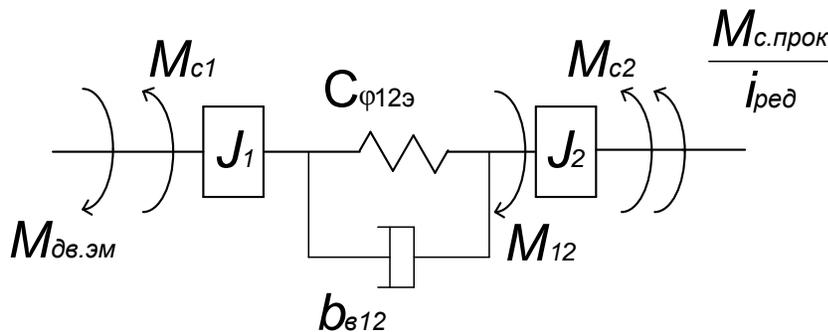


Рисунок 4 – Двухмассовая расчетная схема механической системы привода прокатной клетки

Резонансная частота двухмассовой механической системы

$$\omega_{12\alpha} = \sqrt{\frac{J_{1\alpha} + J_{2\alpha}}{J_{1\alpha} \times J_{2\alpha}} \times C_{j_{12\alpha}}} = \sqrt{\frac{5397,54 + 525,19}{5397,54 \times 525,19} \times 457247,3} = 30,9 \frac{рад}{с}$$

или

$$f_{12\alpha} = \frac{\omega_{12\alpha}}{2 \times \pi} = 4,92 \text{ Гц}.$$

Резонансная частота двухмассовой расчетной схемы электропривода достаточно низкая, поэтому учет упругих свойств валов механической системы при исследовании динамики электропривода клетки обязателен.

Определим дополнительные параметры двухмассовой расчетной схемы.

Коэффициент внутреннего вязкого трения упругих элементов

$$b_{\epsilon 12} = (2, 12) \times 10^{-4} \times C_{j 12\epsilon} = (2, 12) \times 10^{-4} \times 45724,3 = (91,45, 548,7) \frac{H \cdot m \cdot c}{рад}$$

Момент трения на валу первой массы

$$M_{c1} = M_{c.дв} = 2915,4 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Примем КПД редуктора и передачи в прямом и обратном направлении одинаковыми, а переменные и постоянные потери равными при номинальной нагрузке механизма. Тогда коэффициенты постоянных  $a_i$  и переменных  $b_i$  потерь определяются по выражениям:

$$a_1 = b_1 = \frac{1 - \eta_{ред}}{2 \times \eta_{ред}} = \frac{1 - 0,93}{2 \times 0,93} = 0,0376;$$

$$a_2 = b_{22} = \frac{1 - \eta_{пер}}{2 \times \eta_{пер}} = \frac{1 - 0,9}{2 \times 0,9} = 0,0555,$$

где  $\eta_{пер} = 0,9$  – КПД передачи (принято ориентировочно).

Структурная схема двухмассовой механической системы электропривода прокатной клетки, соответствующая расчетной схеме рисунок 4 и учитывающая переменные потери в передачах, приведена на рисунке 5, а, где момент трения на валу первой массы

$$M_{c1} @ M_{c.дв} + a_1 \cdot M_{дв.н} = 2915,4 + 0,0376 \cdot 95512,4 = 5506,7 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

и момент трения на валу второй массы

$$M_{c2} @ a_2 \cdot M_{дв.н} = 0,0555 \cdot 95512,4 = 5301 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Передаточная функция по управлению двухмассовой механической системы ( $M_{c1} = 0, M_{c2} = 0, M_{c.прок} = 0$ ) с учетом коэффициента внутреннего демпфирования  $b_{\epsilon 12}$  (рисунок 5,а) имеет вид

$$W(p) = \frac{\frac{b_{\epsilon 12}}{C_{j 12\epsilon}} p + 1}{(J_{1\epsilon} + J_{2\epsilon}) p^2 + \frac{C_{j 12\epsilon}}{C_{j 12\epsilon}} p + 1}.$$

В составе передаточной функции имеется колебательное звено для которого коэффициент демпфирования

$$\chi = \frac{b_{\delta 12}}{2 \times C_{j 12\delta}} \times \sqrt{\frac{J_{1\delta} + J_{2\delta}}{J_{1\delta} \times J_{2\delta}}} \times C_{j 12\delta} = \frac{b_{\delta 12}}{2 \times C_{j 12}} \times \omega_{12\delta},$$

угловая частота свободных колебаний

$$\omega_{\kappa} = \sqrt{\frac{J_{1\delta} + J_{2\delta}}{J_{1\delta} \times J_{2\delta}}} \times C_{j 12} \times \sqrt{1 - \chi^2} = \omega_{12\delta} \times \sqrt{1 - \chi^2}, \frac{rad}{c}$$

и декремент затухания

$$c = e^{\frac{\rho \chi}{\sqrt{1 - \chi^2}}}.$$

Для структурной схемы рисунка 5 с учетом значений параметра  $b_{\delta 12}$  имеем следующие численные значения коэффициента демпфирования  $\xi = 0,00309$ ,  $0,01854$ , что практически не изменяет значение резонансной частоты  $\omega_{\kappa} = \omega_{12\delta} = 30,9 \text{ rad/c}$ , но при больших значениях  $b_{\delta 12}$  вызывает уже заметное затухание ( $\chi = 1,0097$ ,  $1,06$ ) колебаний двухмассовой системы. С учетом последнего обстоятельства учет внутреннего демпфирования для двухмассовой механической системы электропривода желателен.

На начальном этапе проектирования системы управления электропривода может понадобиться значение эквивалентного момента инерции

$$J_{\delta} = J_{\delta\delta} + J_{\delta.np} = J_{1\delta} + J_{2\delta} = 5125 + 797,5 = 5922,5 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$$

и эквивалентного момента трения

$$M_{c\delta} = M_{c1} + M_{c2} = 5506,7 + 5301 = 10806 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

для одномассовой механической системы (рисунок 5, б).

При учете переменных потерь в передачах:

$$- M_{c1} = M_{c.\delta\delta}; M_{c2} = 0;$$

- моменты постоянных потерь редуктора в прямом и обратном направлении

равны

$$\Delta M_{\text{пост. II}} = \Delta M_{\text{пост. IO}} @ a_1 \cdot M_{\delta\delta.n} = 0,0376 \cdot 95512,4 = 3591 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

- моменты постоянных потерь передачи в прямом и обратном направлении передачи равны

$$\Delta M_{\text{посм.2П}} = \Delta M_{\text{посм.2О}} = a_2 \cdot M_{\text{дв.н}} = 0,0555 \cdot 95512,4 = 5301 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

- углы наклона нелинейных характеристик

$$a_{1П} = \text{arctg} \frac{1}{1+b_{1П}} = \text{arctg} \frac{1}{1+0,0376} = 43,94^\circ;$$

$$a_{1О} = \text{arctg}(1+b_{1П}) = \text{arctg}(1+0,0376) = 46,06^\circ;$$

$$a_{2П} = \text{arctg} \frac{1}{1+b_{2П}} = \text{arctg} \frac{1}{1+0,0555} = 43,45^\circ;$$

$$a_{2О} = \text{arctg}(1+b_{2П}) = \text{arctg}(1+0,0555) = 46,55^\circ.$$

Электропривод прокатной клетки непрерывного стана работает в режиме прямой передачи энергии, поэтому можно ограничиться рассмотрением упрощенных структурных схем двухмассовой и одномассовой механической системы привода, приведенных на рисунке 6. Эквивалентные параметры структурной схемы одномассовой механической системы (рисунок 6,б) определяются по выражениям

$$M_{\text{посм.ПЭ}} = M_{\text{посм.1П}} + M_{\text{посм.2П}} = 3591 + 5301 = 8892 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

$$a_{\text{ПЭ}} = \text{arctg} \frac{1}{1+b_{1П}+b_{2П}} = \text{arctg} \frac{1}{1+0,0376+0,0555} = 42,45^\circ.$$

Приведенный к валу двигателя момент прокатки

$$M_{\text{н.прив}} = \frac{M_{\text{н}}}{i_{\text{ред}}} = \frac{227600}{1,83} = 124371,6 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

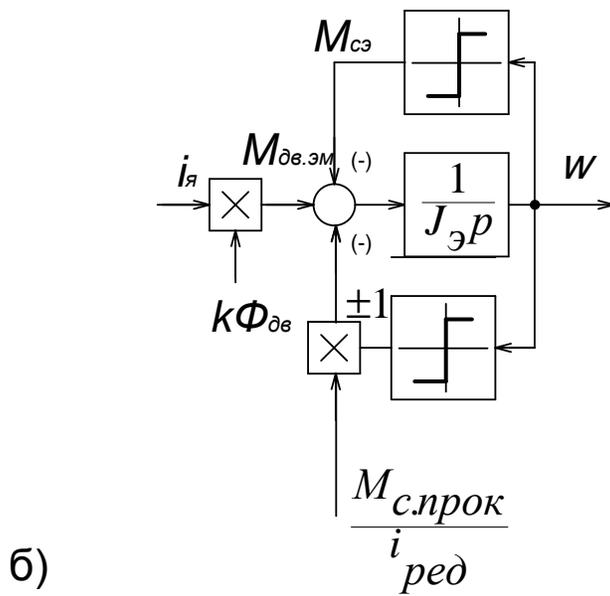
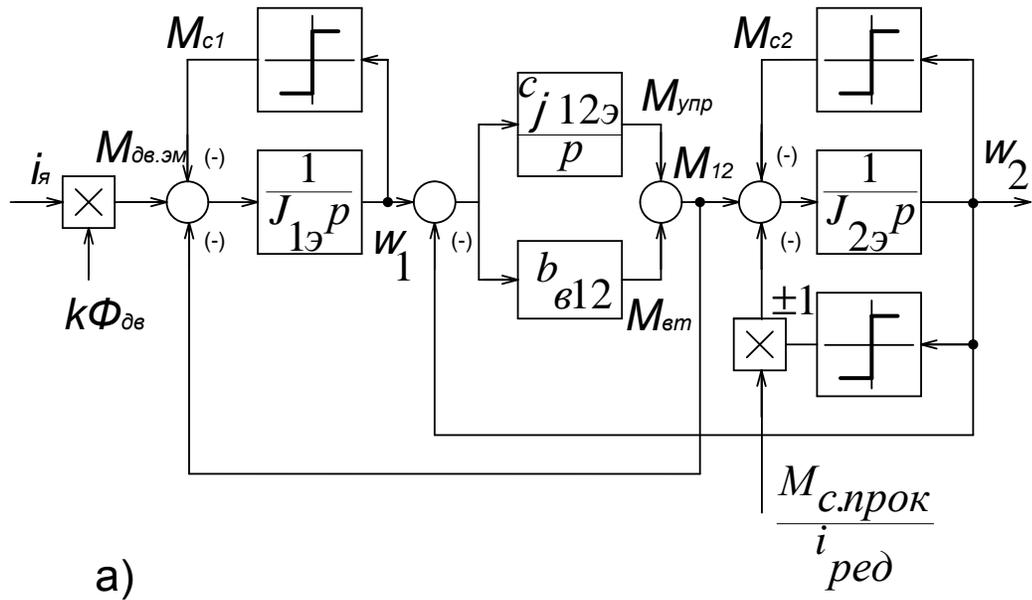


Рисунок 5 – Структурная схема механической системы электропривода прокатной клетки без учета переменных потерь передачи: а – двухмассовая, б – одномассовая

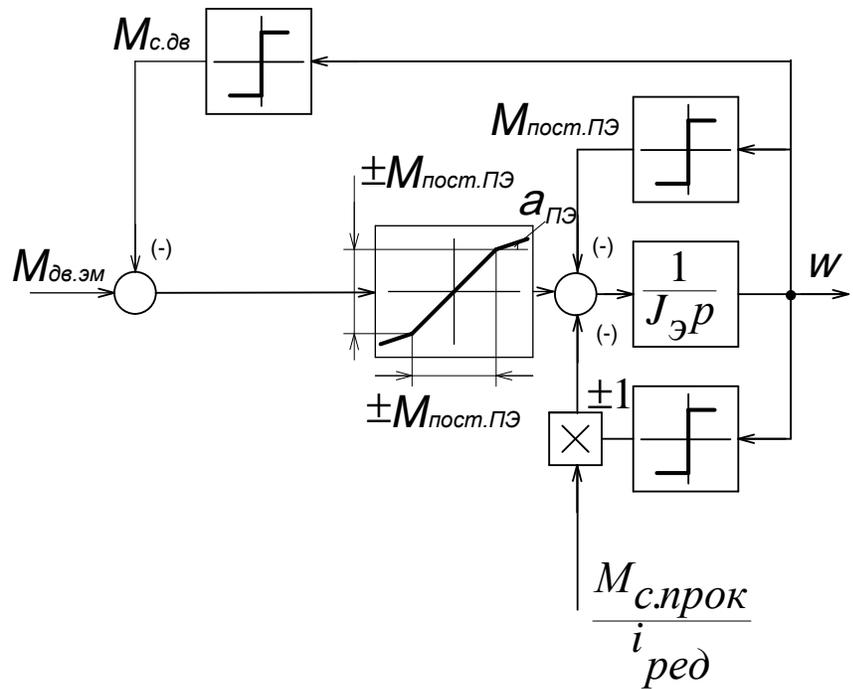
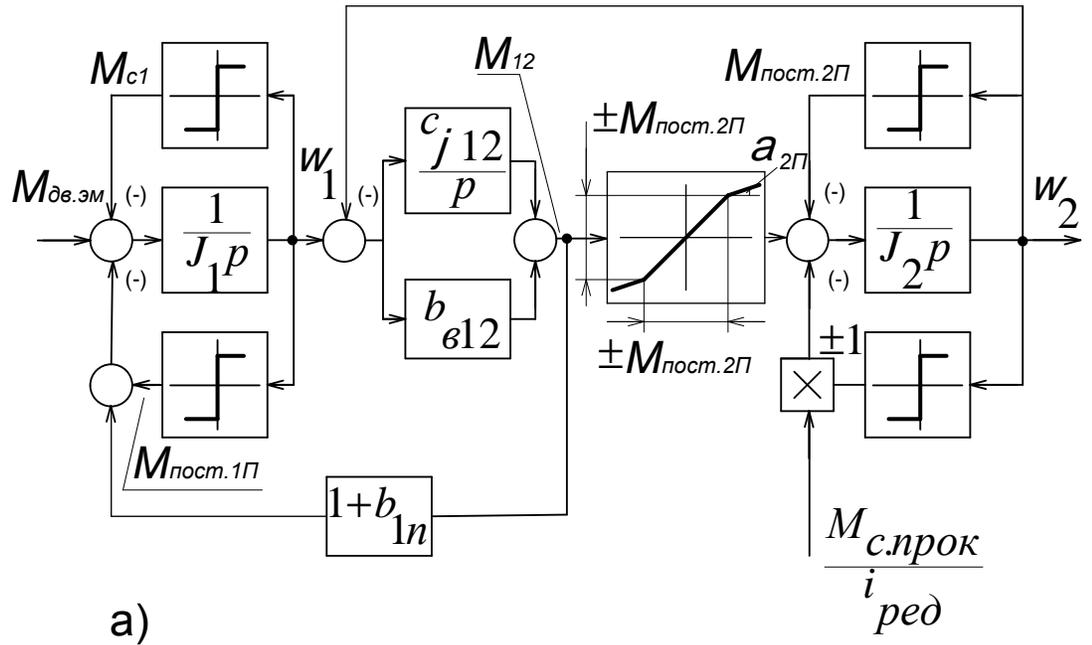


Рисунок 6 – Структурная схема механической системы электропривода прокатной клетки без учета переменных потерь передачи: а – двухмассовая, б – одномассовая

## 2 ВЫБОР ЭЛЕМЕНТОВ И РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ СИЛОВОГО КАНАЛА РЕГУЛИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

### 2.1 Выбор силового оборудования

#### 2.1.1 Выбор тиристорного преобразователя для питания двигателя

Выбор тиристорного преобразователя производится из следующих трех условий.

1. Номинальное выпрямленное напряжение преобразователя должно быть чуть больше или равно номинальному напряжению двигателя

$$U_{dн} \geq U_{дв.н} = 930 \text{ В.}$$

2. Номинальный ток преобразователя должен быть больше или равен номинальному току двигателя

$$I_{dн} \geq I_{дв.н} = 3620 \text{ А.}$$

3. При условии, что продолжительность перегрузки преобразователя равна или больше продолжительности перегрузки двигателя, ток допустимой перегрузки преобразователя должен быть равен или больше тока допустимой перегрузки двигателя

$$I_{dмакс} \geq I_{дв.макс} = 8145 \text{ А.}$$

Выбираем преобразователь типа КТЭ-4000/930-0111 с параметрами:

- номинальное выпрямленное напряжение преобразователя  $U_{dн} = 1050 \text{ В}$ ;

- номинальный ток преобразователя  $I_{dн} = 2 \cdot 2000 = 4000 \text{ А}$ ;

- ток допустимой перегрузки преобразователя

$$I_{dмакс} = 2,25 \cdot 4000 = 9000 \text{ А.}$$

Тиристорный преобразователь выполнен по эквивалентной 12-пульсной схеме выпрямления приведенной на рисунке 7 и представляет собой две трехфазных мостовых схем выпрямления, включенных параллельно. Питание мостов пред-

полагается осуществлять от вторичных обмоток трансформатора с разными схемами соединения (треугольник и звезда). Для обеспечения равномерной загрузки мостов током и исключения влияния их друг на друга необходимо применение индуктивных делителей. В качестве последних могут быть использованы сглаживающие реакторы L1 и L2.

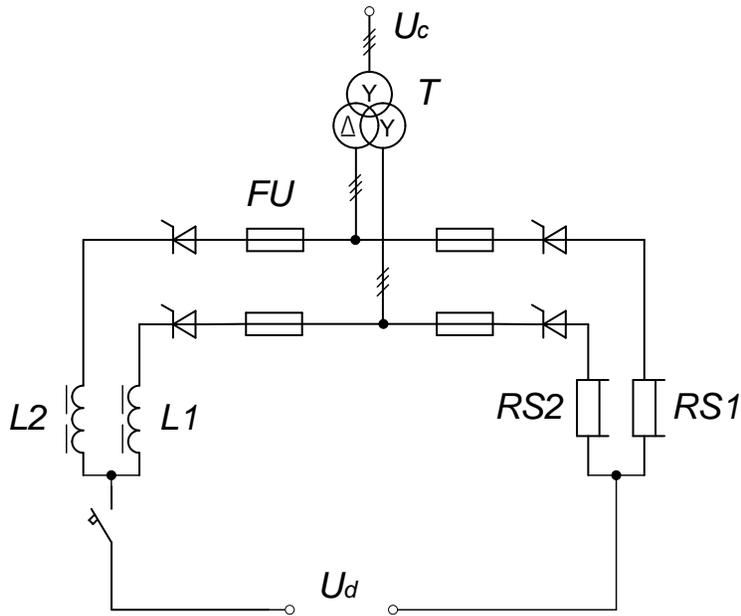


Рисунок 7 – Однолинейная схема силовой части нереверсивного 12-пульсного электропривода

Максимальная выпрямленная ЭДС при угле управления  $\alpha=0$  для эквивалентной 12-пульсной схемы

$$E_{d0(12)} = k_{cx} \cdot U_{2лн} = 1,398 \cdot 900 = 1258,3 \text{ В},$$

$$\text{где } k_{cx} = \frac{\sqrt{2} \times m_e}{\rho} \sin \frac{\alpha}{m_e} = \frac{\sqrt{2} \times 12}{\rho} \sin \frac{\alpha}{12} = 1,398$$

– коэффициент схемы;

$m_e = 12$  – число пульсов управляемого выпрямителя или преобразователя.

Индуктивность силовой цепи преобразователя для одной группы вентиляей

$$L_{mn} = 2 \cdot L_{mp.\phi} = 2 \cdot 0,066 \cdot 10^{-3} = 0,132 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}.$$

## 2.1.2 Выбор силового преобразовательного трансформатора

Трехфазные преобразовательные трансформаторы являются специализированными устройствами, предназначенными для питания тиристорных преобразователей систем электропривода постоянного тока с трехфазной мостовой схемой выпрямления, и имеют согласованные параметры и перегрузочную способность. Знание номинальных параметров преобразователя можно может быть достаточным для выбора преобразовательного трансформатора. В соответствии с номинальным выпрямленным напряжением преобразователя находим значение линейного напряжения вентильной обмотки трансформатора  $U_{2л}=900 \text{ В}$ , а значение линейного тока вентильной обмотки  $I_{2л}$  находим по выражению

$$I_{2л} = k_{i2л} \cdot I_{дн}, = 0,815 \cdot 2000 = 1633 \text{ А},$$

где  $k_{i2л}=0,815$  – для трехфазной мостовой схемы выпрямления

С учетом сказанного для питания тиристорного преобразователя выбираем масляный трехобмоточный трансформатор типа ТМПД-5000/10У2 с соединением обмоток  $Y/\Delta Y-I-0$ . Трансформатор имеет следующие параметры: напряжение сквозного короткого замыкания  $U_{кз} = 6,6 \%$ , потери короткого замыкания  $P_{кз} = 44000 \text{ Вт}$ , номинальное линейное напряжение первичной обмотки  $U_{1лн} = 10 \text{ кВ}$ ; номинальное линейное напряжение для одной вторичной обмотки  $U_{2лн} = 900 \text{ В}$ ; номинальный линейный ток для одной вторичной обмотки  $I_{2лн} = 1633 \text{ А}$ .

Рассчитаем параметры преобразовательного трансформатора. Расчет ведем для одной группы вентилях эквивалентной схемы соединения вторичной обмотки «звезда», тогда номинальное фазное напряжение вторичной обмотки

$$U_{2фн} = \frac{U_{2лн}}{\sqrt{3}} = \frac{900}{\sqrt{3}} = 519,6 \text{ В}.$$

Номинальный ток фазы вторичной обмотки

$$I_{2фн} = I_{2лн} = 1633 \text{ А}.$$

Полное сопротивление трансформатора

$$Z_{mp.\phi} = \frac{U_{кз} \times I_{2\phi n}}{100 \times I_{2\phi n}} = \frac{6,6 \times 19,6}{100 \times 1633} = 0,021 \text{ Ом} .$$

Активное сопротивление обмотки фазы трансформатора

$$R_{mp.\phi} = \frac{P_{кз}}{n \times m_2 \times I_{2\phi n}^2} = \frac{44000}{2 \times 3 \times 1633^2} = 2,75 \times 10^{-3} \text{ Ом} ,$$

где  $m_2 = 3$  – число фаз питающей сети;

$n = 2$  - число вторичных обмоток.

Индуктивное сопротивление обмотки фазы трансформатора

$$X_{mp.\phi} = \sqrt{Z_{mp.\phi}^2 - R_{mp.\phi}^2} = \sqrt{0,021^2 - 0,00275^2} = 0,0208 \text{ Ом} .$$

Индуктивность обмотки фазы трансформатора

$$L_{mp.\phi} = \frac{X_{mp.\phi}}{\omega_c} = \frac{0,0208}{314} = 0,066 \times 10^{-3} \text{ Гн} .$$

### 2.1.3 Выбор сглаживающего реактора

Выбор реактора осуществляется для режима эквивалентной 12-пульсной схемы выпрямления.

Включение сглаживающего реактора в якорную цепь позволяет ограничить величину переменных составляющих. улучшает использование двигателя, его коммутацию и электромеханические характеристики. Индуктивность сглаживающего реактора выбирается из двух условий: ограничения зоны прерывистого тока и ограничения пульсаций тока на допустимом уровне.

Определяем необходимую величину индуктивности сглаживающего дроселя из условия ограничения зоны прерывистых токов

$$L_{кн1} = \frac{E_{d0(12)} \times k_{зр.макс}}{\omega_c \times I_{д.зр.макс}} = \frac{1258,2 \times 0,02295}{314 \times 350} = 0,26 \times 10^{-3} \text{ Гн} ,$$

$$\text{где } k_{гр.макс} = \frac{\alpha}{\pi} - \frac{\rho}{m_g} \times \text{ctg} \frac{\rho}{m_g} \times \sin 90^\circ = \frac{\alpha}{\pi} - \frac{\rho}{12} \times \text{ctg} \frac{\rho}{12} = 0,02295$$

- максимальный граничный коэффициент;

$$\omega_c = 314 \text{ с}^{-1} - \text{угловая частота питающей сети при частоте сети } f_c = 50$$

Гц;

$$I_{d.гр.макс} \leq I_{дв.х.х} = \frac{M_{x.x}}{M_{дв.н}} \times I_{дв.н} = \frac{10600}{95512,4} \times 3620 = 401,75 \text{ A}$$

- значение начально-непрерывистого тока, значение которого может быть найдено из условия. Принимаем  $I_{d.гр.макс} = 350 \text{ A}$ ;

$I_{дв.х.х}$  - ток двигателя холостого хода, принимаем, А.

Тогда индуктивность сглаживающего реактора в цепи отдельного выпрямительного моста определится из условия

$$0,5L_{дп} = L_{кн1} - 0,5L_{мн} - L_{дв} = 0,26 \times 10^{-3} - 0,066 \times 10^{-3} - 0,111 \times 10^{-3} = 0,0824 \times 10^{-3} \text{ Гн}$$

$$L_{дп} = 2 \times 0,0824 \times 10^{-3} = 0,1648 \times 10^{-3} \text{ Гн.}$$

Определяем необходимую величину индуктивности сглаживающего дросселя из условия ограничения величины пульсаций выпрямленного тока:

$$L_{кн2} = \frac{E_{d(1).макс} \times 100}{m_g \times \omega_c \times p(1)\% \times I_d} = \frac{149,338 \times 100}{12 \times 314 \times 5 \times 3620} = 0,2737 \times 10^{-3} \text{ Гн,}$$

$$\text{где } E_{d(1).макс} = \frac{E_{d0(12)} \times m_g \times \sqrt{2}}{(m_b^2 - 1)} = \frac{1258,3 \times 12 \times \sqrt{2}}{(12^2 - 1)} = 149,33 \text{ В}$$

- действующее значение первой гармоники пульсирующего выпрямленного напряжения при угле управления  $\alpha = 90^\circ$ ;

$p(1)\%$  - допустимое действующее значение первой гармоники выпрямленного тока в процентах,  $p(1)\% = (2-7) \%$ , принимаем  $p(1)\% = 4$ .

Тогда индуктивность сглаживающего реактора определится из условия

$$0,5L_{\partial p} = L_{\kappa n 2} - 0,5L_{m n} - L_{\partial \delta} = 0,2737 \times 10^{-3} - 0,066 \times 10^{-3} - 0,111 \times 10^{-3} =$$

$$= 0,096 \times 10^{-3} \text{ Гн}$$

$$L_{\partial p} = 2 \times 0,096 \times 10^{-3} = 0,192 \times 10^{-3} \text{ Гн.}$$

Учитывая, что рассматриваемая схема параллельного подключения двух мостов только приближенно соответствует 12-пульсной схеме выпрямления, принимаем решение выбрать два сглаживающих реактора по одному для каждой группы вентилях типа СРОЗ, перегрузочная способность которых по току составляет  $\lambda_{\partial p} = 2$  (при большем токе магнитопровод насыщается, и индуктивность реактора уменьшается). Тогда номинальный ток реактора выбирается из условия

$$I_{\partial p, n} \geq \frac{I_{\partial \delta} \times I_{\partial \delta, n}}{2 \times I_{\partial p}} = \frac{2,25 \times 3620}{2 \times 2} = 2036,25 \text{ А}$$

Выбираем сглаживающие реакторы типа СРОСЗ – 1250М с параметрами: номинальный ток  $I_{n, \partial p} = 2500 \text{ А}$ ; индуктивность  $L_{n, \partial p} = 0,32 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}$ ; потери в меди при номинальном токе  $\Delta P_{\partial p} = 2800 \text{ Вт}$ .

Сопротивление сглаживающего реактора

$$R_{\partial p} = \frac{\Delta P_{\partial p}}{I_{\partial p, n}^2} = \frac{2800}{2500^2} = 0,448 \times 10^{-3} \text{ Ом.}$$

## 2.2 Выбор тиристорного возбудителя двигателя

Для питания обмотки возбуждения двигателя выберем комплектный возбудитель для управления возбуждением двигателя

1. Номинальное выпрямленное напряжение преобразователя должно быть чуть больше или равно номинальному напряжению возбуждения двигателя

$$U_{d n} \geq U_{\partial n} = 220 \text{ В.}$$

2. Номинальный ток преобразователя должен быть больше или равен номинальному току возбуждения двигателя

$$I_{dн} \geq I_{вн} = 53 \text{ A.}$$

3. При условии, что продолжительность перегрузки преобразователя равна или больше продолжительности перегрузки двигателя, ток допустимой перегрузки преобразователя должен быть равен или больше тока допустимой перегрузки двигателя

$$I_{dмакс} \geq I_{в.макс} = 2,25 \cdot 53 = 119,25 \text{ A.}$$

Выбираем комплектный возбудитель для управления по возбуждению типа КТЭВ-100/230-0011 с параметрами:

- номинальное выпрямленное напряжение преобразователя  $U_{dн} = 230 \text{ B}$ ;
- номинальный ток преобразователя  $I_{dн} = 100 \text{ A}$ .
- ток допустимой перегрузки преобразователя  $I_{dмакс} = 2,25 \cdot 100 = 225 \text{ A}$ .

### 2.2.1 Выбор трансформатора для питания тиристорного возбудителя

Выбор производится по тем же условиям и выбираем трехфазный трансформатор типа ТСЗП -25/0,7. Параметры вентиляной обмотки: номинальное линейное напряжение для вторичной обмотки  $U_{2л} = 205 \text{ B}$ ; номинальный линейный ток вторичной обмотки  $I_{2л} = 82 \text{ A}$ . Параметры трансформатора: напряжение сквозного короткого замыкания  $U_{кз} = 5,5 \%$ , потери короткого замыкания  $P_{кз} = 1100 \text{ Вт}$ .

Рассчитаем параметры трансформатора возбудителя. Номинальное фазное напряжение вторичной обмотки

$$U_{2фн} = \frac{U_{2лн}}{\sqrt{3}} = \frac{205}{\sqrt{3}} = 118,357 \text{ B.}$$

Номинальный ток фазы вторичной обмотки

$$I_{2фн} = I_{2лн} = 82 \text{ A.}$$

Полное сопротивление трансформатора

$$Z_{mp.\phi} = \frac{U_{кз} \times I_{2\phi n}}{100 \times I_{2\phi n}} = \frac{5,5 \times 18,357}{100 \times 82} = 0,0794 \text{ Ом}.$$

Активное сопротивление обмотки фазы трансформатора

$$R_{mp.\phi} = \frac{P_{кз}}{m_2 \times I_{2\phi n}^2} = \frac{1100}{3 \times 82^2} = 0,0545 \text{ Ом}.$$

Индуктивное сопротивление обмотки фазы трансформатора

$$X_{mp.\phi} = \sqrt{Z_{mp.\phi}^2 - R_{mp.\phi}^2} = \sqrt{0,0794^2 - 0,0545^2} = 0,05774 \text{ Ом}.$$

Индуктивность обмотки фазы трансформатора

$$L_{mp.\phi} = \frac{X_{mp.\phi}}{\omega_c} = \frac{0,05774}{314} = 0,184 \times 10^{-3} \text{ Гн}.$$

## 2.2.2 Параметры обмотки возбуждения двигателя

Сопротивление обмотки возбуждения при рабочей температуре

$$R_{в.гор} = 1,38 \cdot R_{в} = 1,38 \cdot 2,35 = 3,24 \text{ Ом}.$$

Усредненное значение индуктивности основного потока на рабочем участке

$$L_{в} = 2p \times W_{в} \frac{\Delta \Phi}{\Delta I_{в}} = 14 \times 201 \times \frac{0,043}{34} = 3,56 \text{ Гн},$$

$$\text{где } \Delta \Phi = \Phi_n - \Phi_{мин} = 0,115 - 0,075 = 0,043 \text{ Вб}$$

-разность номинального и минимального значения потока возбуждения;

$$\Delta I_{в} = I_{в.n} - I_{в.мин} = 53 - 19 = 34 \text{ А}$$

- разность номинального и минимального значения тока возбуждения;

$I_{в.мин} = 19 \text{ А}$  – минимальный ток возбуждения определяется по кривой намаг-

ничивания двигателя.

Индуктивность потока рассеяния

$$L_s = 2p \times W_{с} \frac{\Phi_n \times (s - 1)}{I_{в.n}} = 14 \times 201 \times \frac{0,115 \times (1,18 - 1)}{53} = 1,1 \text{ Гн}.$$

### 2.2.3 Параметры тиристорного возбудителя

Активное сопротивление силовой цепи преобразователя возбудителя

$$R_{mn\delta} = 2 \cdot R_{mp.\phi} + R_{\kappa} = 2 \cdot 0,0545 + 0,055 = 0,164 \text{ Ом},$$

где  $R_{\kappa} = \frac{m_{\epsilon} \times X_{mp.\phi}}{2 \times p} = \frac{6 \times 0,05774}{2 \times p} = 0,055 \text{ Ом}$

- сопротивление, вносимое за счёт коммутации анодных токов.

Индуктивность силовой цепи преобразователя возбудителя

$$L_{mn\delta} = 2 \cdot L_{mp.\phi} = 2 \cdot 0,184 \cdot 10^{-3} = 0,368 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}.$$

Коэффициент усиления преобразователя

$$k_{mn\delta} = k_{cy.mn\delta} \cdot k_{y\delta} = 10 \cdot 4,83 = 48,3,$$

где  $k_{cy.mn\delta} = 10 \frac{\text{град}}{\text{В}}$  - коэффициент передачи СИФУ с линейным опорным напряжением;

$$k_{y\delta} = \frac{\rho \times E_{d0}}{180} = \frac{\rho \times 276,86}{180} = 4,83 \text{ В/град}$$

- коэффициент передачи управляемого выпрямителя.

$$E_{d0} = \frac{U_{2\phi}}{\sqrt{3} \times k_{u2}} = \frac{205}{\sqrt{3} \times 0,428} = 276,86 \text{ В}$$

- максимальная выпрямленная ЭДС при угле управления  $\alpha=0$ ;

$k_{u2} = 0,428$  - коэффициент схемы выпрямления по напряжению.

Постоянная времени преобразователя

$$T_{mn\delta} = \frac{0,5}{m_{\epsilon} \times f_c} = \frac{0,5}{6 \times 50} = 0,00167 \text{ с}.$$

### 2.2.4 Параметры силовой цепи обмотки возбуждения

Сопротивление цепи обмотки возбуждения

$$R_{ц\delta} = R_{mn\delta} + R_{\epsilon.zop} = 0,164 + 3,24 = 3,404 \text{ Ом}.$$

Постоянная времени основного потока

$$T_{\epsilon} = \frac{L_{\epsilon}}{R_{цв}} = \frac{3,56}{3,404} = 1,05c .$$

Постоянная времени потока рассеяния

$$T_s = \frac{L_{мнв} + L_s}{R_{цв}} = \frac{0,368 \times 10^{-3} + 1,1}{3,404} = 0,323c .$$

Постоянная времени вихревых токов

$$T_{\kappa} = 0,1 \cdot T_{\epsilon} = 0,1 \cdot 1,05 = 0,105c .$$

Значение минимального угла управления преобразователем возбуждения

$$\alpha_{мин} \approx \arccos \frac{I_{в.н} \times R_{цв}}{k_{Ус.мин} \times E_{d0}} = \arccos \frac{53 \times 3,404}{0,85 \times 276,86} = 39,95^{\circ}$$

Принимаем  $\alpha_{мин} = 30^{\circ}$ .

## 2.3 Расчет параметров силовой цепи

### 2.3.1 Параметры тиристорного преобразователя якорной цепи

Исходная схема замещения (рисунок 8) состоит из двух нереверсивных тиристорных преобразователей (ТП), включенных параллельно, с индивидуальными регуляторами тока. Параметры управляемого выпрямителя (одного моста):

-сопротивление

$$R_{ув} = 2 \mathcal{R}_{тр.ф} + R_{\kappa} = 2 \cdot 2,75 \cdot 10^{-3} + 0,0198 = 0,0253 \text{ Ом},$$

$$\text{где } R_{\kappa} = \frac{m_{\epsilon} \times X_{тр.ф}}{2 \times p} = \frac{6 \times 0,0208}{2 \times p} = 0,0198 \text{ Ом}$$

-сопротивление, вносимое коммутацией токов вентиляей;

-индуктивность

$$L_{ув} = 2 \mathcal{L}_{тр.ф} = 2 \cdot 0,066 \cdot 10^{-3} = 0,132 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}.$$

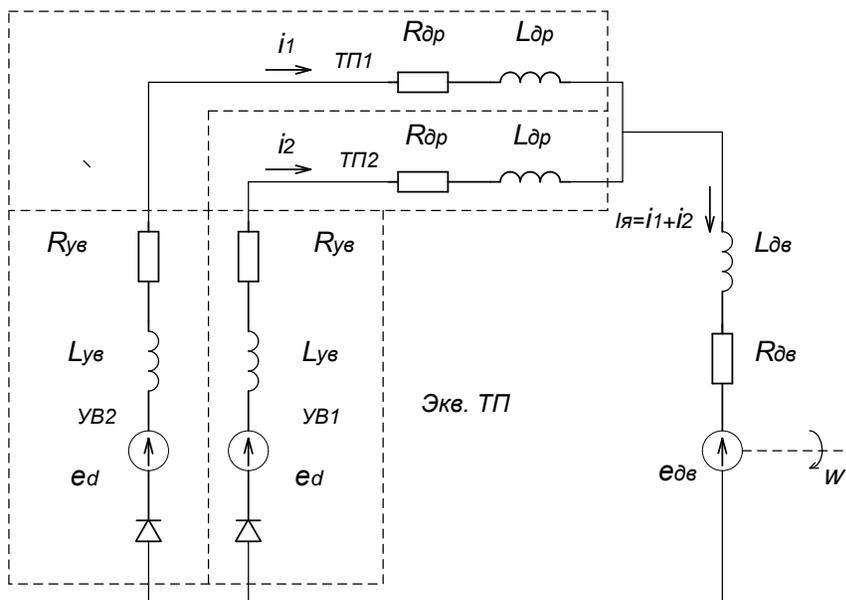


Рисунок 8 – Схема замещения для параллельно-включенных ТП, работающих на общий двигатель

### 2.3.2 Параметры схемы “ ТП - эквивалентный двигатель ”

Преобразуем исходную схему в две схемы “ ТП - эквивалентный двигатель ” (рисунок 9).

Схема “ ТП - эквивалентный двигатель ” будет использована при расчете электромеханических характеристик электропривода и при оптимизации контуров тока.

Сопротивление и индуктивность ТП:

$$R_{mn} = R_{ye} + R_{dp} = 0,0253 + 0,448 \cdot 10^{-3} = 0,02575 \text{ Ом};$$

$$L_{mn} = L_{ye} + L_{dp} = 0,132 \cdot 10^{-3} + 0,32 \cdot 10^{-3} = 0,452 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}.$$

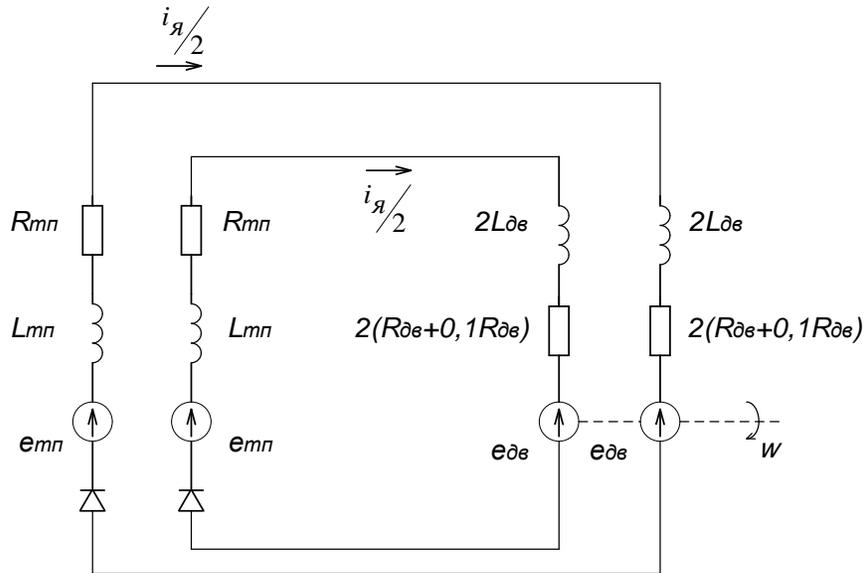


Рисунок 9 – Схема замещения: две системы “ТП - эквивалентный двигатель”

Сопротивление и индуктивность якорной цепи:

$$R_{яц} = R_{mn} + 2 \times (R_{\delta e} + 0,1 R_{\delta e}) = 0,02575 + 2 \cdot (0,00915 + 0,1 \cdot 0,00915) = 0,046 \text{ Ом};$$

$$L_{яц} = L_{mn} + 2 \times L_{\delta e} = 0,452 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 0,11 \cdot 10^{-3} = 0,674 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}.$$

Постоянная времени преобразователя

$$T_{mня} = \frac{0,5}{m_e \times f_c} = \frac{0,5}{12 \times 50} = 0,000833 \text{ с}.$$

Постоянная времени якорной цепи

$$T_{яц} = \frac{L_{яц}}{R_{яц}} = \frac{0,674 \times 10^{-3}}{0,046} = 0,0146 \text{ с}.$$

Электромеханическая постоянная времени

$$T_m = \frac{J_{\rho} \times R_{яц}}{c^2} = \frac{5922,5 \times 0,023}{27,19^2} = 0,1843 \text{ с}.$$

Определим отношение

$$\frac{T_m}{T_{яц}} = \frac{0,1843}{0,0146} = 12,62,$$

полученное значение говорит о слабом влиянии электромеханических процессов на электромагнитные.

### 2.3.3 Расчет параметров тиристорного преобразователя якоря для схемы “ТП - эквивалентных двигателя”

Средневыпрямленная ЭДС преобразователя при угле управления  $\alpha=0^\circ$   
 $E_{d0} = k_{U_{2л}} \cdot U_{2лн} = 1,351 \cdot 900 = 1215,9 \text{ В}.$

Коэффициент усиления преобразователя

$$k_{мня} = k_{сy.мн} \cdot k_{yв} = 10 \cdot 21,95 = 197,55,$$

где  $k_{сy.мн} = \frac{D\alpha}{U_{уп.макс}} = \frac{90}{10} = 9 \text{ град}/\text{В}$

- коэффициент передачи СИФУ с линейным опорным напряжением;

$\Delta\alpha = 90^\circ$  - диапазон изменения угла управления в выпрямительном режиме;

$U_{уп.макс} = 10 \text{ В}$  – максимальное напряжение управления;

$$k_{yв} = \frac{\rho \times E_{d0(12)}}{180} = \frac{\rho \times 1258,3}{180} = 21,95 \text{ В}/\text{град}$$

- коэффициент передачи управляемого выпрямителя.

Коэффициент передачи ячейки согласования на входе СИФУ

$$k_{yo} = 2U_{опмакс} \times \frac{D\alpha}{180 \times U_{упмакс}} = 8 \times \frac{90}{180 \times 10} = 0,4,$$

где  $2U_{опмакс} = 8 \text{ В}$  – максимальный размах опорного напряжения на входе преобразователя.

Для расчета области существования электромеханических характеристик разомкнутой системы электропривода преобразуем исходную схему (рисунок 8) в схему “эквивалентный ТП - двигатель” (рисунок 10). Определим параметры этой схемы.

Активное сопротивление эквивалентного тиристорного преобразователя

$$R_{мнэ} = \frac{R_{мн}}{2} + R_{дв} + 0,1 \times R_{дв} = \frac{0,02575}{2} + 0,00915 + 0,1 \times 0,00915 = 0,02294 \text{ Ом}.$$

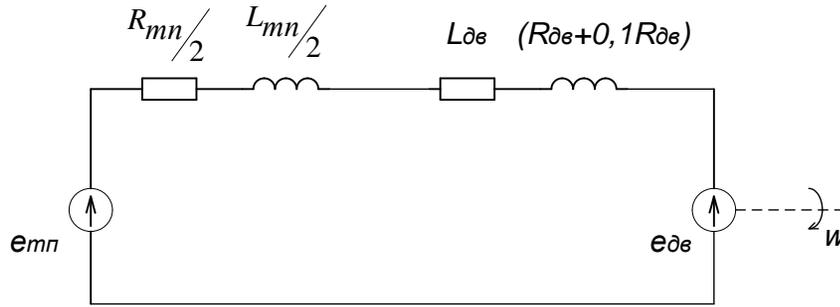


Рисунок 10 – Схема замещения “эквивалентный ТП - двигатель”

Индуктивность эквивалентного тиристорного преобразователя

$$L_{mn\bar{z}} = \frac{L_{mn}}{2} + L_{\delta\bar{z}} = \frac{0,452 \times 10^{-3}}{2} + 0,111 \times 10^{-3} = 0,337 \times 10^{-3} \text{ Гн} .$$

Средневыпрямленная ЭДС при угле управления  $\alpha=0^\circ$

$$E_{d0(12)} = k_{cx} \cdot U_{2лн} = 1,398 \cdot 900 = 1258,3 \text{ В} .$$

Сопротивление и индуктивность якорной цепи:

$$R_{яц} = \frac{R_{mn}}{2} + R_{\delta\bar{z}} + 0,1 \times R_{\delta\bar{z}} = \frac{0,02575}{2} + 0,00915 + 0,1 \times 0,00915 = 0,02294 \text{ Ом} ;$$

$$L_{яц} = \frac{L_{mn}}{2} + L_{\delta\bar{z}} = \frac{0,452 \times 10^{-3}}{2} + 0,111 \times 10^{-3} = 0,337 \times 10^{-3} \text{ Гн} .$$

## 2.4 Область работы и предельные характеристики схемы “ТП - эквивалентный двигатель”

Заданная область существования электромеханических характеристик электропривода (замкнутой системы), ограничиваемая значением  $\omega_{\text{Эп.макс}} = 52,36 \text{ рад/с}$  и  $I_{\text{Эп.макс}} = 8145 \text{ А}$ , должна полностью располагаться внутри области существования характеристик проектируемой системы преобразователь – двигатель. Выполнение этого условия требует значительного запаса по напряжению и мощности преобразователя и силового трансформатора. Поэтому такой подход может быть рекомендован только при проектировании электроприводов, от которых требуется реализация предельных динамических возможностей исполнительных двигателей.

В остальных случаях возможно баз значительного снижения быстродействия облегчить требования к запасу по напряжению и мощности. Однако и в этом случае должны быть выполнены следующие условия: при пониженном напряжении и работе преобразователя в выпрямленном режиме с минимальным углом управления электромеханическая характеристика разомкнутой системы должна быть расположена выше точки с координатами  $\omega = \omega_{\text{дв.н}} = 32,98 \text{ с}^{-1}$  и  $I = I_{\text{дв.н}} = 3620 \text{ А}$ , а при реверсировании, должно обеспечиваться безопасное инвертирование при допустимом токе двигателя.

Построим заданную область существования электромеханических характеристик электропривода, ограниченную значениями  $\omega_{\text{Эп.макс}} = \omega_{\text{дв.макс}} = 52,36 \text{ с}^{-1}$  и  $I_{\text{Эп.макс}} = I_{\text{дв.макс}} = 8145 \text{ А}$ .

Значение минимального угла управления преобразователем

$$\alpha_{\text{мин}} \approx \arccos \frac{k \times \Phi_{\text{н}} \times \omega_{\text{дв.н}} + I_{\text{дв.н}} \times R_{\text{яц}}}{K_{\text{Усмин}} \times E_{\text{д0(12)}}} = \arccos \frac{236 \times 0,115 \times 32,97 + 3620 \times 0,023}{0,9 \times 258,3} = 30,2^{\circ}.$$

Принимаем  $\alpha_{\text{мин}} = 30^{\circ}$ .

Рассчитаем и построим предельные электромеханические характеристики привода при минимальном угле управления при двух значениях напряжения сети ( $k_{\text{Ус}} = 0,9$  и  $k_{\text{Ус}} = 1,0$ ) и двух значениях потока возбуждения двигателя ( $\Phi_{\text{н}} = 0,115 \text{ Вб}$  и  $\Phi_{\text{мин}} = 0,072 \text{ Вб}$ ). Расчетное выражение электромеханической характеристики имеет вид

$$\begin{aligned} \omega_{\text{дв}} &= \frac{1}{k \times \Phi} \times (k_{\text{Ус}} \times E_{\text{д0(12)}} \times \cos \alpha_{\text{мин}} - I_{\text{дв}} \times R_{\text{яц}}) = \\ &= \frac{1}{236 \times \Phi} \times (k_{\text{Ус}} \times 258,3 \times 0,866 - I_{\text{дв.н}} \times 0,02297) . \end{aligned}$$

Результаты расчета сводим в таблицу 2. По данным таблицы построены характеристики (рисунок 11), из которых видно, что разомкнутая система привода обеспечивает требуемую область работы прокатной клетки

Таблица 2. – Расчетные данные электромеханических характеристик

$\Phi_{\text{дв}}, \text{Вб}$	0,115		0,072	
$k_{Uc}$	0,9	1,0	0,9	1,0
$I_{\text{дв}}, \text{А}$	$\omega_{\text{дв}}, \text{рад/с}$			
0	36,132	40,147	57,68	64,09
$I_{\text{дв.н}} = 3620$	33,07	37,08	53,8	59,2
$I_{\text{дв.макс}} = 8145$	29,23	33,25	46,7	53,1

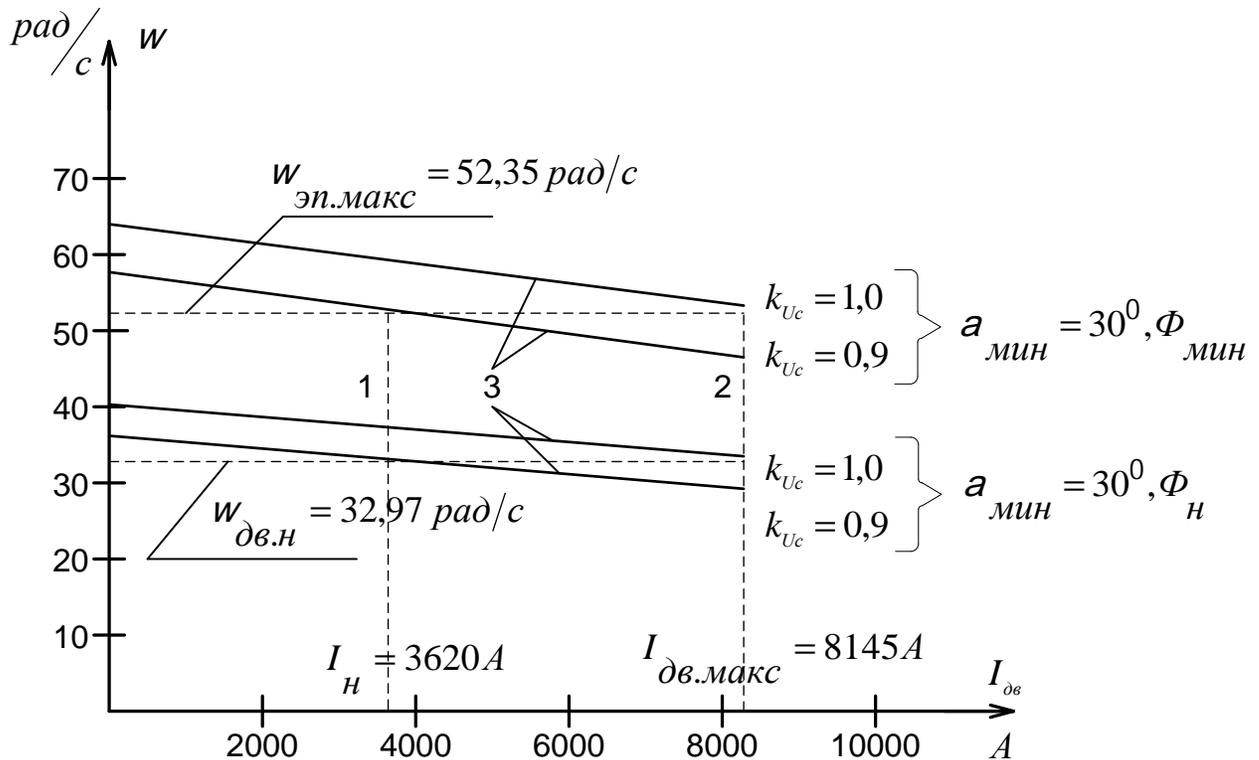


Рисунок 11 - Предельные характеристики привода: 1- границная характеристика области длительной работы; 2- границная характеристика области кратковременной работы; 3- электромеханические характеристики разомкнутого привода при  $\alpha_{\text{мин}} = 30^\circ$

## 2.5 Электромеханические характеристики системы преобразователь - двигатель

Скорость вращения вала электродвигателя:

$$\omega = \frac{E_d - I_d \times R_{яц} - DU_{\epsilon}}{c},$$

где:  $E_d = E_{d0} \times \cos(\alpha)$  – среднее значение выпрямленной ЭДС в режиме непрерывного тока;

$\alpha$  – угол включения тиристора, отсчитываемый от точки естественной коммутации;

$DU_{\epsilon}$  – прямое падение напряжение на тиристоре.

Для получения соответствующей скорости вращения вала двигателя произведем ряд преобразований и получим выражение для нахождения угла управления в функции скорости:

$$\alpha(\omega) = \arccos \frac{\omega \times c + I_d \times R_{яц} + DU_{\epsilon}}{E_{d0}}$$

Для построение электромеханических характеристик в зоне непрерывного тока воспользуемся итоговым выражением:

$$\omega(I) = \frac{E_{d0} \times \cos(\alpha(\omega)) - I \times R_{яц} - DU_{\epsilon}}{c}.$$

Характеристики имеют линейный характер. Однако в действительности в области малых нагрузок появляется зона прерывистых токов, она тем больше, чем больше угол  $\alpha$ . Появление зоны прерывистого токов обусловлено тем, что в определенные промежутки времени мгновенное значение выпрямленного напряжения преобразователя становится меньше встречно действующей ЭДС двигателя, и, как следует из уравнения равновесия ЭДС становится отрицательной. Ток должен изменить направление на противоположное. Но поскольку вентили обладают односторонней

проводимостью, ток становится равным нулю. При больших нагрузках несмотря на то, что в определенные промежутки времени мгновенное значение напряжения становится меньше ЭДС двигателя, ток не прерывается, является непрерывным. Объясняется это тем, что при больших нагрузках запас электромагнитной энергии в цепи выпрямленного тока значительный. Переходу от режима непрерывного тока к прерывистому соответствует режим начально-непрерывного тока, являющегося граничным. Величина граничного тока зависит от угла  $\alpha$  и параметров схемы. Проведем расчет и построение характеристик в зоне прерывистых токов. Для этого найдем угол открывания, измеренный от начала положительной полуволны синусоиды фазной ЭДС:

$$q_0(\alpha) = \frac{180}{\rho} \times \frac{\omega}{\omega_e} \alpha(\omega) + \frac{\omega \rho}{\omega_e 2} + \frac{\rho}{m_e} \frac{\ddot{\omega}}{\omega}$$

Значение ЭДС в относительных единицах в зависимости от угла управления  $\alpha$  в зоне прерывистых токов:

$$e(\alpha) = \cos \frac{\omega}{\omega_e} q \times \frac{\rho}{180} \frac{\ddot{\omega}}{\omega} \times \frac{\sin \frac{\omega}{\omega_e} (q_0(\alpha) - q) \times \frac{\rho}{180} \frac{\ddot{\omega}}{\omega} - \sin \frac{\omega}{\omega_e} (q_0(\alpha) + l - q) \times \frac{\rho}{180} \frac{\ddot{\omega}}{\omega} e^{l \times \frac{\rho}{180} \times \cot \frac{\omega}{\omega_e} q \times \frac{\rho}{180} \frac{\ddot{\omega}}{\omega}}}{1 - e^{l \times \frac{\rho}{180} \times \cot \frac{\omega}{\omega_e} q \times \frac{\rho}{180} \frac{\ddot{\omega}}{\omega}}}$$

где угол  $l = \frac{2 \times 180}{m_e} = 60$  град – угол проводимости тиристорov;

угол  $\theta$  – угол отставания тока в якоре от напряжения. Он обусловлен присутствием в цепи якоря индуктивности  $L_{яц}$ . Угол  $\theta$  найдем по выражению:

$$q = \arctan \frac{\omega \omega_0 \times L_{яц}}{R_{яц}} \frac{\ddot{\omega}}{\omega} \times \frac{180}{\rho}$$

Значение тока в относительных единицах в зоне прерывистых токов:

$$i(\alpha) = \frac{m_e}{2 \times \rho} \frac{\omega}{\omega_e} \cos \frac{\omega}{\omega_e} q_0(\alpha) \times \frac{\rho}{180} \frac{\ddot{\omega}}{\omega} - \cos \frac{\omega}{\omega_e} (l + q_0(\alpha)) \times \frac{\rho}{180} \frac{\ddot{\omega}}{\omega} - l \times \frac{\rho}{180} \times e_{cp}(\alpha) \frac{\ddot{\omega}}{\omega}$$

Характеристики режима прерывистого тока можно построить в абсолютных единицах  $W = f(I)$  по следующим выражениям:

$$W(a) = e(a) \frac{\sqrt{2} \times U_n \times \cos \frac{\alpha}{2} \times \cos \frac{\lambda}{2} \times \left( \frac{\rho}{180} - \frac{\rho}{2} \right) \cdot DU_6}{c},$$

$$I(a) = i(a) \frac{\sqrt{2} \times U_n \times \cos \frac{\alpha}{2} \times \cos \frac{\lambda}{2} \times \left( \frac{\rho}{180} - \frac{\rho}{2} \right)}{R_{яц}}.$$

Если в приведенных выражениях задавать угол открытия тиристоров  $\alpha$  (в диапазоне  $0 \dots 180$ ) и угол проводимости  $\lambda$  ( $0 \dots 60$ ), то получим семейство электро-механических характеристик в зоне прерывистых токов. Электро-механические характеристики системы УВ-Д построены в программе MathCad и представлены на рис. 12:

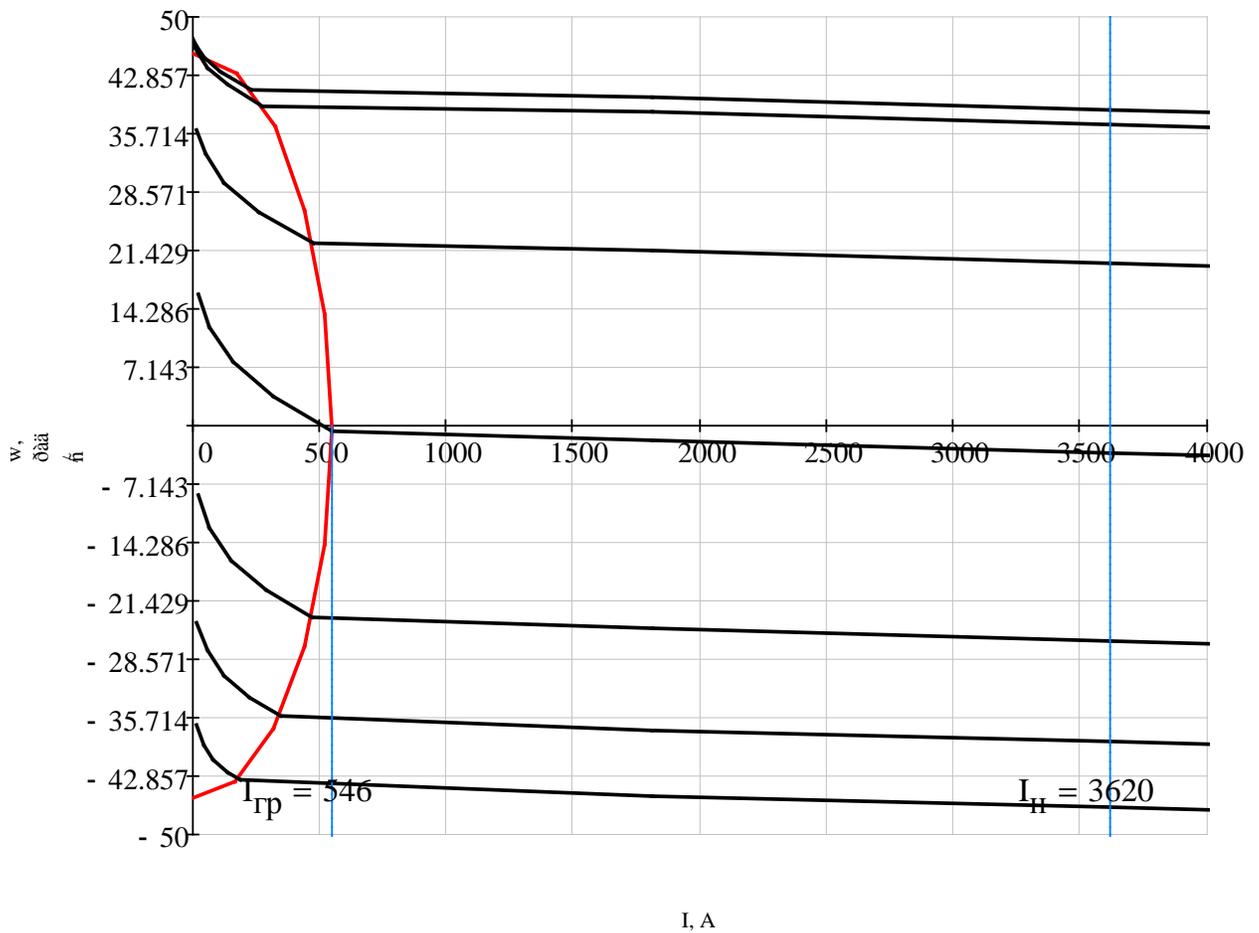


Рисунок 12 – Электромеханические характеристики системы УВ–Д с отдельным управлением

Для получения граничной характеристики можно воспользоваться выражениями для скорости и тока в зоне прерывистого тока, задавая угол  $\lambda = 60$  град и меняя угол управления  $\alpha$ .

Как видно из графиков рисунка 13 отношение  $\frac{I_{дгрmax}}{I_{дн}} = \frac{546}{3620} = 0,15$ , что является приемлемым.

## 2.6 Структурная схема силового канала

Как ранее говорилось оптимизацию контуров и дальнейшее моделирование ведем по схеме «ТП – эквивалентный двигатель» приведенной на рисунке 10. Расчет параметров силовой цепи для этой схемы приведен в таблице 3.

Таблица 3 - Параметры схемы «ТП – эквивалентный двигатель»

Наименование параметров	Расчетная формула, обозначение	Данные
1	2	3
Сопротивление управляемого выпрямителя, Ом	$R_{yв} = 2 \cdot R_{mp.ф} + R_k$	0,0253
Индуктивность управляемого выпрямителя, Гн	$L_{yв} = 2 \cdot L_{mp.ф}$	$0,132 \cdot 10^{-3}$
Сопротивление силовой цепи, Ом	$R_{mn} = R_{yв} + R_{др}$	0,02575
Индуктивность силовой цепи преобразователя, Гн	$L_{mn} = L_{yв} + L_{др}$	$0,452 \cdot 10^{-3}$
Сопротивление якорной цепи, Ом	$R_{яц} = R_{mn} + 2 \cdot (R_{дв} + 0,1 \cdot R_{дв})$	0,04588
Индуктивность якорной цепи, Гн	$L_{яц} = L_{mn} + 2 \cdot L_{дв}$	$0,674 \cdot 10^{-3}$
Постоянная времени якорной цепи, с	$T_{яц} = \frac{L_{яц}}{R_{яц}}$	0,0147
Максимальный ток двигателя, А	$I_{макс1} = \frac{I_{дв.макс}}{2}$	4072,5
Средневыпрямленное ЭДС, В	$E_{д0} = 1,35 \cdot U_{2л}$	1215
Момент инерции эквивалентный, половинный, кгм <sup>2</sup>	$J_{э1} = \frac{J_{э}}{2}$	2961,25

Продолжение таблицы 3.

1	2	3
Момент прокатки для эквивалентного двигателя, $H\cdot m$	$M_{n.прив} = \frac{M_{n.прив}}{2}$	62185,8
Число фаз выпрямителя	$m_{\phi}$	6
Коэффициент усиления тиристорного преобразователя	$k_{тия}$	197,55
Постоянная времени преобразователя, $c$	$T_{тия}$	0,00167

Структурная схема силового канала электропривода приведена на рисунке 13. Особенностью силовой схемы является параллельное включение двух выпрямительных тиристорных мостов.

Для измерения скорости вращения двигателя используется тахогенератор ПТ-32 с параметрами: номинальная скорость вращения тахогенератора  $n_{тг.ном} = 600$  об/мин; Номинальное напряжение  $U_{тг.ном} = 230$  В; номинальное напряжение возбуждения  $U_{втг.ном} = 55$  В [1, с.147], и типовые ячейки датчика напряжения с делителем.

Коэффициент передачи датчика скорости

$$k_{\phi c} = \frac{U_{\phi c. макс}}{\omega_{тг. ном}} = \frac{10}{62,83} = 0,15916 \frac{B \cdot c}{рад},$$

где  $U_{\phi c. макс} = 10$  В – максимальное напряжение датчика скорости;

$$\omega_{тг. ном} = \frac{\rho \times n_{тг. ном}}{30} = \frac{\rho \times 600}{30} = 62,83 \frac{рад}{c}$$

-номинальная угловая частота вращения тахогенератора.

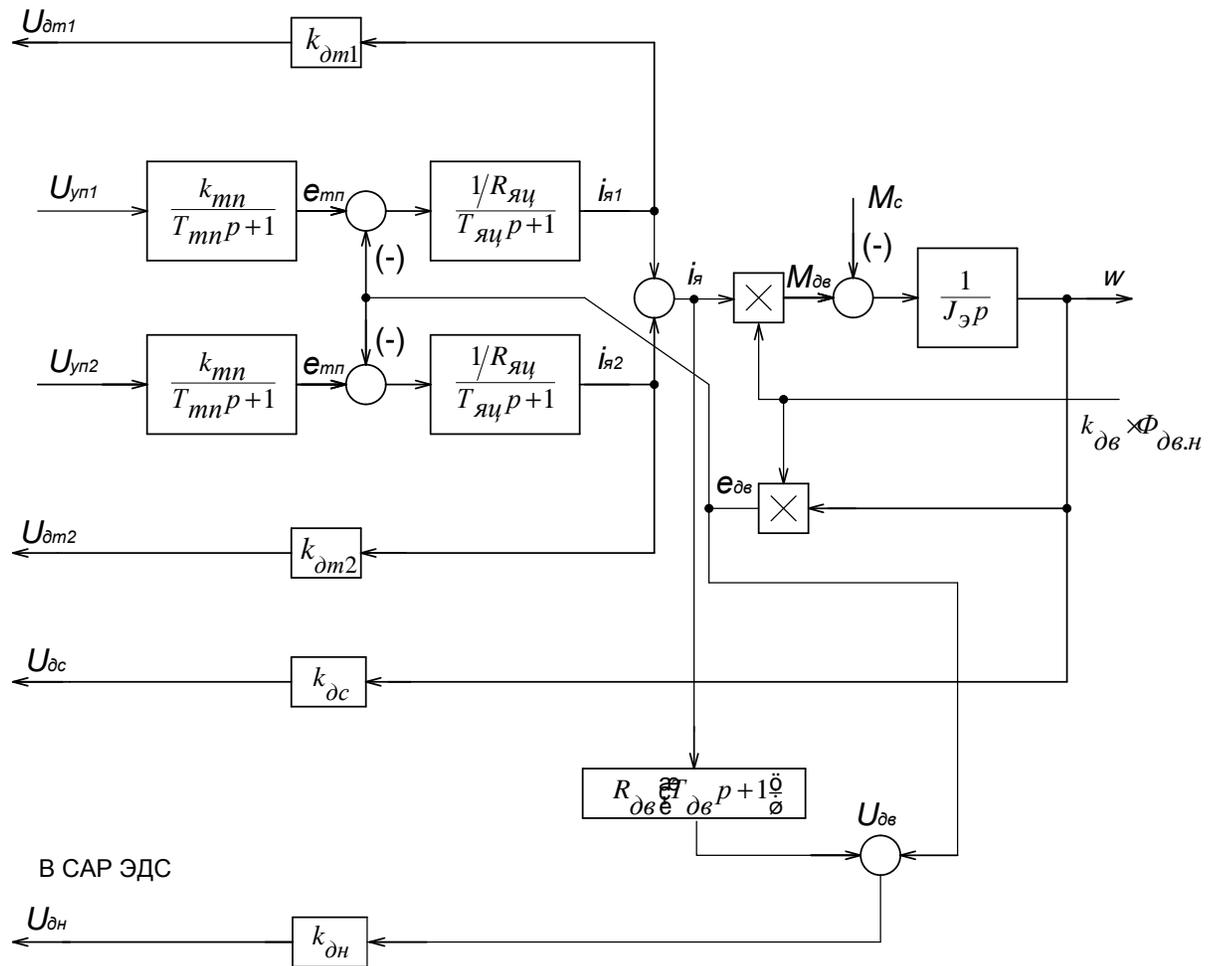


Рисунок 13 – Структурная схема силовой части электропривода для одного тиристорного преобразователя

Для измерения тока каждой группы вентилях используем шунт (номинальный ток  $I_{ш.ном} = 5000 \text{ A}$ , номинальное напряжение  $U_{ш.ном} = 0,075 \text{ B}$ ) и типовую ячейку датчика тока.

Коэффициент передачи датчика тока с учетом коэффициента усиления усилителя

$$k_{дт} = \frac{U_{дт.макс}}{I_{ш.ном}} = \frac{10}{5000} = 00,002 \text{ B/A},$$

где  $U_{дт.макс} = 10 \text{ B}$  – номинальное напряжение датчика тока.

## 2.7 Линеаризованная САУ РЭП

### 2.7.1 Структурная схема линеаризованной САУ ЭП

Структурная схема линеаризованной САУ скорости двигателя В первой зоне регулирования при номинальном потоке возбуждения двигателя приведена на рисунке 14. Особенностью схемы является два контура тока по числу параллельно включенных тиристорных мостов.

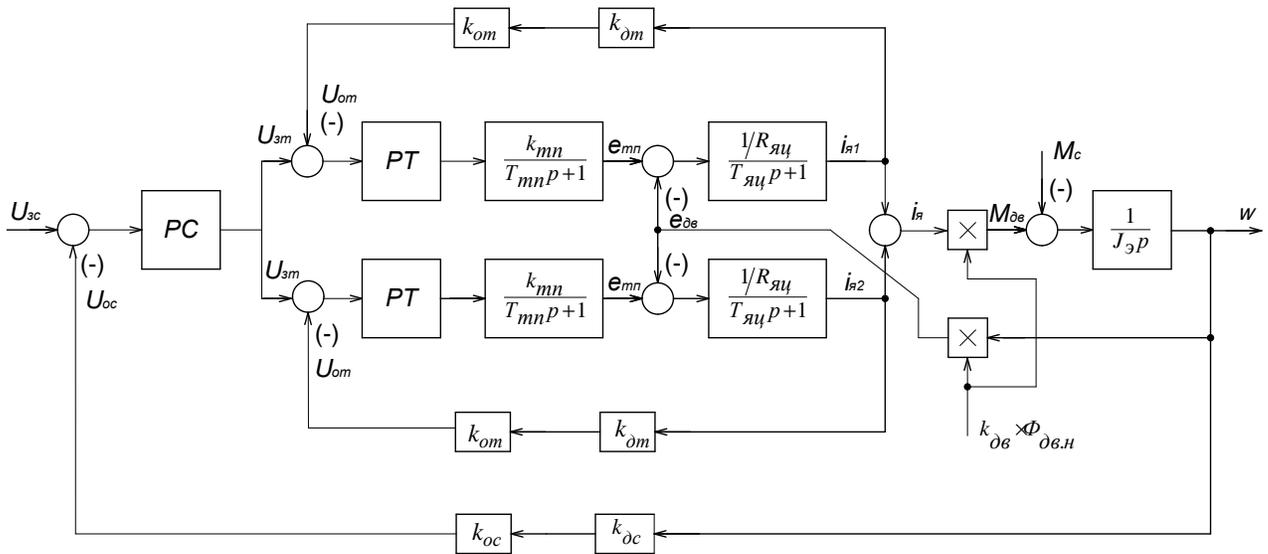


Рисунок 14 -Структурная схема линеаризованной САУ скорости двигателя

### 2.7.2 Оптимизация контура тока якоря

Прежде всего настройка контура тока производится для отдельной группы вентиляей. Тип регулятора и метод оптимизации контура выбираются в зависимости от соотношения

соотношения  $\frac{T_{яц}}{4 \times T_m}$ , таблица 4.

Таблица 4 - Тип регулятора и метод оптимизации контура

$T_{яц} / 4 \times T_m$	Тип регулятора	Метод оптимизации
$\leq 1$	ПИ	МО [СО]
$\geq 1$	ПИ	СО [МО]
$\gg 1$	П [ПИ]	МО [СО]

Контур тока настраивается на технический (модульный) оптимум (МО). Выбираем пропорционально - интегральный регулятор тока (ПИ – РТ) и коэффициент оптимизации  $a_m = 2$ .

Установка дополнительных сглаживающих фильтров в контуре тока и в цепи обратной связи весьма неблагоприятно сказывается на характере процессов в контуре (приводит к снижению быстродействия как контура тока, так и электропривода в целом), поэтому установка дополнительных фильтров в контуре тока может определяться только необходимостью снижения уровня помех, и должна быть отнесена к этапу ввода электропривода в эксплуатацию.

Структурная схема контура тока приведена на рисунке 13. Контур тока содержит две инерционности первого порядка в прямом канале с малой постоянной времени контура  $T_{\mu m} = T_{mn}$  и большой постоянной  $T_{яц}$ , которая должна быть компенсирована.

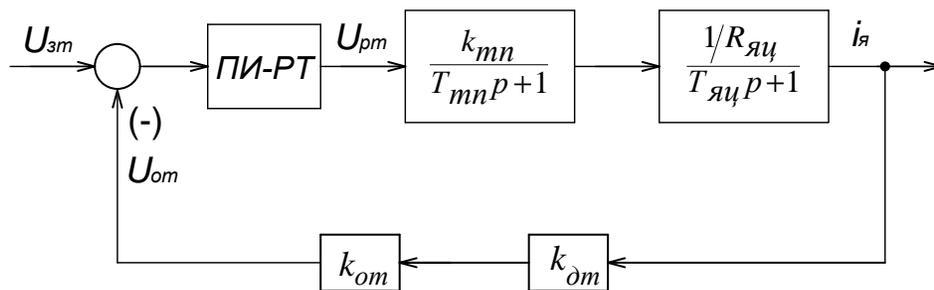


Рисунок 13 - Структурная схема контура тока

Передаточная функция ПИ-регулятора тока

$$W_{pm}(p) = k_{pm} \frac{T_{pm} \times p + 1}{T_{pm} \times p},$$

где  $T_{pm} = T_{яц} = 0,0147$  с

– постоянная времени регулятора тока;

$$k_{pm} = \frac{R_{яц} T_{яц}}{k_{mn} k_m a_m T_{mn}} = \frac{0,04588 \times 0,0147}{197,55 \times 0,00246 \times 2 \times 0,00167} = 0,4155$$

– коэффициент усиления регулятора тока;

$T_{\mu m} = T_{mn} = 0,00167$  с – малая постоянная времени контура тока;

$$k_m = \frac{U_{эп.макс}}{I_{эп.макс}} = \frac{10}{4072,5} = 0,00246 \text{ В/А}$$

- коэффициент обратной связи по току;

$U_{эп.макс} = 10$  В – максимальное напряжение задания контура тока;

$I_{эп.макс} = 4072,5$  А – максимальное значение тока для одной группы.

Коэффициент передачи входной цепи обратной связи регулятора тока

$$k_{om} = \frac{k_m}{k_{om}} = \frac{0,00246}{0,002} = 1,23.$$

Передаточная функция разомкнутого контура тока

$$W_{pm.раз}(p) = \frac{1}{a_m \times T_{mn} \times p \times (T_{mn} p + 1)} = \frac{1}{2 \times 0,00167^2 \times p^2 + 2 \times 0,00167 \times p} =$$

$$= \frac{1}{5,5778 \times 10^{-6} p^2 + 0,00334 p}.$$

Передаточная функция замкнутого контура тока

$$W_{pm.зам}(p) = \frac{1/k_m}{a_m \times T_{mn} \times p \times (T_{mn} p + 1) + 1} = \frac{1/0,00246}{2 \times 0,00167^2 \times p^2 + 2 \times 0,00167 \times p + 1} =$$

$$= \frac{406,5}{5,5778 \times 10^{-6} p^2 + 0,00334 p + 1}.$$

Оценить пригодность привода с заданными характеристиками для целей автоматизации технологического процесса позволит построение логарифмические частотные характеристик (ЛЧХ) оптимизированных контуров системы по управлению и по возмущению. Следует подчеркнуть, что внутреннюю обратную связь по ЭДС двигателя при выведении передаточных функций не учитывали из-за малого ее влияния. ЛЧХ замкнутого контура тока рассчитана с помощью программы Матлаб и приведена на рисунке 16.

Ожидаемые показатели качества работы замкнутого контура тока:

- установившаяся ошибка  $\Delta I_{уст} = 0$ ;
- перерегулирование  $\sigma = 4,3 \%$ ;
- время первого согласования  $t_{py1}^{(5)} = 4,1 \cdot T_{um} = 4,1 \cdot 0,00167 = 0,006847c$ ;
- время переходного процесса при отработке ступенчатого управляющего воздействия  $t_{py2}^{(5)} = 4,1 \cdot T_{um} = 0,006847c$ ;
- полоса пропускания по модулю и фазе

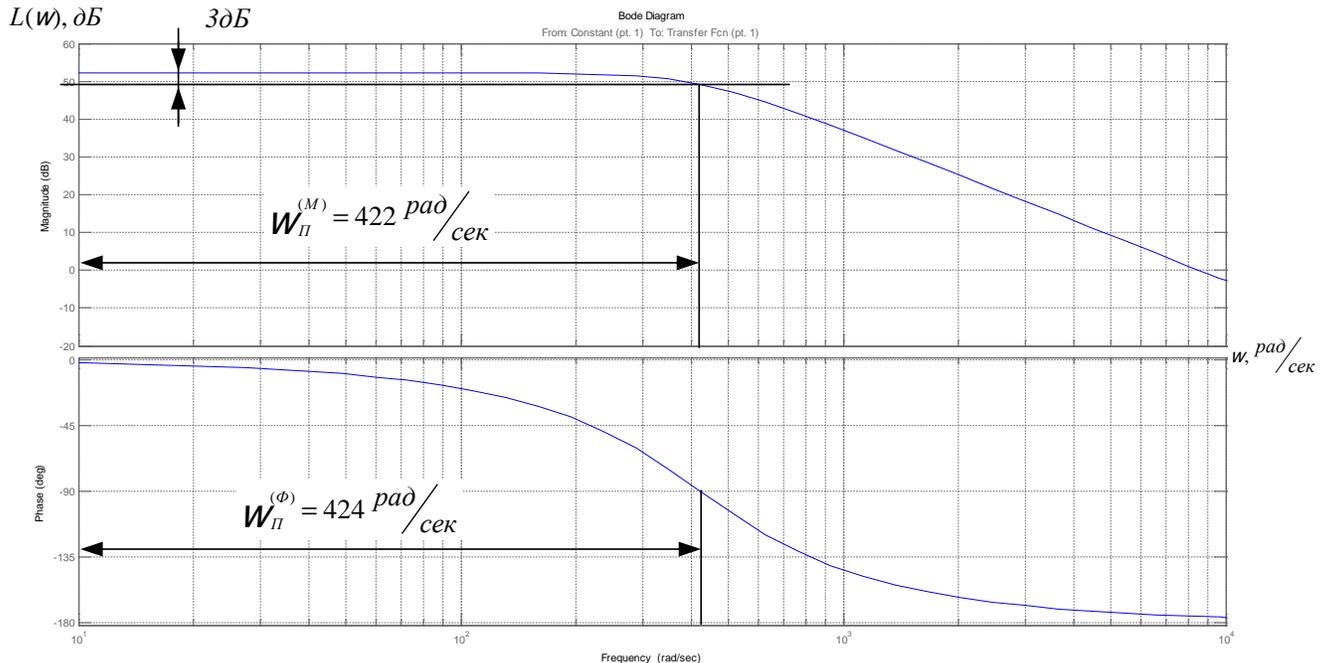


Рисунок 16 – ЛЧХ замкнутого контура тока

$$w_n^{(M)} = w_n^{(\phi)} = \frac{0,71}{T_{m1}} = \frac{0,71}{0,00167} = 425,15 \text{ рад/с}$$

или

$$f_n^{(M)} = f_n^{(\phi)} = \frac{w_n^{(\phi)}}{2\pi} = \frac{425,15}{2\pi} = 67,67 \text{ Гц}.$$

По ЛЧХ замкнутого контура тока находим значение частоты пропускания контура

$$w_i^{(i)} = w_i^{(\delta)} = 10^{2,625} = 422 \text{ рад/с}$$

или

$$f_i^{(i)} = f_i^{(\delta)} = \frac{w_i^{(\delta)}}{2\pi} = \frac{422}{2\pi} = 67,163 \text{ Гц}.$$

### 2.7.3 Оптимизация контура скорости двигателя

Структурная схема контура скорости приведена на рисунке 17.

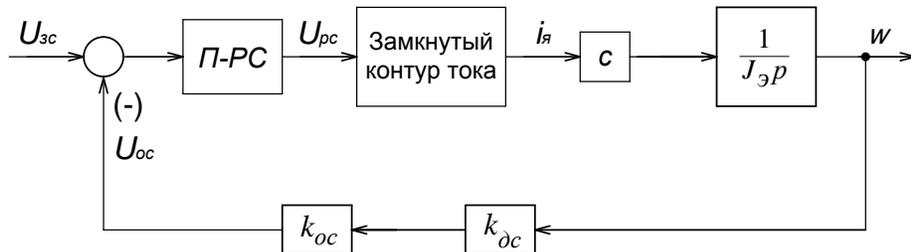


Рисунок 17 - Структурная схема контура скорости

Контур оптимизируем по МО. Так как в прямом канале контура скорости имеется интегрирующее звено, то для его оптимизации по МО выбираем пропорциональный регулятор (П-РС) с передаточной функцией

$$W_{pc}(p) = k_{pc},$$

$$\text{где } k_{pc} = \frac{J_{\varepsilon 1} \times k_m}{c \times k_c \times a_c \times a_m \times T_{m1}} = \frac{2961,25 \times 0,00246}{27,19 \times 0,191 \times 2 \times 2 \times 0,00167} = 210,$$

– коэффициент усиления регулятора скорости;

$$k_c = \frac{U_{зс.макс}}{W_{эл.макс}} = \frac{10}{52,36} = 0,191B \times c$$

- коэффициент обратной связи по скорости;

$U_{зс.макс} = 10$  – максимальное напряжение задания скорости, В;

$a_c = 2$  – коэффициент оптимизации контура скорости.

Коэффициент передачи входной цепи регулятора скорости

$$k_{oc} = \frac{k_c}{k_{dc}} = \frac{0,191}{0,15916} = 1,2.$$

Малая постоянная времени контура скорости

$$T_{\mu c} = a_m \cdot T_{mn} = 2 \cdot 0,00167 = 0,00334 \text{ с.}$$

Передаточная функция разомкнутого контура скорости

$$\begin{aligned} W_{pc.раз}(p) &= \frac{1}{8T_{m1}^3 p^3 + 8T_{m1}^2 p^2 + 4T_{m1} p} = \\ &= \frac{1}{8 \times 0,00167^3 p^3 + 8 \times 0,00167^2 p^2 + 4 \times 0,00167 p} = \\ &= \frac{1}{3,726 \times 10^{-8} p^3 + 2,231 \times 10^{-5} p^2 + 0,00668 p} \end{aligned}$$

Передаточная функция замкнутого контура скорости

$$\begin{aligned} W_{pc.зам}(p) &= \frac{1/k_c}{8T_{m1}^3 p^3 + 8T_{m1}^2 p^2 + 4T_{m1} p + 1} = \\ &= \frac{1/0,191}{8 \times 0,00167^3 p^3 + 8 \times 0,00167^2 p^2 + 4 \times 0,00167 p + 1} = \\ &= \frac{5,236}{3,726 \times 10^{-8} p^3 + 2,231 \times 10^{-5} p^2 + 0,00668 p + 1} \end{aligned}$$

ЛЧХ замкнутого контура скорости рассчитана с помощью программы Мат-лаб и приведена на рисунке 18.

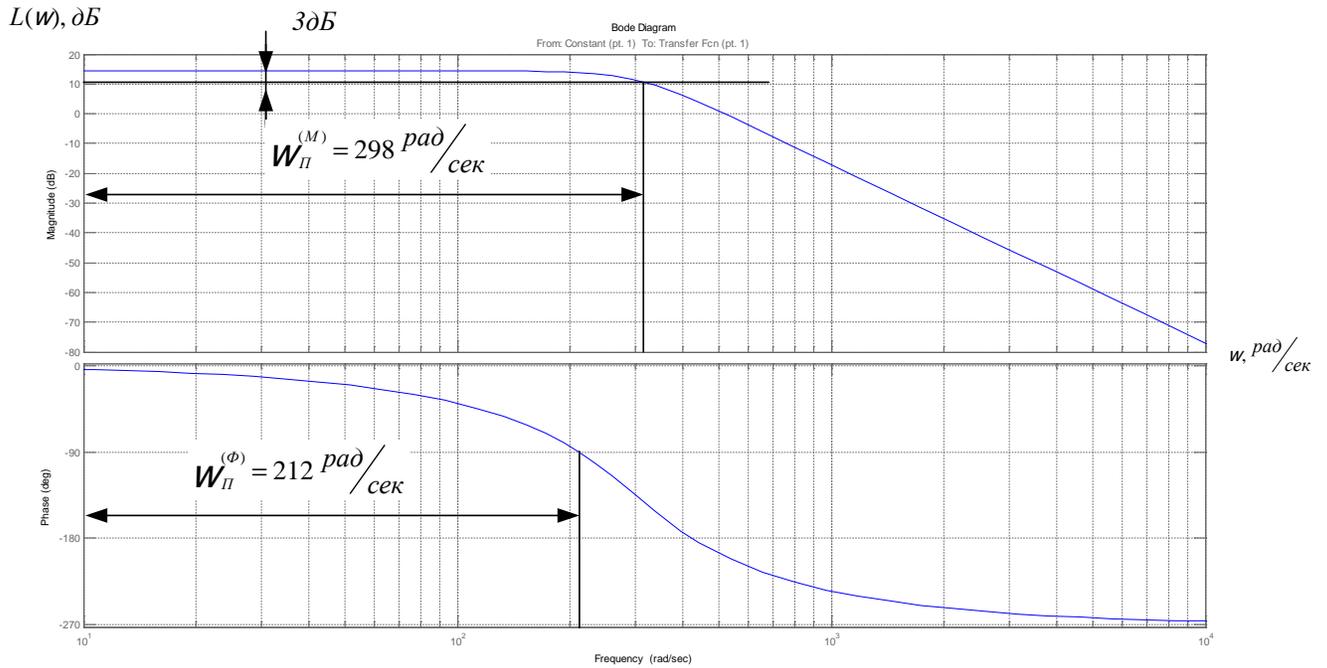


Рисунок 18 – ЛЧХ замкнутого контура скорости

Ожидаемые показатели работы замкнутого контура скорости:

- установившаяся ошибка  $\Delta W_{y,уст} = 0$ ;
- перерегулирование  $\sigma = 8,1 \%$ ;
- время первого согласования  $t_{py1}^{(5)} = 7 \cdot T_{\mu m} = 7 \cdot 0,00167 = 0,01169 \text{ с}$ ;
- время переходного процесса при отработке ступенчатого управляющего воздействия  $t_{py2}^{(5)} = 12 \cdot T_{\mu m} = 12 \cdot 0,00167 = 0,02004 \text{ с}$ ;

- полоса пропускания по модулю

$$W_n^{(M)} = \frac{0,5}{T_{m1}} = \frac{0,5}{0,00167} = 299,4 \text{ рад/с}$$

ИЛИ

$$f_n^{(M)} = \frac{W_n^{(M)}}{2\rho} = \frac{299,4}{2\rho} = 47,65 \text{ Гц}$$

- полоса пропускания по фазе

$$W_n^{(\phi)} = \frac{0,35}{T_{m1}} = \frac{0,35}{0,00167} = 209,58 \text{ рад/с}$$

ИЛИ

$$f_n^{(\phi)} = \frac{w_n^{(\phi)}}{2\rho} = \frac{209,58}{2\rho} = 33,36 \text{Гц} .$$

По ЛЧХ замкнутого контура тока находим значение частоты пропускания контура

- по модулю  $w_i^{(i)} = 10^{2,474} = 298 \frac{\delta \dot{a} \ddot{a}}{\ddot{n}}$  или

$$f_i^{(i)} = \frac{w_i^{(i)}}{2\rho} = \frac{298}{2\rho} = 47,43 \text{А} \ddot{o} ;$$

- по фазе  $w_i^{(\delta)} = 10^{2,326} = 212 \frac{\delta \dot{a} \ddot{a}}{\ddot{n}}$  или

$$f_i^{(\delta)} = \frac{w_i^{(\delta)}}{2\rho} = \frac{212}{2\rho} = 33,74 \text{А} \ddot{o} .$$

#### 2.7.4 Контур скорости возмущающих воздействий

Структурная схема линейризованного контура скорости, настроенного на МО, при отработке возмущающего воздействия приведена на рисунке 19.

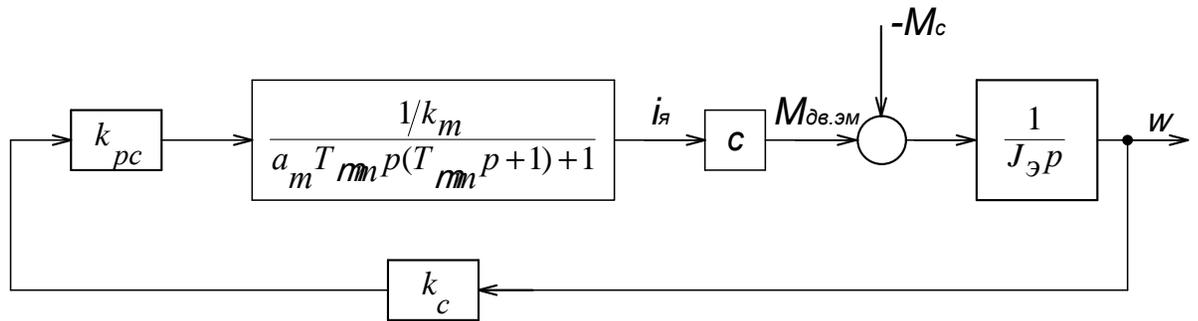


Рисунок 19. - Структурная схема линейризованного контура скорости, настроенного на МО, при отработке возмущающего воздействия

Передаточная функция замкнутого контура скорости по возмущению

$$W_{\text{возм. зам}}(p) = \frac{\frac{a_c \times a_m \times T_{\text{инт}}}{J_{\text{эл}}} \times [a_m \times T_{\text{инт}} p \times (T_{\text{инт}} p + 1) + 1]}{a_c \times a_m \times T_{\text{инт}} p \times [a_m \times T_{\text{инт}} p \times (T_{\text{инт}} p + 1) + 1] + 1} =$$

$$= \frac{\frac{2 \times 2 \times 0,00167}{2961,25} \times [2 \times 0,00167^2 p^2 + 2 \times 0,00167 p + 1]}{2 \times 2^2 \times 0,00167^3 p^3 + 2 \times 2^2 \times 0,00167^2 p^2 + 2 \times 2 \times 0,00167 p + 1} =$$

$$= \frac{1,258 \times 10^{-11} p^2 + 7,535 \times 10^{-9} p + 1}{3,726 \times 10^{-8} p^3 + 2,231 \times 10^{-5} p^2 + 6,68 \times 10^{-3} p + 1} .$$

ЛЧХ замкнутого контура скорости при обработке возмущающего воздействия рассчитана с помощью программы Матлаб и приведены на рисунке 20.

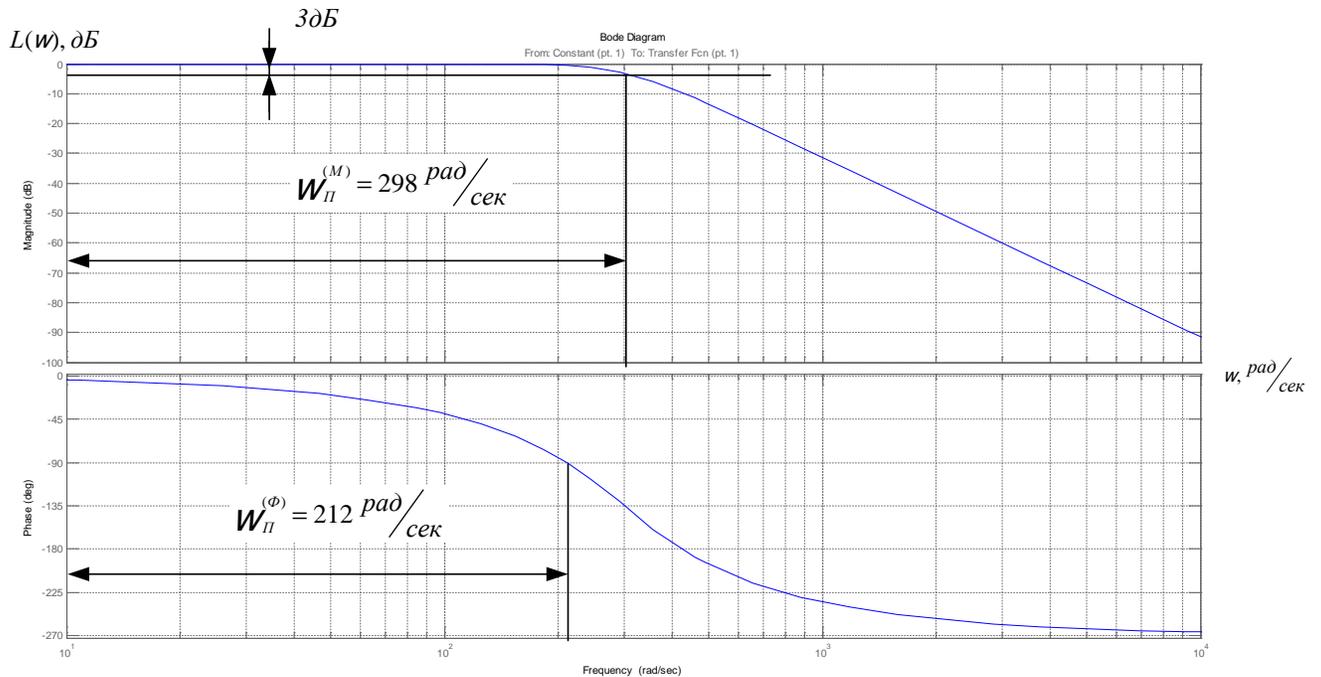


Рисунок 20. - ЛЧХ замкнутого контура скорости при обработке возмущающего воздействия

Ожидаемые показатели работы замкнутого контура скорости, настроенного по МО, при обработке ступенчатого возмущающего воздействия:

- установившаяся ошибка по возмущению при  $\Delta M_c = M_n = 62185,8 \text{ Н}\cdot\text{м}$

$$Dw_{\text{возм.уст}} = \frac{a_c \times a_m \times T_{mn}}{J_{\text{эл}}} \times \Delta M_c = \frac{2 \times 2 \times 0,00167}{2961,25} \times 62185,8 = 0,1403 \text{ рад/с};$$

- динамический провал (всплеск) скорости при набросе (сбросе) нагрузки  
 $\Delta M_c = 62185,8 \text{ Н}\cdot\text{м}$

$$Dw_{\text{возм.макс}} = \frac{a_c \times a_m \times T_{mn}}{J_{\text{эл}}} \times \Delta M_c \times \frac{\ddot{\theta}}{\theta} \times [0,37 \times (1 + 0,95 \times a_c)] =$$

$$= \frac{2 \times 2 \times 0,00167}{2961,25} \times 62185,8 \times \frac{\ddot{\theta}}{\theta} \times [0,37 \times (1 + 0,95 \times 2)] = 0,1505 \text{ рад/с}.$$

### 2.7.5 Оптимизация контура САУ ЭДС двигателя

САУ ЭДС двигателя работает во второй зоне регулирования скорости электропривода и состоит из двух контуров регулирования: внутренний контур тока возбуждения двигателя и внешний контур ЭДС двигателя. Настройка контуров начинается с внутреннего контура тока.

Структурная схема линейризованной САУ ЭДС двигателя приведена на рисунке 21.

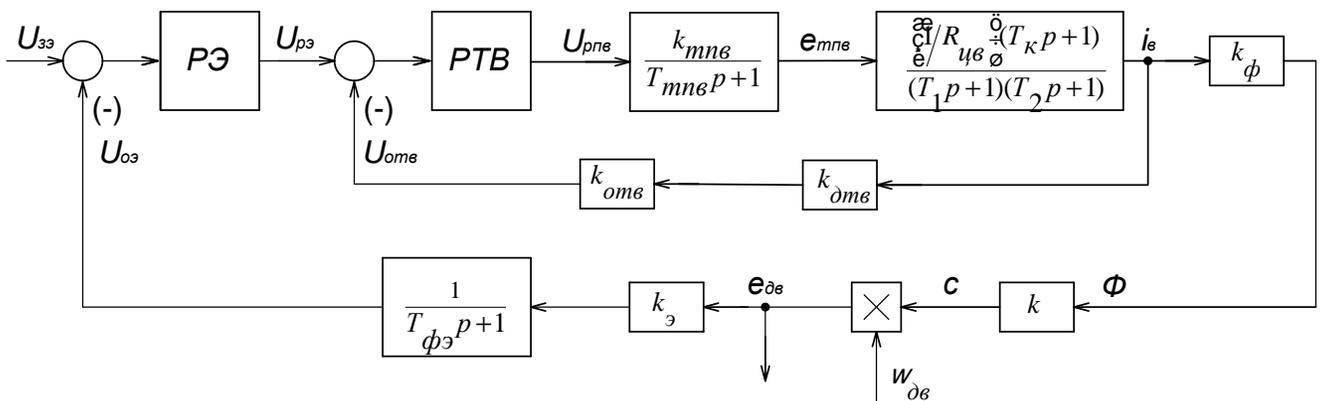


Рисунок 21. - Структурная схема линейризованной САУ ЭДС

### 2.7.5.1 Контур тока возбуждения

Структурная схема контура тока возбуждения электродвигателя приведена на рисунке 22,а. Контур содержит три инерционных (апериодических) и одно форсирующее звено. Постоянные времени звеньев связаны соотношением  $T_1 \gg (T_{mn\delta} + T_2)$  и  $T_1 > T_k$ . Тогда принимаем:

$T_1 = T_\delta + T_k + T_s = 1,05 + 0,105 + 0,323 = 1,478 \text{ с}$  – большая постоянная времени контура;

$$T_{\mu m\delta} = (T_{mn\delta} + T_2) = 0,00167 + 0,0229 = 0,02457 \text{ с}$$

– малая постоянная времени контура,

$$\text{где } T_2 = \frac{T_k \times T_s}{T_k + T_s + T_\delta} = \frac{0,105 \times 0,323}{0,105 + 0,323 + 1,05} = 0,0229 \text{ с}$$

- эквивалентная малая постоянная времени контура тока.

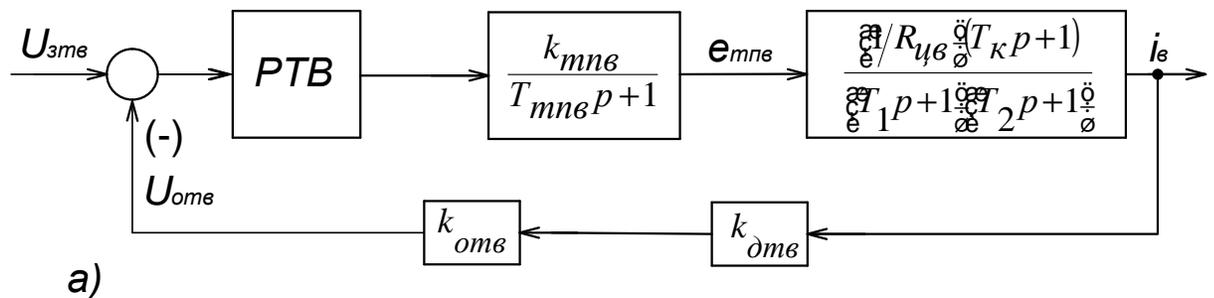
Для компенсации влияния форсирующего звена в прямом канале устанавливают в цепь обратной связи инерционное звено с передаточной функцией

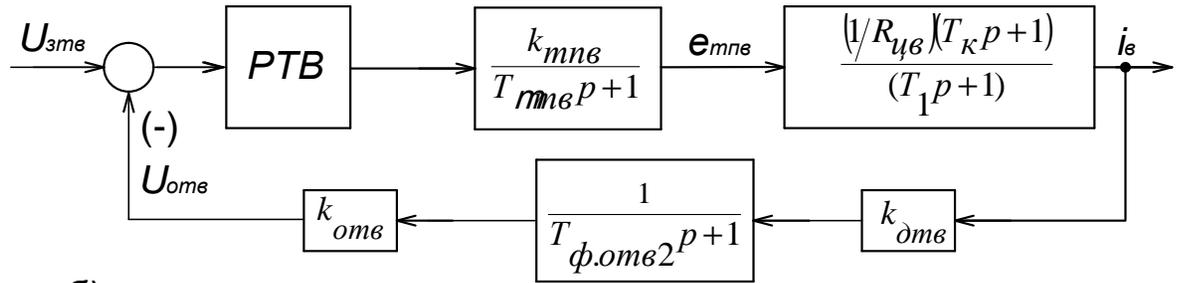
$$W_{\phi.ome} (p) = \frac{1}{T_{\phi.ome2} p + 1},$$

где  $T_{\phi.ome2} = T_k = 0,105 \text{ с}$

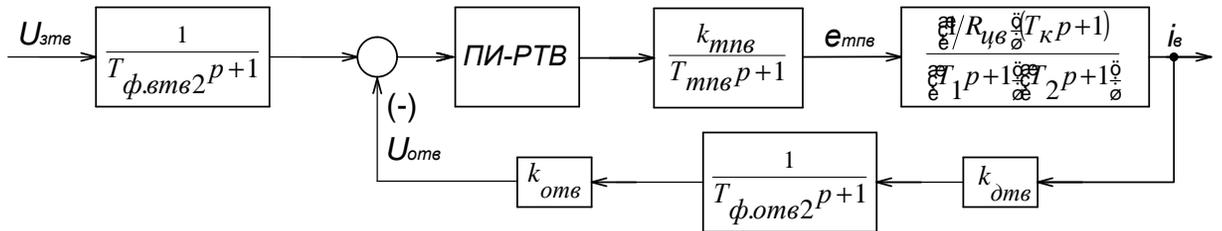
- постоянная времени которого выбирается из условия.

Структурная схема преобразованного контура тока возбуждения приведена на рисунке 22, б.





б)



в)

Рисунок 22 - Структурная схема контура тока возбуждения двигателя

Для настройки контура приведенного на рисунке 22, б, выбирают ПИ-регулятор тока возбуждения с передаточной функцией

$$W_{рмв}(p) = k_{рмв} \times \frac{T_{рмв} \times p + 1}{T_{рмв} \times p}$$

Настройку контура производят на МО, тогда:

- постоянная времени регулятора тока

$$T_{рмв} = T_1 = 1,478 \text{ с};$$

- коэффициент усиления регулятора

$$k_{рмв} = \frac{T_1 \times R_{цв}}{k_{мнв} \times k_{тв} \times a_{тв} \times T_{рмв}} = \frac{1,478 \times 3,404}{48,3 \times 0,1887 \times 2 \times 0,02457} = 11,23,$$

$$\text{где } k_{тв} = \frac{U_{змв.макс}}{I_{в.н}} = \frac{10}{53} = 0,1887 \text{ В/А}$$

- коэффициент обратной связи по току возбуждения;

$a_{тв} = 2$  - коэффициент оптимизации по МО;

$U_{змв.макс} = 10 \text{ В}$  – максимальное значение напряжения управления на входе контура.

Настроенный таким образом контур (рисунок 22,б) имеет следующие передаточные функции:

- разомкнутого контура

$$W_{mв.раз}(p) = \frac{1}{a_{mв} \times T_{mв} p \times (T_{mв} p + 1)};$$

- замкнутого контура (по управлению)

$$W_{mв.у.зам}(p) = \frac{(1/k_{mв})(T_{к} p + 1)}{a_{mв} \times T_{mв}^2 p^2 + a_{mв} \times T_{mв} p + 1}.$$

Перерегулирование в контуре при отработке ступенчатого воздействия зависит главным образом от отношения  $\frac{T_{к}}{a_{mв} \times T_{mв}}$ . При настройке на МО ( $a_{mв} = 2$ ) уже при отношении  $\frac{T_{к}}{T_{mв}} > 1$  перерегулирование превышает 6,7 %. Поэтому для уменьшения перерегулирования на входе контура устанавливается сглаживающий фильтр с передаточной функцией

$$W_{ф.вмезам}(p) = \frac{1}{T_{ф.вмезам} p + 1},$$

постоянная времени которого выбирается из условия  $T_{ф.вмезам} = T_{к} = 0,105$  с.

Коэффициент передачи входной цепи обратной связи регулятора тока определяется по выражению

$$k_{омв} = \frac{k_{mв}}{k_{омв}} = \frac{0,1887}{0,06} = 1,887,$$

где  $k_{омв} = 0,1$  В/А – коэффициент датчика тока возбуждения с учетом параметров стандартного шунта ( $I_{шн} = 100$  А,  $\Delta U_{шн} = 0,075$  В) и коэффициента усиления типовой ячейки датчика тока.

Передаточная функция разомкнутого контура тока возбуждения

$$W_{m6.paz}(p) = \frac{1}{2 \times T_{m6} p \times (T_{m6} p + 1)} = \frac{1}{2 \times 0,02457^2 p^2 + 2 \times 0,02457 p} =$$

$$= \frac{1}{0,00121 p^2 + 0,04914 p} .$$

Передаточная функция замкнутого контура по управлению с фильтром на входе имеет вид

$$W_{зам}(p) = \frac{1/k_{m6}}{a_{m6} \times T_{m6}^2 p^2 + a_{m6} \times T_{m6} p + 1} = \frac{1/0,1887}{2 \times 0,02457^2 p + 20,02457 p + 1} =$$

$$= \frac{5,3}{0,00121 p^2 + 0,04917 p + 1} .$$

Структурная схема настроенного таким образом контура тока возбуждения электродвигателя имеет вид, представленный на рисунке 22,в.

ЛЧХ замкнутого контура тока возбуждения рассчитана с помощью программы Матлаб и приведена на рисунке 23.

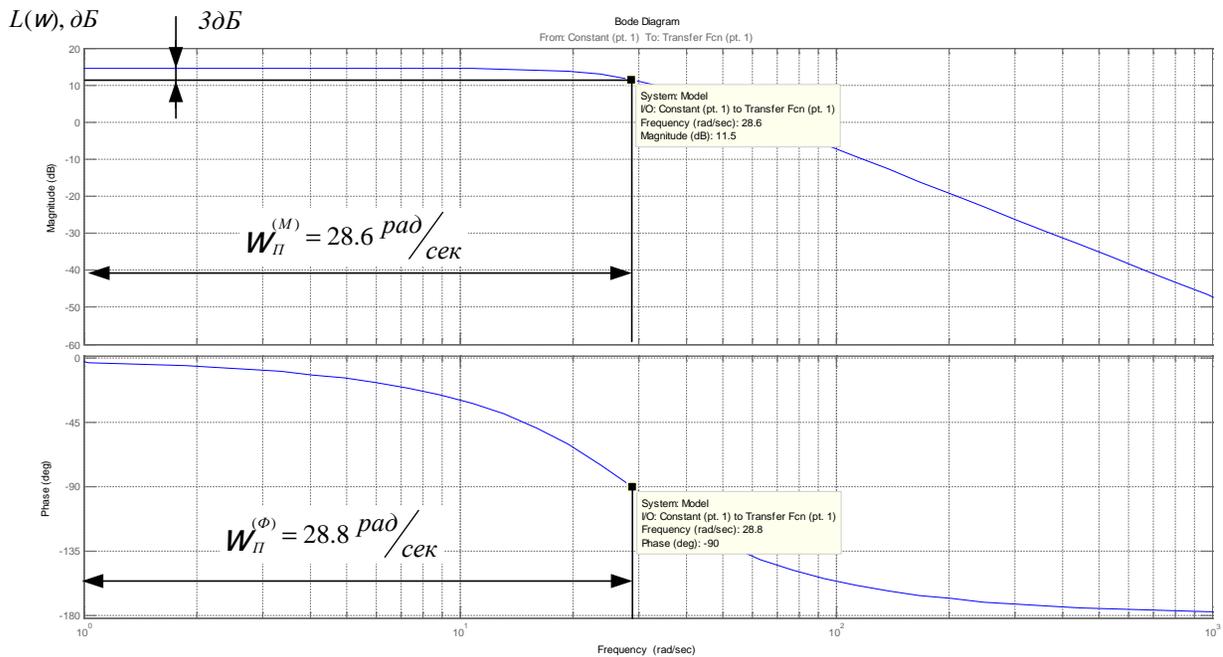


Рисунок 23 – ЛЧХ замкнутого контура тока возбуждения

Ожидаемые показатели качества работы контура тока возбуждения с фильтром на входе по управлению:

- установившаяся ошибка  $\Delta I_{e,ycm} = 0$ ;
- полоса пропускания по модулю и фазе

$$W_n^{(M)} = W_n^{(\phi)} = \frac{0,71}{T_{\mu\tau\epsilon}} = \frac{0,71}{0,02457} = 28,897 \text{ рад/с};$$

- показатели при обработке ступенчатого входного воздействия:

$$\sigma = 4,3 \% - \text{перерегулирование};$$

$t_{py1}^{(5)} = t_{py2}^{(5)} = 4,1 \cdot T_{\mu\tau\epsilon} = 4,1 \cdot 0,02457 = 0,1007 \text{ с}$  - время первого и окончательного вхождения в 5% зону.

По ЛЧХ замкнутого контура тока находим значение частоты пропускания контура

$$W_i^{(i)} = W_i^{(\delta)} = 10^{1,456} = 28,6 \frac{\delta \ddot{a} \ddot{i}}{\ddot{n}}$$

или

$$f_i^{(i)} = f_i^{(\delta)} = \frac{W_i^{(\delta)}}{2\rho} = \frac{28,6}{2\rho} = 4,55 \ddot{A} \ddot{o}.$$

### 2.7.5.2 Контур ЭДС двигателя

Структурная схема контура ЭДС в первом приближении может быть представлена в виде схемы, приведенной на рисунке 24, где обозначено

$$W_{\text{т.у.замк}}(p) = \frac{(1/k_m) \times (T_\kappa p + 1)}{a_{\text{тв}} T_{\text{тв}}^2 p^2 + a_{\text{тв}} T_{\text{тв}} p + 1}$$

- передаточная функция оптимизированного замкнутого по управлению контура тока возбуждения двигателя.

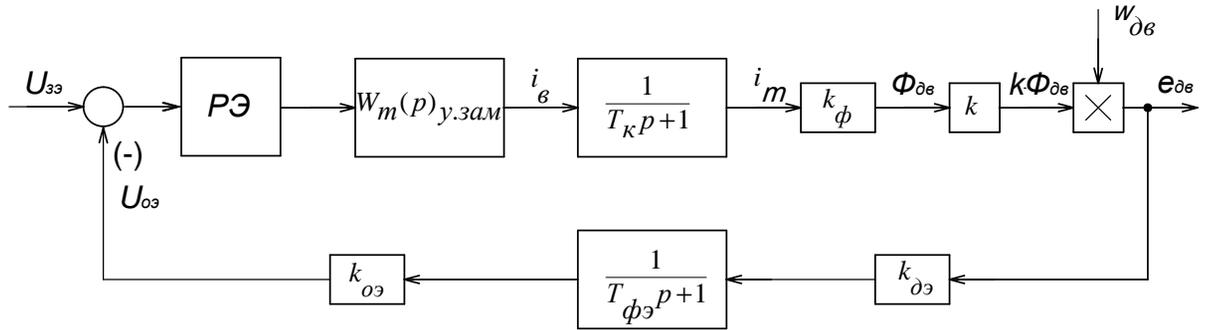


Рисунок 24 - Структурная схема контура ЭДС двигателя

После преобразования структурная схема примет вид, приведенный на рисунке 25.

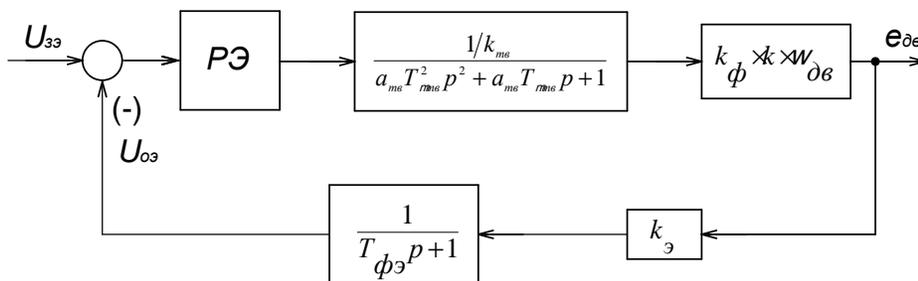


Рисунок 25. - Структурная схема контура ЭДС двигателя после преобразования

Основное назначение контура ЭДС – поддержание постоянного значения ЭДС двигателя, равного номинальному значению  $E_{дв.н.}$ , во второй зоне регулирования скорости (выше номинальной) ослаблением поля. Это достигается ослаблением потока возбуждения двигателя от номинального значения  $\Phi_{дв.н.}$  до минимального значения  $\Phi_{дв.мин.}$ . При этом изменяется коэффициент пропорциональности между током возбуждения и потоком  $k_\phi = \frac{D\Phi}{DI_\phi}$  от начального значения при  $\Phi_{дв.н.}$  до максимального значения при  $\Phi_{дв.мин.}$ . Управление на входе контура постоянное  $U_{зз.макс} = 10 \text{ В} = const$  и соответствует  $E_{дв.н.}$ . Основным воздействием на контур является возмущение – изменение скорости вращения двигателя от  $\omega_{дв.н.}$  до  $\omega_{эл.макс.}$

На практике для настройки контура ЭДС двигателя в двухзонном электроприводе применяют П-, ПИ- и И-регуляторы. Контур с П-регулятором характеризуется высоким быстродействием, но имеет статические ошибки отработки ЭДС

двигателя как по управлению так и по возмущению. Контуры с ПИ-регулятором и И-регулятором обеспечивают нулевую установившуюся ошибку поддержания ЭДС двигателя и по управлению и по возмущению.

При определении параметров настройки регулятора ЭДС следует принять  $\omega_{\text{дв.н}} = 32,98 \text{ рад/с}$ ,  $\omega_{\text{дв.макс}} = 52,36 \text{ рад/с}$ , а значение коэффициента  $k_{\phi}$  определить по кривой намагничивания на ее линейном участке

$$k_{\phi} = \frac{D\Phi}{DI_{\phi}} = \frac{\Phi_{\text{н}} - \Phi_{\text{мин}}}{I_{\text{в.н}} - I_{\text{в.мин}}} = \frac{0,115 - 0,072}{53 - 19} = 0,00126$$

Настройку контура ЭДС двигателя ведем на МО с ПИ-регулятором ЭДС (ПИ-РЭ). Передаточная функция регулятора ЭДС

$$W_{\text{рз}}(p) = k_{\text{рз}} \frac{T_{\text{рз}} p + 1}{T_{\text{рз}} p},$$

где

$$k_{\text{рз}} = \frac{k_{\text{ме}} \left( \frac{1}{a_{\text{ме}}} + \frac{T_{\text{фз}}}{a_{\text{ме}} T_{\text{пме}}} \right)}{k_{\phi} \times \omega_{\text{дв.н}} \times k_{\text{р}} \times 2 \times \frac{T_{\text{фз}}}{a_{\text{ме}} T_{\text{пме}}}} = \frac{0,1887 \left( \frac{1}{2} + \frac{0,012}{2 \times 0,02457} \right)}{0,00126 \times 236 \times 32,98 \times 0,01075 \times 2 \times \frac{0,012}{2 \times 0,02457}}$$

$$k_{\text{рз}} = 3,8834$$

- коэффициент усиления регулятора ЭДС;

$$T_{\text{рз}} = \frac{4T_{\text{фз}} \left( \frac{1}{a_{\text{ме}}} + \frac{T_{\text{фз}}}{a_{\text{ме}} T_{\text{пме}}} \right)}{\frac{1}{a_{\text{ме}}} + \frac{T_{\text{фз}}}{a_{\text{ме}} T_{\text{пме}}}} = \frac{4 \times 0,012 \times \left( \frac{1}{2} + \frac{0,012}{2 \times 0,02457} \right)}{\frac{1}{2} + \frac{0,012}{2 \times 0,02457}} = 0,0264 \text{ с}$$

- постоянная времени регулятора ЭДС;

$$T_{\phi\Delta} = T_{\phi H} = T_{\Delta\phi} = \frac{L_{\Delta\phi}}{R_{\Delta\phi, \text{сop}}} = \frac{0,000111}{0,00915} = 0,012 \text{ с}$$

– постоянная времени интегрирующего звена в цепи обратной связи по ЭДС, равная постоянной времени датчика напряжения;

$$k_{\Delta} = \frac{U_{\Delta, \text{макс}}}{E_{\Delta\phi, H}} = \frac{10}{929,85} = 0,01075$$

– коэффициент обратной связи по ЭДС.

Настроенный таким образом контур ЭДС двигателя имеет следующую передаточную функцию замкнутого контура по управлению

$$W_{\text{рз.у. замк}}(p) = \frac{(1/k_{\Delta}) \times (T_{\text{рз}} p + 1) \times (T_{\phi\Delta} p + 1)}{a_4 p^4 + a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + 1} =$$

$$= \frac{(1/0,01075) \times (0,0264 p + 1)(0,012 p + 1)}{6,24 \times 10^{-11} p^4 + 7,74 \times 10^{-9} p^3 + 3,25 \times 10^{-7} p^2 + 0,0264 p + 1},$$

$$\text{где } a_4 = \frac{k_{\text{мс}} \times a_{\text{мс}} \times \Gamma_{\text{мс}}^2 \times \Gamma_{\phi\Delta} \times \Gamma_{\text{рз}}}{k_{\text{рз}} \times k_{\phi} \times k \times W_{\Delta\phi, H} \times k_{\Delta}} =$$

$$= \frac{0,1887 \times 2 \times 0,02457^2 \times 0,012 \times 0,0264}{3,8834 \times 3,56 \times 236 \times 32,98 \times 0,01075} = 6,24 \times 10^{-11};$$

$$a_3 = \frac{k_{\text{мс}} \times a_{\text{мс}} \times \Gamma_{\text{мс}} \times \Gamma_{\text{рз}} \times (T_{\phi\Delta} + T_{\text{мс}})}{k_{\text{рз}} \times k_{\phi} \times k \times W_{\Delta\phi, H} \times k_{\Delta}} =$$

$$= \frac{0,1887 \times 2 \times 0,02457 \times 0,0264 \times (0,012 + 0,02457)}{3,8834 \times 3,56 \times 236 \times 32,98 \times 0,01075} = 7,74 \times 10^{-9};$$

$$a_2 = \frac{k_{\text{мс}} \times \Gamma_{\text{рз}} \times (a_{\text{мс}} \times \Gamma_{\text{мс}} + T_{\text{рз}})}{k_{\text{рз}} \times k_{\phi} \times k \times W_{\Delta\phi, H} \times k_{\Delta}} =$$

$$= \frac{0,1887 \times 0,0264 \times (2 \times 0,02457 + 0,0264)}{3,8834 \times 3,56 \times 236 \times 32,98 \times 0,01075} = 3,25 \times 10^{-7};$$

$$a_1 = \frac{\Delta \Gamma}{\Gamma} + \frac{k_{mv}}{k_{pz} \times k_{\phi} \times k \times W_{об.н} \times k_{\varepsilon}} \frac{\ddot{\varphi}}{\varphi} \times \Gamma_{pz} =$$

$$= \frac{\Delta \Gamma}{\Gamma} + \frac{0,1887}{3,8834 \times 3,56 \times 236 \times 32,98 \times 0,01075} \frac{\ddot{\varphi}}{\varphi} \times 0,0264 = 0,0264 .$$

Установившаяся статическая ошибка контура по управлению и по возмущению равна нулю

$$\Delta E_{у.уст} = \Delta E_{в.уст} = 0.$$

Работа контура ЭДС по возмущению может быть оценена только в режимах совместной работы всей системы регулирования двухзонного электропривода. Это может быть выполнено путем моделирования на имитационной модели или экспериментально на физической системе.

## 2.8 Нелинейная САУ РЭП

### 2.8.1 Анализ основных нелинейностей электропривода

Основными нелинейностями двухзонного тиристорного электропривода являются:

- насыщение всех регуляторов, выходное напряжение которых ограничено на уровне  $(11 \div 12)B$  при напряжении источников питания операционных усилителей  $\pm 15B$ . Принимаем при моделировании  $U_{рег.макс} = \pm 10B$ ;

- ограничение углов управления тиристорных преобразователей, при моделировании это учитывается ограничением выходной ЭДС преобразователя

$$E_{тп.макс} = E_{d0} \times \cos a_{мин} = 1215,9 \times \cos 30 = 1053B ,$$

$$E_{тпв.макс} = E_{d0} \times \cos a_{мин} = 276,86 \times \cos 30 = 239,77B ;$$

- ограничение тока якорной цепи, которое достигается ограничением выходного напряжения регулятора скорости

$$U_{pc.дон} = k_m \times I_{эн.макс} = 0,00246 \times 4072,5 = 10B;$$

- реактивный характер момента нагрузки, который определяется выражением  $M_c(w) = M_c \times sign w$ ;

- нелинейная зависимость потока двигателя от тока возбуждения, которая определяется кривой намагничивания двигателя;

- специфические свойства тиристорного преобразователя, которое проявляется в дискретности управления, односторонней проводимости, нелинейности регулировочных характеристик. Указанные свойства будут играть существенную роль при управлении двигателем со стороны якоря и малосущественную – при управлении со стороны обмотки возбуждения двигателя. Здесь важным является то, как эффективно гасится поле двигателя в зоне ослабления поля возбуждения.

## 2.8.2 Структурная схема САУ ЭП

Полная структурная схема двухзонного электропривода клетки приведена на рисунке 26.

Электропривод имеет две системы автоматического управления: САУ скорости с П-РС и ПИ-РТЯ и САУ напряжения двигателя с ПИ-РЭ и ПИ-РТВ. Параметры элементов структурной схемы приведены в таблице 5.

Таблица 5. - Параметры элементов структурной схемы

$k_{pc}$	$k_{oc}$	$k_{dc}$	$k_{pm}$	$k_{om}$	$k_{dm}$	$T_{pm},$ $c$	$k_{mn}$	$T_{mn},$ $c$	$R_{яц},$ $Ом$
210	1,2	0,15916	0,4155	1,23	0,002	0,0147	197,55	0,00167	0,04588

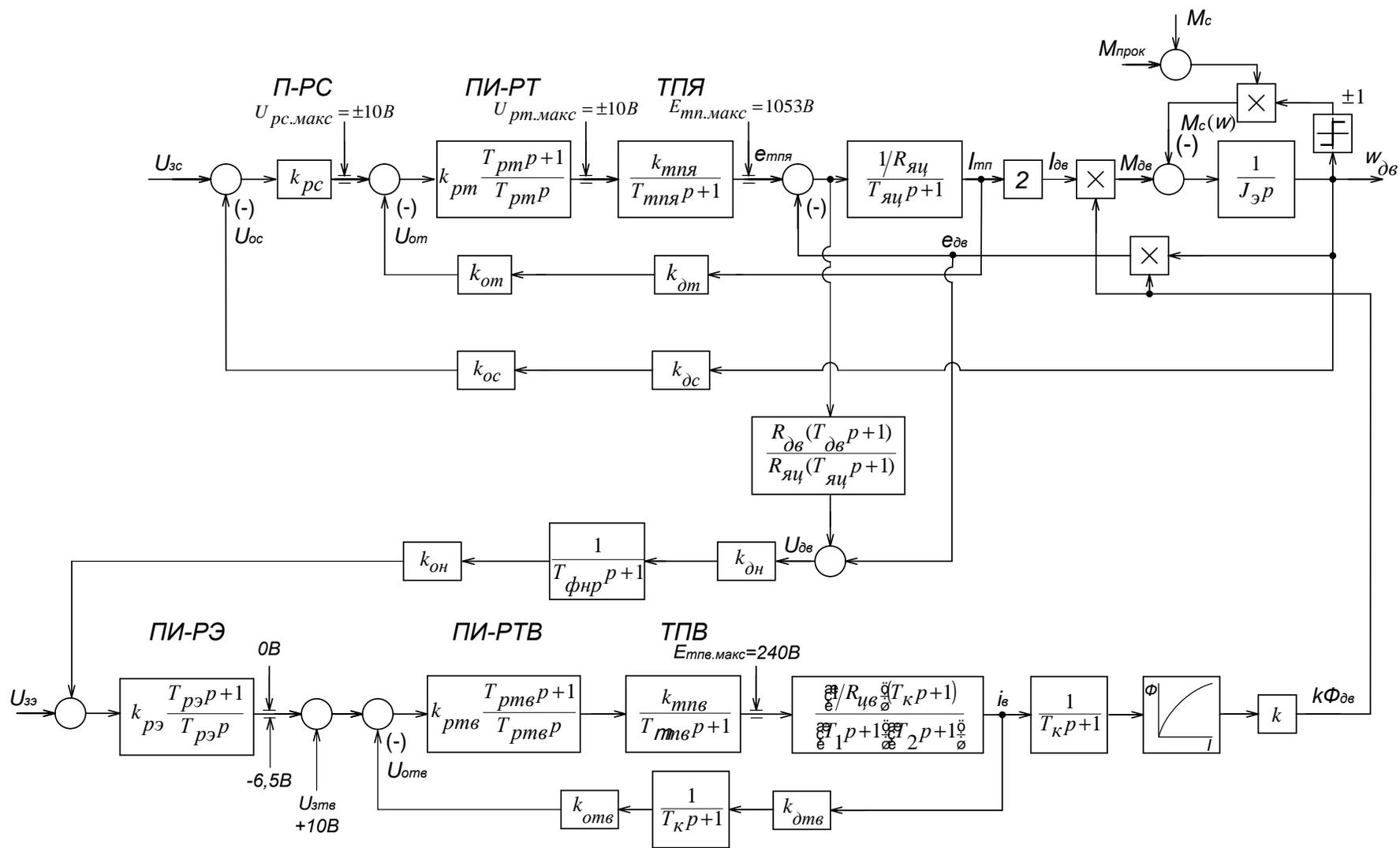


Рисунок 26 – Структурная схема САУ ЭП

Продолжение таблицы 5.

$T_{яц},$ $c$	$c,$ $(H \cdot M)$ $A$	$J_{э},$ $кг \cdot м^2$	$k_{дн}$	$k_{он}$	$T_{фн} = T_{дв},$ $c$	$R_{дв.зоп},$ $Ом$	$k_{рэ}$	$T_{рэ},$ $c$
0,0147	27,19	2961,25	0,01	1,075	0,012	0,00916	0,00137	0,0264

Продолжение таблицы 5.

$k_{рмв}$	$T_{рмв},$ $c$	$k_{мнв}$	$T_{мнв},$ $c$	$T_{к},$ $c$	$R_{цв},$ $Ом$	$T_1,$ $c$	$T_2,$ $c$	$k_{омв}$	$k_{дмв}$
11,23	1,478	48,3	0,00167	0,105	3,0104	1,478	0,0229	1,887	0,1

Продолжение таблицы 5.

$k$	$M_{с(мр)},$ $H \cdot м$	$M_n,$ $H \cdot м$	$L_{яц},$ $Гн$	$L_{дв},$ $Гн$	$E_{мп.макс},$ $B$	$E_{d0},$ $B$	$I_{макс1},$ $A$
236	5403	62185,8	0,000674	0,000111	1053	1215,9	4072,5

### 2.8.3 Исследование электропривода на имитационных моделях

Исследования электропривода при работе в двух зонах регулирования реализовано

Расчет переходных процессов в системах регулируемого двухзонного электропривода постоянного тока нелинейной САУ РЭП преобразователь непрерывный, выполненного по структурной многоконтурной схеме с последовательной коррекцией, выполняется методом имитационного моделирования с помощью программы Matlab. Программа воспроизводится методом имитационного численного моделирования переходных процессов в аналоговых нелинейных системах регулируемого электропривода при типовых задающих и возмущающих воздействиях. Она позволяет в широких пределах варьировать структуру и значения параметров элементов САУ, выводить результаты расчетов в виде графиков, по которым определяются динамические качества.

Схема модели двухзонного электропривода представлена на рисунке 27.

Переходные процессы нелинейной САУ РЭП преобразователь непрерывный представлены на рисунках 28-32.

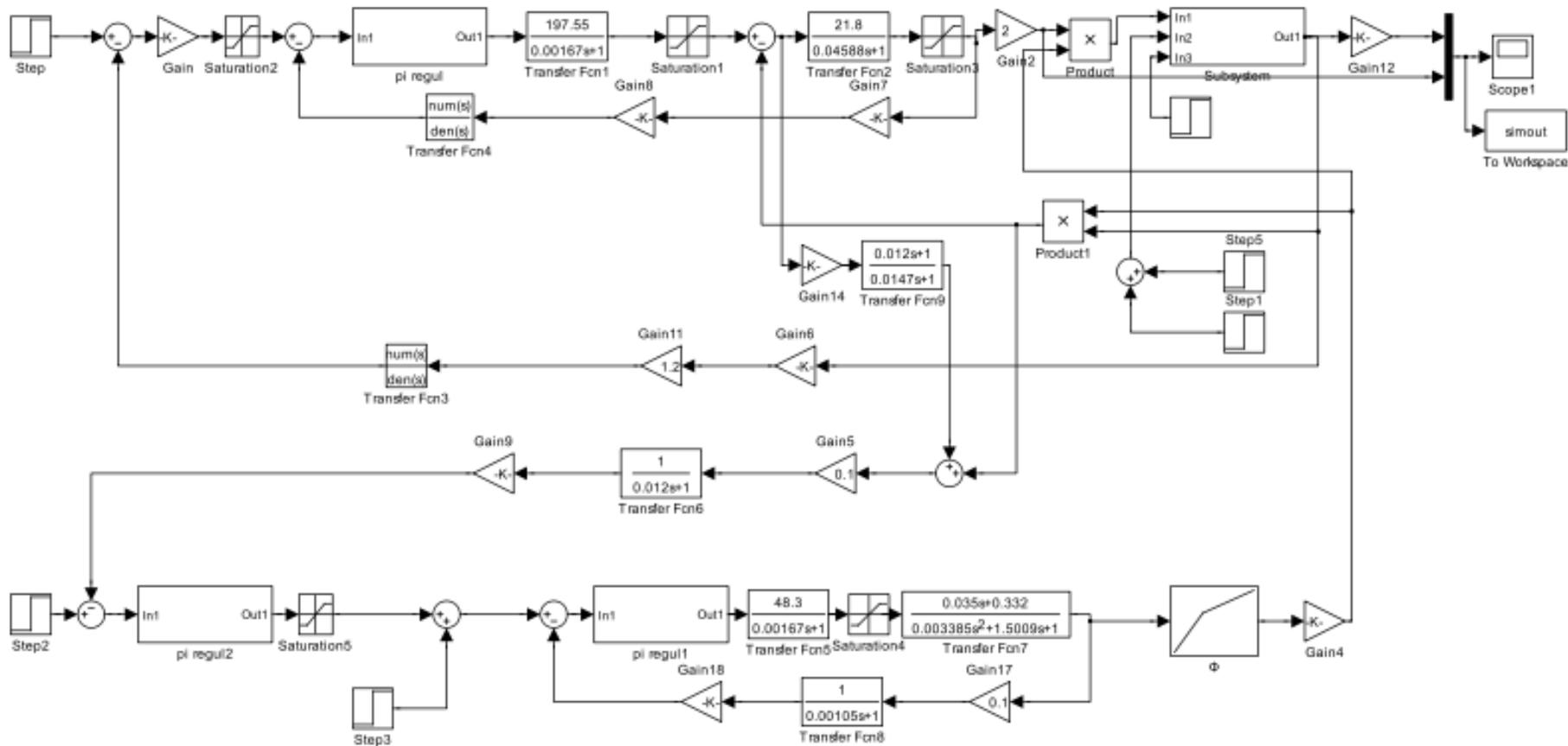


Рисунок 27 – Схема набора модели в программе Matlab.

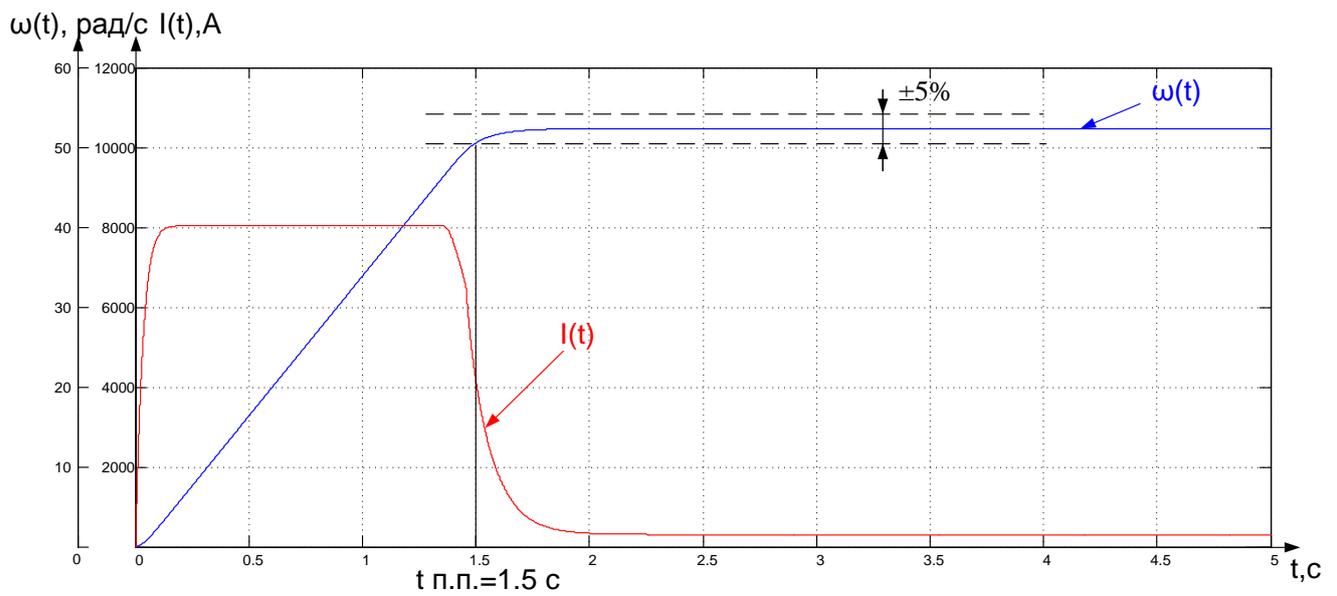


Рисунок 28. – Пуск с нагрузкой холостого хода  $M_c = 5403Н·м$  при  $U_{3c}=10В$ .

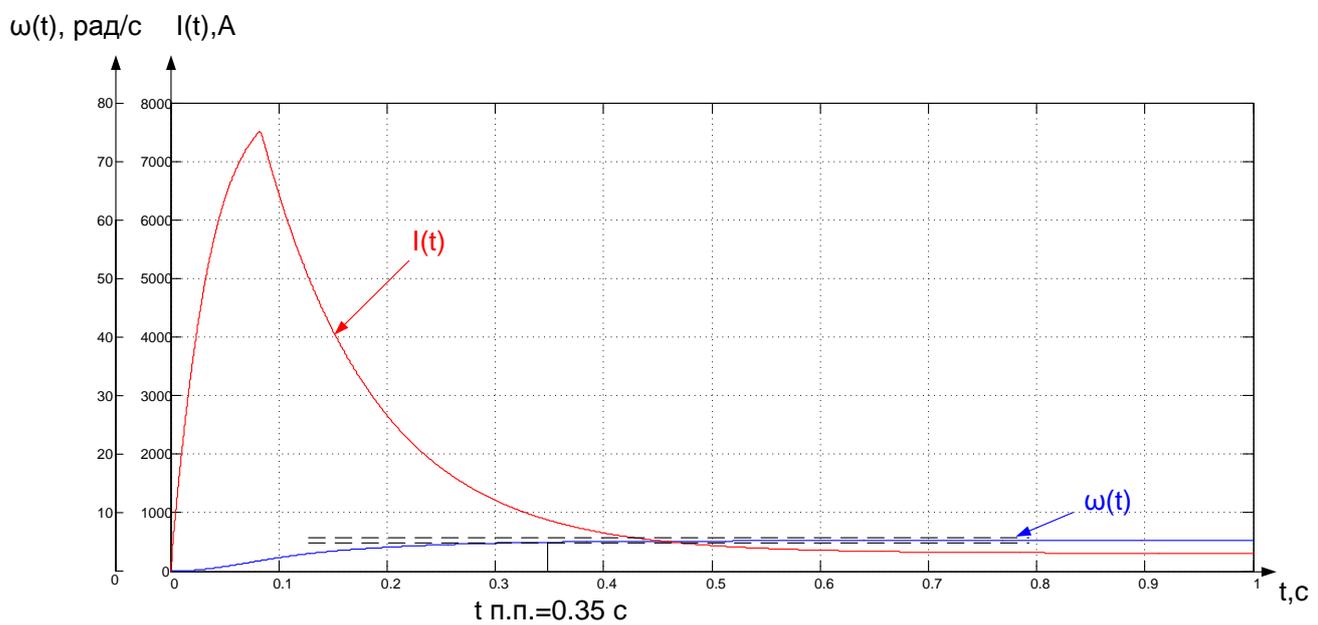


Рисунок 29. – Пуск с нагрузкой холостого хода  $M_c = 5403Н·м$  при  $U_{3c}=1В$ .

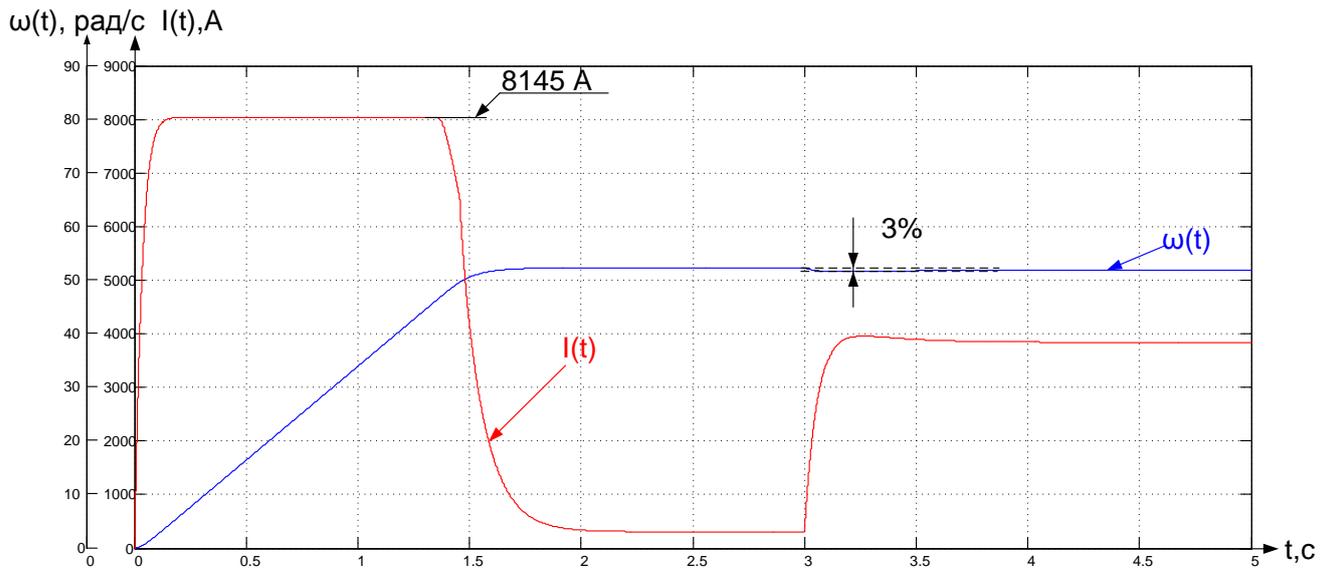


Рисунок 30. – Пуск с нагрузкой холостого хода  $M_c = 5403 \text{ Н}\cdot\text{м}$  при  $U_{zc}=10 \text{ В}$  и наброс нагрузки через 3 секунд до момента прокатки  $M_c=62185,8 \text{ Н}\cdot\text{м}$ .

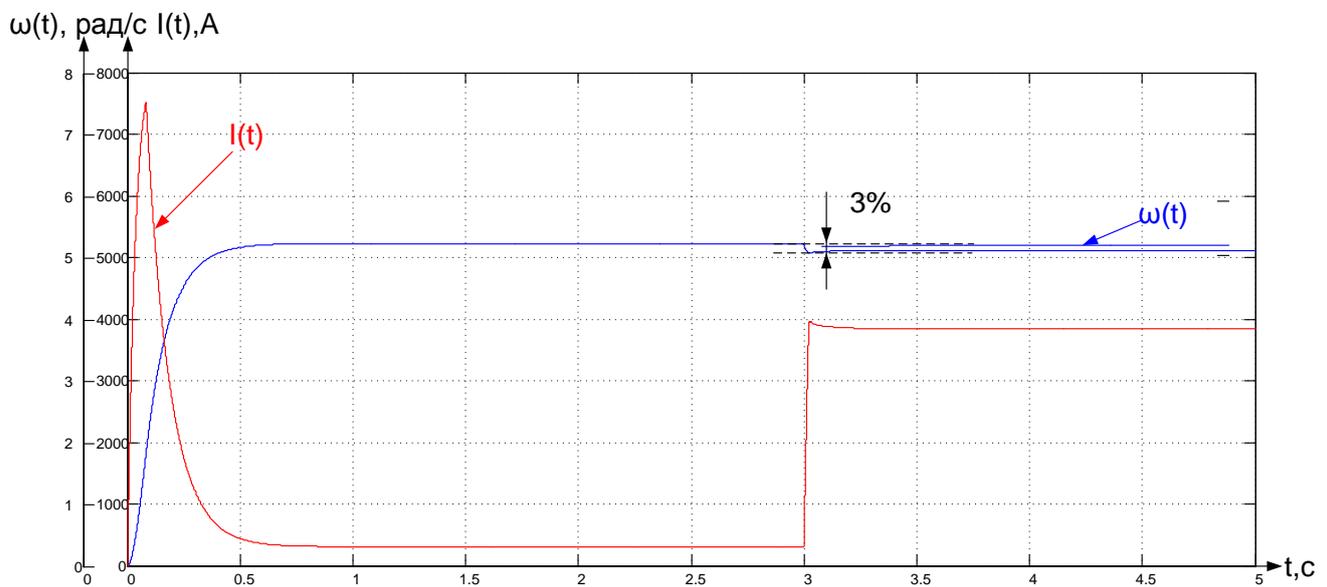


Рисунок 31. - - Пуск с нагрузкой холостого хода  $M_c = 5403 \text{ Н}\cdot\text{м}$  при  $U_{zc}=1 \text{ В}$  и наброс нагрузки через 3 секунд до момента прокатки  $M_c=62185,8 \text{ Н}\cdot\text{м}$ .

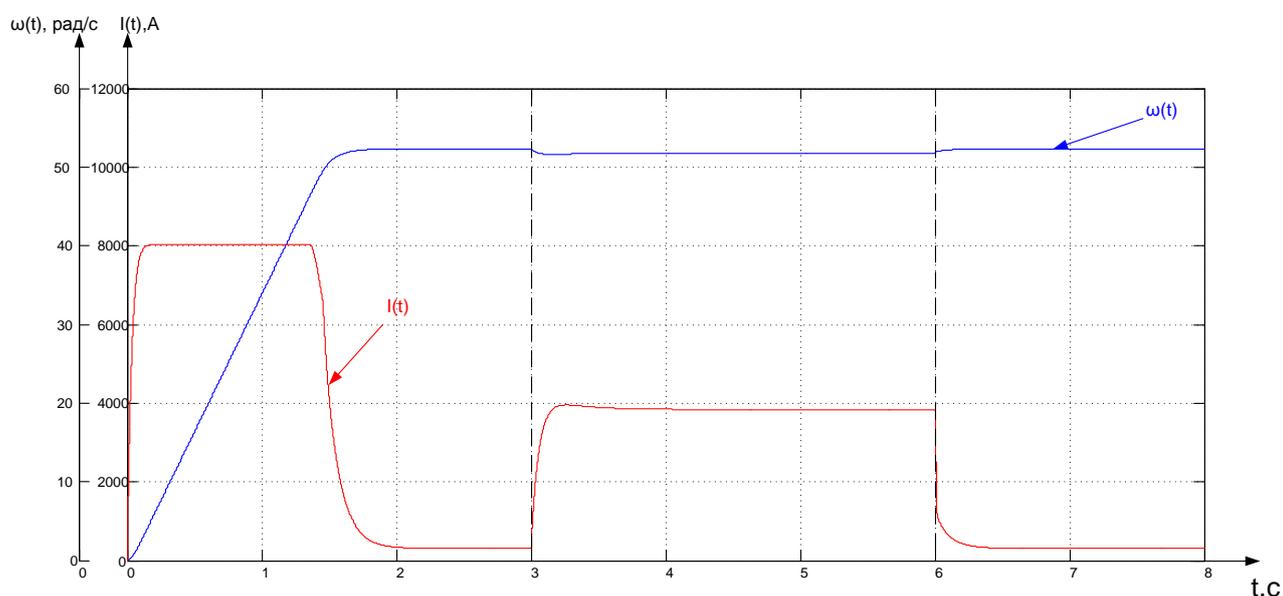


Рисунок 32. - - Пуск с нагрузкой холостого хода  $M_c = 5403 \text{ Н}\cdot\text{м}$  при  $U_{zc}=10 \text{ В}$  и наброс нагрузки через 3 секунд до момента прокатки  $M_c=62185,8 \text{ Н}\cdot\text{м}$  в 6 секунд сброс нагрузки, что соответствует окончанию прокатки.

Выводы по результатам имитационного моделирования. Электропривод хорошо управляем и в первой и во второй зоне регулирования. Быстродействие в «большом» определяется главным образом значением  $I_{эл.макс}$ . Ошибка по управлению равна нулю, а по возмущению зависит от значения  $k_{рс}$ .

#### 2.8.4 Методика анализа статических характеристик

ДПТ управляется по цепи обмотки якоря изменением напряжения, следовательно, при постоянном потоке двигателя, механические и электромеханические характеристики совпадают для различных значений ЭДС.

Предположим, что двигатель работает на характеристике с  $E_{mn1}$  и нагрузкой  $M_{c1}$  то есть, в точке  $A$ . Предположим также, что нагрузка на валу двигателя возросла и стала равной  $M_{c2}$  как показано на рисунке 33 В первый момент скорость двигателя падает. Уменьшается в этом случае и сигнал, пропорциональный ЭДС двигателя, так как

$$E_{\text{дв}} = c \cdot \omega.$$

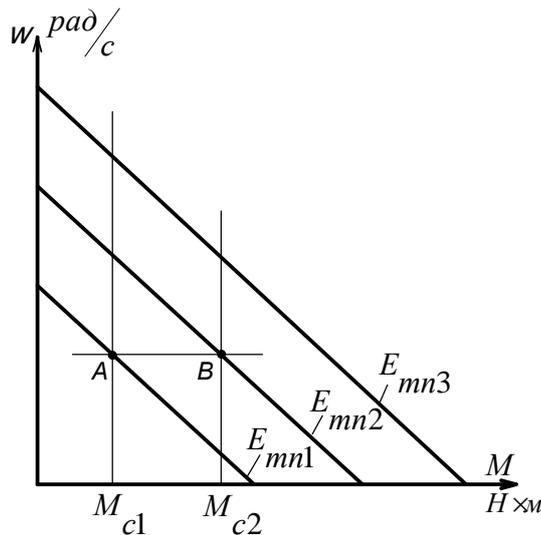


Рисунок 33 – Механические характеристики при различном напряжении на якоре

В реальном приводе сигнал, пропорциональный  $E_{\text{дв}}$  формируется более сложно с помощью датчиков тока и напряжения якорной цепи, однако в любом случае если система настроена правильно, сигнал по  $E_{\text{дв}}$  пропорционален скорости двигателя (при постоянном потоке двигателя).

Если в первом приближении не учитывать сигнал обратной связи по току  $U_{\text{ом}}$ , действующий на вход регулятора тока, то  $E_{mn}$  можно определить по формуле

$$E_{mn} = (U_{zc} - U_{oc}) \times k_{pc} \times k_{pm} \times k_{mn}.$$

Как следует из этого уравнения, уменьшение сигнала обратной связи по ЭДС приводит к увеличению ЭДС тиристорного преобразователя. Привод переходит на механическую характеристику  $E_{mn2}$  (т.е. в точку  $B$ ) и так далее. В

результате формируется характеристика замкнутой системы более жёсткая, чем характеристика разомкнутой системы.

#### 2.8.4.1 Режим стабилизации скорости

Для вывода уравнения электромеханической характеристики электропривода составим систему уравнений, которые описывают его в статике.

Структурная схема электропривода для режима стабилизации скорости приведена на рисунке 36.

$$U_{урс} = U_з - U_{ос}; \quad (1)$$

$$U_{рс} = k_{рс} \cdot U_{урс}; \quad (2)$$

$$U_{урм} = U_{рс} - U_{ом}; \quad (3)$$

$$U_{ом} = k_{ом.см} \cdot k_{ом.см} \cdot I_{mn}; \quad (4)$$

$$U_{ос} = k_{\partialс} \cdot k_{ос} \cdot \omega; \quad (5)$$

$$U_{рм} = k_{рм} \cdot U_{урм}; \quad (6)$$

$$e_{mn} = k_{mn} \cdot U_{рм}; \quad (7)$$

$$U_{mn} = e_{mn} - I_{mn} \cdot R_{mn}; \quad (8)$$

$$U_{mn} = U_{\partialв}; \quad (9)$$

$$U_{\partialв} = E_{\partialв} + I \cdot R_{\partialв}; \quad (10)$$

$$E_{\partialв} = c \cdot \omega. \quad (11)$$

$$I_{mn} = \frac{1}{2} I_{\partialв} \quad (12)$$



Так как (14) уравнение прямой, то расчет электромеханических характеристик для различных задающих напряжений  $U_{zc}$  произведем по трем точкам. Результаты расчетов сведем в таблицу 6.

Таблица 6. - Расчётные данные для построения статических характеристик

$I, A$	0	3620	8145	$\delta, \%$
$U, B$	$\omega, \text{ рад}/\text{с}$			
1	5,236	5,125	4,986	2,12
2,5	13,09	12,979	12,8402	0,848
4	20,944	20,833	20,694	0,53
8	41,888	41,777	41,638	0,265
10	52,36	52,249	52,11	0,212

По данным таблицы 6 на рисунке 35 построены электромеханические характеристики электропривода в режиме стабилизации скорости. Рассчитанные точки нанесены на графики характеристик в виде звездочек.

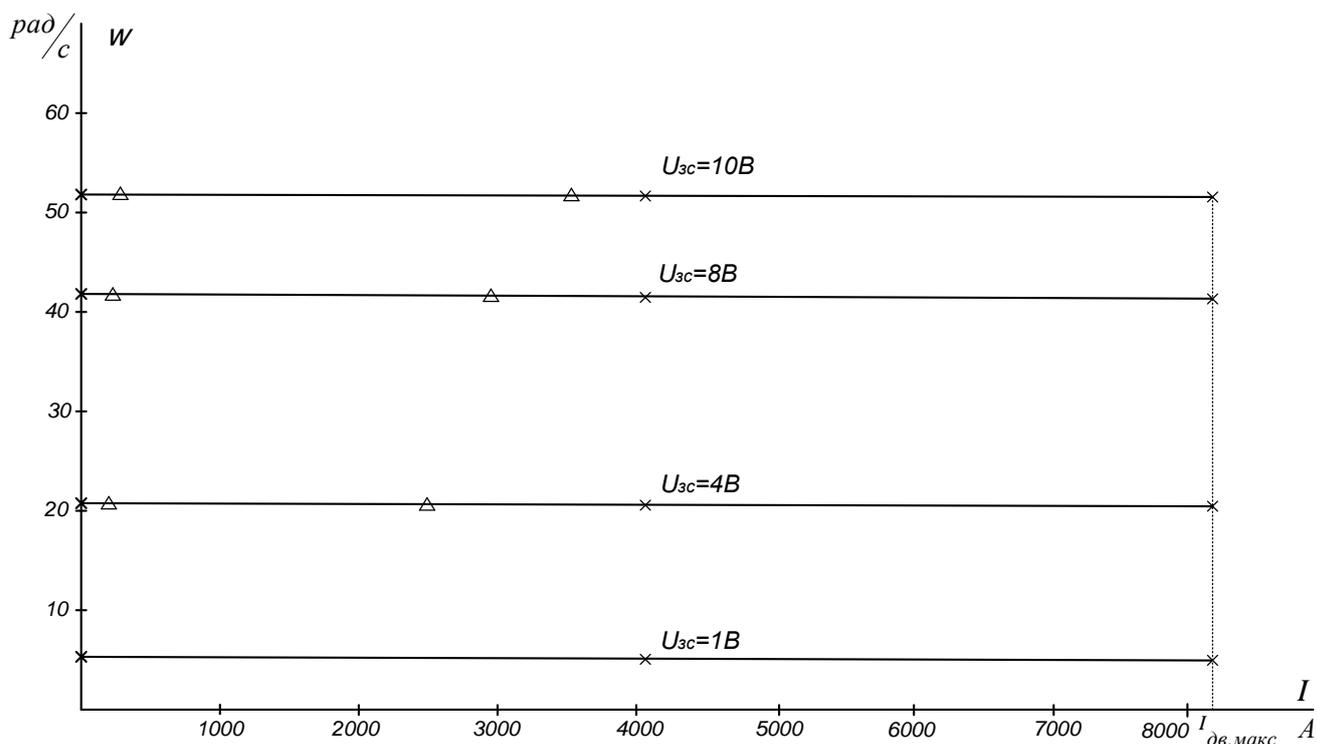


Рисунок 35 – График электромеханической характеристики

Как следует из таблицы 6 погрешность поддержания скорости на нижней регулировочной характеристике с  $U_{zc} = 1В$  составляет 2,58%, что соответствует требованиям технологического процесса прокатки металла в чистовой группе клетей и требованиям технического задания.

#### 2.8.4.2 Режим стабилизации тока

Структурную схему электропривода в режиме стабилизации составим в соответствии с функциональной схемой (рисунок 36)

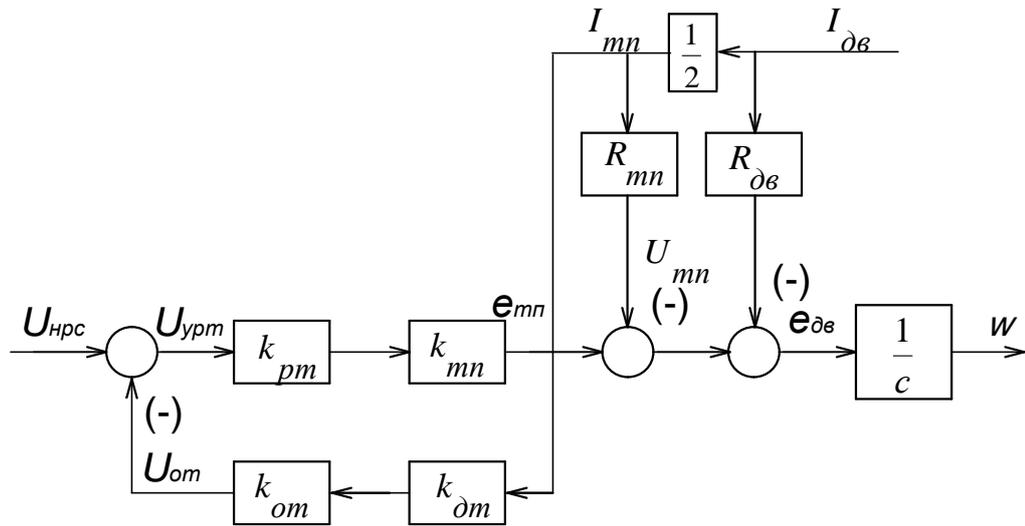


Рисунок 36 – Структурная схема электропривода в режиме стабилизации тока

Режим стабилизации тока возникает тогда, когда регулятор скорости вошёл в насыщение, и его выходное напряжение равно максимальному  $U_{pc.макс}$ .

Напряжение на входе регулятора скорости, при котором регулятор входит в насыщение, определим по формуле

$$DU_{pc} = \frac{U_{pc.нас}}{k_{pc}} = \frac{10}{210} = 0,0476B.$$

Составим систему уравнений, которые описывают электропривод в статике в режиме стабилизации тока.

$$U_{урт} = U_{pc.макс} - U_{ом}; \quad (15)$$

$$U_{ом} = k_{\delta м} \cdot k_{ом} \cdot I_{мн}; \quad (16)$$

$$U_{рм} = k_{рм} \cdot U_{урт}; \quad (17)$$

$$e_{мн} = k_{мн} \cdot U_{рм}; \quad (18)$$

$$U_{мн} = e_{мн} - I_{мн} \cdot R_{мн}; \quad (19)$$

$$U_{мн} = U_{\delta в}; \quad (20)$$

$$U_{\delta в} = e_{\delta в} + I_{\delta в} \cdot R_{\delta в}; \quad (21)$$

$$e_{\delta в} = \frac{\omega}{k_{\delta}}. \quad (22)$$

$$I_{мн} = \frac{1}{2} I_{\delta в} \quad (23)$$

Решая систему уравнений 15-23 получим уравнение электромеханической характеристики электропривода в режиме стабилизации тока

$$w = k_{\delta} \times k_{mn} \times k_{pm} \times U_{pc.max} - \frac{I_{\delta\epsilon} \times k_{\delta}}{2} (2 \times R_{\delta\epsilon} + R_{mn} + k_{mn} \times k_{pm} \times k_{\delta m} \times k_{\delta om}) \quad (24)$$

Решим (24) относительно тока якоря двигателя  $I_{\delta\epsilon}$ , получим

$$I_{\delta\epsilon} = \frac{2 \times k_{mn} \times k_{pm} \times U_{pc.max}}{2 \times R_{\delta\epsilon} + R_{mn} + k_{mn} \times k_{pm} \times k_{\delta m} \times k_{\delta om}} - \frac{2 \times w}{k_{\delta} \times (2R_{\delta\epsilon} + R_{mn} + k_{mn} \times k_{pm} \times k_{\delta m} \times k_{\delta om})} \quad (25)$$

Подставив в (25) численные значения параметров, получим

$$I_{\delta\epsilon} = \frac{2 \times 197,55 \times 10000 \times U_{pc.max}}{2 \times 0,00916 + 0,02575 + 197,55 \times 10000 \times 0,002 \times 1,23} -$$

$$- \frac{2 \times w}{0,0368 \times (2 \times 0,00916 + 0,02575 + 197,55 \times 10000 \times 0,002 \times 1,23)}$$

Или после преобразований

$$I_{\delta\epsilon} = 8144,65 - w \times 0,0112.$$

Так как (25) – уравнение прямой, то расчет электромеханической характеристики электропривода произведем по двум точкам, задаваясь значениями скорости. Результаты расчетов сведем в таблицу 7.

Таблица 7. - Результаты расчетов электромеханической характеристики при стабилизации тока

$\omega, \text{ рад/с}$	0	50
$I, A$	8144,65	8144,09

График электромеханической характеристики для режима стабилизации тока приведен на рисунке 35. Как следует из рисунка 35 ограничение тока в статике производится на уровне 8145А, что соответствует допустимому току двигателю из условия удовлетворительной коммутации

## ЗАДАНИЯ ДЛЯ РАЗДЕЛА «ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:

Группа	ФИО
3-5Г4Б2	Пардабоев Ислон Абдукаримович

Школа	Инженерная школа энергетики	Отделение	ОЭЭ
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	13.04.02 Электроэнергетика и электротехника

### Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

1. Стоимость затрат технического проекта (ТП): материально-технических, энергетических, финансовых и информационных	"Положению об оплате труда ТПУ". Приказ 25.05.2016 №5994
2. Продолжительность выполнения ТП	По приблизительной оценке, продолжительность ТП составляет 95 рабочих дня.

### Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Оценка потенциала и перспективности реализации технического проекта (ТП) с позиции ресурсоэффективности	Потенциал и перспективность реализации ТП оценивается проведением SWOT-анализа, а ресурсоэффективность ТП с помощью интегральной оценки ресурсоэффективности.
2. Планирование графика работ по реализации ТП	При использовании графика работ по реализации ТП используется оценка трудоёмкости работ для каждого исполнителя. По полученным данным составляется ленточная диаграмма Ганта.
3. Составление сметы ТП	При составлении сметы ТП используется следующая группировка затрат по статьям; - материальные затраты - полная заработная плата исполнителей - отчисления во внебюджетные страховые фонды - накладные расходы

### Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. Диаграмма Ганта

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

### Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент, отделение социально-гуманитарных наук	Мелик-Гайказян Мария Вигеновна	к.э.н., доцент		

### Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
3-5Г4Б2	Пардабоев Ислон Абдукаримович		

### **3. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ**

Целью данного раздела выпускной квалификационной работы является подтверждение целесообразности разработки технического проекта, отвечающего всем нынешним требованиям в области ресурсоэффективности и ресурсосбережения.

Достижение цели обеспечивается решением следующих задач:

- Составление SWOT-анализа электропривод горизонтальной клетки прокатного стана.
- Планирование технико-конструкторских работ.
- Определение ресурсоэффективности проекта.

#### **3.1 SWOT-анализ электропривода горизонтальной клетки прокатного стана**

SWOT-анализ является инструментом стратегического менеджмента и представляет собой комплексное исследование технического проекта [12].

Задача анализа – описать ситуацию, для решения которой нужно принять какое-либо решение.

Для проведения SWOT-анализа составляется матрица SWOT, в которую записываются слабые и сильные стороны проекта, а также возможности и угрозы.

При составлении матрицы SWOT удобно использовать следующие обозначения

*С* – сильные стороны проекта;

*Сл* – слабые стороны проекта;

*В* – возможности;

*У* – угрозы;

Матрица SWOT приведена в таблице

Таблица 7 – Составление предварительной матрицы SWOT

	<p><b>Сильные стороны проекта:</b>  <i>C1.</i> Высокий уровень защиты электрооборудования.  <i>C2.</i> Высококачественные материалы  <i>C3.</i> Высокая точность и производительность электрооборудования  <i>C4.</i> Большой межремонтный период  <i>C5.</i> Высококвалифицированный персонал</p>	<p><b>Слабые стороны проекта:</b>  <i>Сл1.</i> Высокое потребление электроэнергии  <i>Сл2.</i> Высокая цена оборудования  <i>Сл3.</i> Необходимость нахождения источника переменного тока рядом с местом работы</p>
<p><b>Возможности:</b></p> <p><i>B1.</i> Увеличение производительности электрооборудования</p> <p><i>B2.</i> Автоматизация технологического процесса</p> <p><i>B3.</i> Снижение затрат на транспортировку готовой продукции</p> <p><i>B4.</i> Снижение затрат на техническом обслуживании</p>	<p><i>B1C1C2C3C4;</i></p> <p><i>B2C1C2C4;</i></p> <p><i>B3C1C3C5;</i></p> <p><i>B4C1C2C5.</i></p>	<p><i>B1Сл1Сл2;</i></p> <p><i>B2Сл2;</i></p> <p><i>B4Сл2.</i></p>
<p><b>Угрозы:</b></p> <p><i>У1.</i> Отсутствие спроса на технологии производства</p> <p><i>У2.</i> Ограничения на экспорт оборудования</p> <p><i>У3.</i> Введения дополнительных государственных требований к стандартизации и сертификации продукции</p> <p><i>У4.</i> Угрозы выхода из строя сложного рабочего органа</p>	<p><i>У1C1C5;</i></p> <p><i>У3C1;</i></p> <p><i>У4C1C2.</i></p>	<p><i>У1Сл1Сл3;</i></p> <p><i>У4Сл1Сл3.</i></p>

На основании матрицы SWOT строятся интерактивные матрицы возможностей и угроз, позволяющие оценить эффективность проекта, а также надежность его реализации.

При построении интерактивных матриц используются обозначения аналогичные самой матрицы SWOT с дополнением знаков (+, -) для подробного представления наличия возможностей и угроз проекта («+» – сильное соответствие; «-» – слабое соответствие).

Интерактивные матрицы возможностей и угроз представлены в таблицах 7 и 8, соответственно.

Таблица 8 – Интерактивная матрица возможностей

Возможности	Сильные стороны проекта				
	<i>C1</i>	<i>C2</i>	<i>C3</i>	<i>C4</i>	<i>C5</i>
<i>B1</i>	+	+	-	+	-
<i>B2</i>	+	+	-	+	-
<i>B3</i>	+	-	+	-	+
<i>B4</i>	+	+	-	-	+
Возможности	Слабые стороны проекта				
	<i>Сл1</i>	<i>Сл2</i>	<i>Сл3</i>	-	-
<i>B1</i>	+	+	-		
<i>B2</i>	-	+	-		
<i>B3</i>	-	-	-		
<i>B4</i>	-	+	-		

Таблица 8 – Интерактивная матрица угроз

Угрозы	Сильные стороны проекта				
	<i>C1</i>	<i>C2</i>	<i>C3</i>	<i>C4</i>	<i>C5</i>
<i>У1</i>	+	-	-	-	+
<i>У2</i>	-	-	-	-	-
<i>У3</i>	+	-	-	-	-
<i>У4</i>	+	+	-	-	-
Угрозы	Слабые стороны проекта				
	<i>Сл1</i>	<i>Сл2</i>	<i>Сл3</i>	-	-
<i>У1</i>	+	-	+		
<i>У2</i>	-	-	-		
<i>У3</i>	-	-	-		
<i>У4</i>	-	+	-		

При разработке технического проекта системы электроснабжения предприятия инженер нацелен на проектирование с возможно большим внедрением сильных сторон. Это влияет, прежде всего, на качество и востребованность спроектированной системы электроснабжения, что немало важно для потребителей.

Несмотря на то, что для данного анализа сильных сторон, не исключен случай, когда какая-либо одна из слабых сторон окажется наиболее сильным

фактором, негативно влияющим на работу системы электроснабжения, чем все вместе взятые сильные стороны. Для данного случая таким фактором может быть Сл2 - «Высокая стоимость производства». К примеру, при любом проектировании систем с использованием более простых универсальных электрических и конструктивных систем внутризаводской и внутрицеховой сети всегда будет присутствовать сложность в эксплуатации, ввиду наличия высокой ответственности и сложности технической системы для персонала и для потребителей. Но именно для этого разрабатываются и совершенствуются разработки универсальных, простых и безопасных систем с использованием автоматизированного управления, что позволит нам минимизировать влияние слабых сторон.

### **3.2. Организация работ технического проекта**

Планирование комплекса предполагаемых работ осуществляется в следующем порядке:

- ¾ определение структуры работ в рамках технического проектирования;
- ¾ определение участников каждой работы;
- ¾ установление продолжительности работ;
- ¾ построение графика проведения проектирования;
- ¾

#### **3.2.1. Структура работ в рамках технического проектирования**

Для выполнения проектирования формируется рабочая группа, в состав которой входят научный руководитель и дипломник. Составлен перечень этапов и работ в рамках проведения проектирования и произведено распределение исполнителей по видам работ.

Номерам этапов соответствуют следующие виды выполняемых работ, представленные в таблице 4:

№ 1 – составление и утверждение технического задания – включает в себя изучение первичной информации об объекте, формулировку требований к техническому проекту, составление задания и плана на работу;

№ 2 – Подбор и изучение материалов по теме – ознакомление с предметом работы, изучение различных источников, касающихся различных сторон технического проекта;

№ 3 – Проведение расчетов электрических нагрузок предприятия – расчет электрических нагрузок методом упорядоченных диаграмм;

№ 4 – Проектирование системы внутризаводского электроснабжения – выбор конфигурации схемы электроснабжения, расчет суммарных электрических нагрузок, выбор высоковольтного оборудования;

№ 5 – Проектирование системы внутрицехового электроснабжения – расчет нагрузок по цеху с учетом загруженности всех электроприемников, выбор защитной аппаратуры;

№ 6 – Проведение графических построений – построение схемы внутризаводского электроснабжения с расчетом и нанесением картограммы нагрузок по заводу, построение схемы внутрицехового электроснабжения.

№ 7 – Оценка эффективности полученных результатов – проверка соответствия выполненного проекта исходным требованиям с учетом ресурсо- и энергоэффективности;

№ 8 – Составление пояснительной записки – оформление результатов проектной деятельности;

№ 9 – Проверка выпускной квалификационной работы руководителем – в рамках учебно-практической работы, включает в себя окончательную проверку руководителем и устранение недочетов дипломником.

№ 10 – Подготовка к защите ВКР – подготовка презентации и согласование с преподавателем для защиты перед аттестационной государственной комиссией.

Таблица 9– Перечень этапов работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	Научный руководитель
Выбор направления технического проектирования завода	2	Подбор и изучение материалов по теме	Дипломник
Расчеты и проектирование системы электропривода горизонтальной клетки прокатного стана	3	Проведение расчетов электрических нагрузок предприятия	Дипломник
	4	Проектирование системы внутрицехового электроснабжения	Дипломник, научный руководитель
	5	Проектирование системы внутрицехового электроснабжения	Дипломник, научный руководитель
	6	Проведение графических построений	
Обобщение и оценка результатов	7	Оценка эффективности полученных результатов	Дипломник, Научный руководитель
Оформление отчета по техническому проектированию	8	Составление пояснительной записки	Дипломник
	9	Проверка выпускной квалификационной работы руководителем	Научный руководитель
Сдача выпускной квалификационной работы	10	Подготовка к защите ВКР	Дипломник, Научный руководитель

### 3.2.2.Определение трудоемкости выполнения ТП

Трудоемкость выполнения технического проекта оценивается экспертным путем в человеко-днях и носит вероятностный характер, т.к. зависит от множества трудно учитываемых факторов. Для определения ожидаемого (среднего) значения трудоемкости  $t_{ожі}$  используется следующая формула:

$$t_{ожі} = \frac{3t_{\min i} + 2t_{\max i}}{5}$$

где  $t_{ожі}$  – ожидаемая трудоемкость выполнения  $i$ -ой работы чел.-дн.;

$t_{\min i}$  – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной  $i$ -ой работы (оптимистическая оценка: в предположении наиболее благоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.;

$t_{\max i}$  – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной  $i$ -ой работы (пессимистическая оценка: в предположении наиболее неблагоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.

### **3.2.3. Разработка графика проведения технического проекта**

Наиболее удобным и наглядным в данном случае является построение ленточного графика проведения научных работ в форме диаграммы Ганта.

Диаграмма Ганта – горизонтальный ленточный график, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ.

График строится для ожидаемого по длительности исполнения работ в рамках технического проекта, с разбивкой по месяцам и декадам за период времени подготовки ВКР . На основе таблицы 10 строим план-график проведения работ (таблица 6).

Таблица 10– Расчёт продолжительность работ рабочие дни.

№	Название работы	Трудоёмкость работ, рабочие дни					
		Минимально возможная трудоёмкость выполнения заданной i-ой работы		Максимально возможная трудоёмкость выполнения заданной i-ой работы		Ожидаемая трудоёмкость выполнения i-ой работы	
		Науч. рук-ль	Дипломник	Науч. рук-ль	Дипломник	Науч. рук-ль	Дипломник
1	Составление и утверждение технического задания	1	-	1	-	1	-
2	Подбор и изучение материалов по теме	-	2	-	5		3
3	Проведение расчетов электрических нагрузок предприятия	-	23	-	27	-	25
4	Проектирование системы внутризаводского электро-снабжения	1	21	1	25	1	23
5	Расчеты системы внутрице-хового электроснабжения	1	22	1	26	1	24
6	Проведение графических построений	-	1	-	2		2
7	Оценка эффективности полученных результатов	1	4	1	7	1	5
8	Составление пояснительной записки	-	5	-	12		8
9	Проверка выпускной квали-фикационной работы руководи-телем	1	-	1	-	1	-
10	Сдача и защита выпускной квалификационной работы	2	3	2	4	2	3

Таблица 11– Диаграмма Ганта

№	Вид работ	Исп-ли	$T_{pi}$ , раб. дн.	Продолжительность выполнения работ												
				Февр.		Март			Апрель			Май			Июнь	
				2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2
1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель	1	-												
2	Подбор и изучение материалов по теме	Дипломник	3	-												
3	Проведение расчетов электрических нагрузок предприятия	Дипломник	25	—————												
4	Проектирование системы внутризаводского электроснабжения	Руководитель	1													
		Дипломник	23				—————									
5	Расчет силовой части электроснабжения предприятия	Руководитель	1													
		Дипломник	24							—————						
6	Проведение графических построений и обоснований	Дипломник	2													
7	Оценка эффективности полученных результатов	Руководитель	1													
		Дипломник	5													
8	Составление пояснительной записки	Дипломник	8													
9	Проверка выпускной квалификационной работы руководителем	Руководитель	1													
10	Сдача и защита выпускной квалификационной работы	Руководитель	2													
		Дипломник	3													

Исходя из составленной диаграммы, можно сделать вывод, что продолжительность работ занимает 12 декад, начиная со второй декады февраля, заканчивая первой декадой июня. Продолжительность выполнения технического в календарных днях заняла 97 дней. Из них:

95 – рабочий дни у инженера дипломника

7 – рабочий дни у научного руководителя

### **3.3. Составление сметы затрат на разработку ТП**

Смета затрат включает в себя следующие статьи.

материальные затраты;

полная заработная плата исполнителей технического проекта;

отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);

накладные расходы.

#### **3.3.1. Расчет материальных затрат**

В материальные затраты включаются затраты на канцелярские принадлежности, и т.п.

Расчет материальных затрат осуществляется по следующей формуле:

$$Z_m = \sum_{i=1}^m C_i \times N_{расхi},$$

где  $m$  – количество видов материальных ресурсов;

$N_{расхi}$  – количество материальных ресурсов  $i$ -го вида, планируемых к использованию (натур.ед.);

$C_i$  – цена приобретения единицы  $i$ -го вида потребляемых материальных ресурсов (руб./натур.ед.);

Значения цен на материальные ресурсы установлены по данным, размещенным на сайте канцелярского магазина ТД „Канцелярский мир”.

Таблица 12 – Материальные затраты

Наименование	Количество	Цена за ед., руб.	Затраты на материалы, руб.
Бумага	100	2,5	250
Ручка	2	84	168
Скоросшиватель	1	82	82
Степлер	1	200	200
Флеш-карта	1	250	250
Распечатка	100	2,5	250
Итого			1200

### 3.3.2. Полной заработной платы исполнителей темы

Полная заработная плата включает основную и дополнительную заработную плату и определяется как

$$Z_{\text{полн}} = Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}, \quad (3)$$

где  $Z_{\text{осн}}$  – основная заработная плата;

$Z_{\text{доп}}$  – дополнительная заработная плата.

Основная заработная плата ( $Z_{\text{осн}}$ ) исполнителя рассчитывается исходя из трудоемкости работ и квалифицированных исполнителей по следующей формуле

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \times T_p, \quad (4)$$

где  $Z_{\text{осн}}$  – основная заработная плата одного работника;

$Z_{\text{дн}}$  – среднедневная заработная плата работника, руб.

$T_p$  – продолжительность работ, выполняемых работником, раб. дн.;

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_m}{D_{\text{мес}}}, \quad (5)$$

где:  $Z_m$  – месячный должностной оклад работника, руб.;

$D_{\text{мес}}$  – количество рабочих дней, раб. дн.

Таблица 13 – Расчёт основной заработной платы

Исполнители	Оклад	Месячный основной оклад ра- ботника руб.	Средняя заработная плата ра- ботника руб.	Продол- житель- ность ра- бот, вы- полняемых работни- ком раб. дн.	Основная заработная плата од- ного работ- ника руб.
Руководитель	33664	43764	1683	7	11781
Бакалавр	12300	16000	615	95	58425
Итого Зосн :					70206

Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы учитывают оплату при предоставлении ежегодного оплачиваемого отпуска.

Расчет дополнительной заработной платы ведется по следующей формуле:

$$Z_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} \times Z_{\text{осн}} \quad (6)$$

где  $k_{\text{доп}}$  – коэффициент дополнительной заработной платы (на стадии проектирования принимается равным 0,12 – 0,15).

Расчёт полной заработной платы приведён в таблице 14

Таблица 8 – Расчет полной заработной платы

Исполнители	коэффициент дополнитель- ной заработ- ной платы. $k_{\text{доп}}$ , руб	Основная за- работная плата одного работника $Z_{\text{осн}}$ , руб.	Дополнительная заработная плата $Z_{\text{доп}}$ , руб.	Полная за- работная плата $Z_{\text{п}}$ , руб.
Руководитель	15%	11781	1767	13500
Бакалавр	12%	60270	7011	65400
Итого:		70206	8778	78900

### 3.3.3. Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

В данной разделе расходов отражаются обязательные отчисления по установленным законодательством Российской Федерации нормам органам государственного социального страхования (ФСС), пенсионного фонда (ПФ) и медицинского страхования (ФФОМС) от затрат на оплату труда работников.

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$З_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \times (З_{\text{осн}} + З_{\text{доп}}), \quad (7)$$

где  $k_{\text{внеб}}$  – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.) [14].

На 2019 г. в соответствии с Федеральным законом от 24.07.2009 №212-ФЗ установлен размер страховых взносов равный 30,2 %.

Отчисления во внебюджетные фонды составят:

$$З_{\text{внеб}} = 0,302 \times 78,9 = 23,8 \text{ тыс.руб}$$

### 3.3.4. Накладные расходы

Накладные расходы учитывают прочие затраты организации, не попавшие в предыдущие статьи расходов: амортизация активам, расходы, связанные с рекламой и т.д. Их величина составляет 16% от общей суммы затрат на проектирование.

## 3.4. Формирование сметы затрат технического проекта

Рассчитанная величина затрат технического проекта является основой для формирования бюджета затрат проекта, который при заключении договора с заказчиком защищается организацией в качестве нижнего предела затрат на разработку технической продукции

Определение бюджета затрат на технический проект приведен в таблице

Таблица 14 – Смета затрат технического проекта

Наименование статьи	Сумма, тыс. руб.	Структура затрат %
1. Материальные затраты ТП	1,2	1,0
2. Затраты по полной заработной плате исполнителей темы	78,9	63,7
3. Отчисления во внебюджетные фонды	23,8	19,2
4. Накладные расходы	20,1	16,0
5. Итого	124,0	100,0

В ходе выполнения данного параграфа была рассчитана продолжительность выполнения технического проекта, которая составляет 95 раб. дней для инженера и 7 для руководителя. Составлен календарный график выполнения работ. Смета затрат на разработку технического проекта составляет 124 тыс.руб, из которых более половины (64%) составляют затраты на оплату труда. Все результаты проекта оказались ожидаемы и могут быть реализованы.

### 3.4.Определение ресурсоэффективности проекта

Определение ресурсоэффективности проекта можно оценить с помощью интегрального критерия ресурсоэффективности по формуле [12]:

$$I_{pi} = \sum a_i \times b_i$$

где  $I_{pi}$  – интегральный показатель ресурсоэффективности;

$a_i$  – весовой коэффициент разработки;

$b_i$  – балльная оценка разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания;

Оценку характеристик проекта проведем на основе критериев, соответствующих требованиям к системе электроснабжения промышленных предприятий:

1. Экономичность: оптимизация затрат на электрическую часть предприятия на стадии проектирования приводит к их уменьшению на доли процентов, в абсолютном же измерении речь идет об экономии значительных средств.

2. Гибкость: возможность частых перестроек технологии производства и развития предприятия.
3. Безопасность: обеспечение безопасности работ, как для электротехнического персонала, так и для не электротехнического;
4. Обеспечение надлежащего качества электроэнергии: качество электроэнергии, удовлетворяющее требованиям ГОСТ 13109-97.
5. Надежность: бесперебойное снабжение электроэнергией в пределах допустимых показателей ее качества и исключение ситуаций, опасных для людей и окружающей среды.
6. Простота и удобство в эксплуатации: возможность использования персоналом более доступного, автоматизированного и адаптивного по конструкции техническим характеристикам электрооборудования на предприятии.
7. Энергоэффективность: использование меньшего количества энергии для обеспечения установленного уровня потребления энергии в зданиях либо при технологических процессах на производстве.

Критерии ресурсоэффективности и их количественные характеристики приведены в таблице 15.

Таблица 15. - Сравнительная оценка характеристик проекта

Критерии	Весовой коэффициент	Балльная оценка разработки
1. Экономичность	0,15	4
2. Гибкость	0,10	4
3. Безопасность	0,15	5
4. Обеспечение надлежащего качества электроэнергии	0,18	5
5. Надежность	0,20	5
6. Простота и удобство в эксплуатации	0,07	5
7. Энергоэффективность	0,15	4
Итого:	1,00	

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности технического проекта составит :

$$I_{p-uch1} = 4 \times 0,15 + 4 \times 0,1 + 5 \times 0,15 + 5 \times 0,18 + 5 \times 0,2 + 5 \times 0,07 + \\ + 5 \times 0,15 + 4 \times 0,15 = 4,6$$

Показатель ресурсоэффективности проекта имеет достаточно высокое значение (по 5-балльной шкале), что говорит об эффективности использования технического проекта. Высокие баллы надежности и помехоустойчивости позволяют судить о надежности системы.

В результате выполнения поставленных задач по данному разделу, можно сделать следующие выводы:

- в результате проведения SWOT-анализа были выявлены сильные и слабые стороны выбора технического проекта. Установлено, что технический проект имеет несколько важных преимуществ, обеспечивающих повышение производительности, безопасности экономичности технического производства.

- при планировании технических работ был разработан график занятости для двух исполнителей, составлена ленточная диаграмма Ганта, позволяющая оптимально скоординировать работу исполнителя.

- составление сметы технического проекта позволило оценить первоначальную сумму затрат на реализацию технического проекта.

- оценка ресурсоэффективности проекта, проведенная по интегральному показателю, дала высокий результат (4,6 по 5-балльной шкале), что говорит об эффективности реализации технического проекта.

Реализация данного технического проекта, позволяет увеличить эффективность производств путем улучшения энергоэффективности, энергосбережения при внедрении более универсального оборудования, требующего меньше затрат.

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
3-5Г4Б2	Пардабоев Ислом Абдукаримович

<b>Школа</b>	Инженерная школа энергетиков (ИШЭ)	<b>Отделение</b>	<b>ОЭЭ</b>
<b>Уровень образования</b>	Бакалавриат	<b>Направление/специальность</b>	13.04.02 Электроэнергетика и электротехника

### Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»

<p>1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения</p>	<p>Электропривод горизонтальной клетки прокатного стана, применяется конечным для металлургических предприятий и исходным в машиностроении, строительстве и других отраслей народного хозяйство.</p>
---	--

### Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<p><b>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</b></p>	<p>1. Случаи представления гарантий и компенсаций (в соответствии со ст. 165 ТК РФ); Рассмотреть специальные правовые нормы трудового законодательства; организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.</p>
<p><b>2. Производственная безопасность</b></p>	<p>Проанализировать потенциально возможные вредные и опасные факторы при разработке и эксплуатации электропривод горизонтальной клетки прокатного стана</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Разработать мероприятия по снижению возможных вредных и опасных факторов.</li> <li>2. повышенный уровень шума на рабочих места</li> <li>3. неудовлетворительные освещения</li> <li>4. запыленность</li> <li>5. Механические травмы;</li> <li>6. Поражение электрическим током.</li> </ol>

<b>3. Экологическая безопасность:</b>	<p>1. Анализ воздействия объекта на гидросферу (выбросы теплоты в водоемы, изменение условий ледостава и зимнего гидрологического режима).</p> <p>2. Анализ воздействия на литосферу: образование отходов, связанных с заменой комплектующих разрабатываемого оборудования, образование золотвалов.</p>
<b>4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Анализ возможных ЧС при разработке и эксплуатации проектируемого решения;</li> <li>- выбор наиболее типичной ЧС;</li> <li>- разработка превентивных мер по предупреждению ЧС;</li> <li>- разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий.</li> </ul> <p>Пожаровзрывоопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения)</p>

<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>	
---	--

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ст. Преподаватель	Гуляев Милий Всеволодович			

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
3-5Г4Б2	Пардабоев Ислон Абдукаримович		

## **4.СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ**

### **Введение**

Целью данной части выпускной квалификационной работы является выявление основных опасных и вредных производственных факторов при наладке главного электропривода прокатной клетки, создание мероприятий по недопущению опасных факторов и уменьшение влияния вредных факторов производства. Технологический процесс получения готового проката является завершающей стадией металлургического производства. Через прокатные цехи проходит почти вся сталь, выплавляемая в сталеплавильных цехах. Исходным материалом для прокатного производства являются слитки и литые заготовки, имеющие поперечное сечение квадратной или прямоугольной формы, а также круглой формы (при производстве труб, колес и бандажей).

Меры безопасности в прокатных цехах во многом зависят не только от конструкции прокатных станов, но и от сортамента прокатываемого металла, особенно на участках последующей обработки и складирования. Число операций, входящих в технологический процесс прокатки, зависит от требований, предъявляемых к точности профиля, физико-механическим свойствам, состоянию поверхности, макро и микроструктуре. Чем выше эти требования, тем сложнее и из большего числа операций состоит технологический процесс, а, следовательно, больший комплекс мер требуется для создания здоровых и безопасных условий труда.

### **4.1.Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности**

На комбинате оборудованы санитарные посты, укомплектованные аптеками, медикаментами, носилками и другими средствами для оказания первой медицинской до врачебной помощи пострадавшим.

Питьевой режим людей, работающих в производственных помещениях цеха, организован в соответствии с требованием санитарных норм.

Прием пищи производится только в столовых, буфетах или специально выделенных для этого помещениях. Прием пищи на рабочих местах запрещен. Отопление, вентиляция или кондиционирование воздуха производственных помещений цеха соответствует требованиям санитарии нормы.

В процессе производства обеспечивается непрерывная работа всех precisely-вытяжных и аспирационных, вентиляционных установок.

Общепризнанно, что все современные технические системы не являются абсолютно безопасными. Объективно они всегда потенциально опасны, так как в них происходят процессы (явления) и содержатся объекты, способные в определенных условиях нанести ущерб (вред) здоровью человека и даже лишить его жизни. Данные процессы и объекты, действующие на организм человека непосредственно или косвенно, принято называть опасными и вредными факторами. Эти факторы действуют во внешне определенной области пространства, которую называют опасной зоной.

Нахождение человека в данной зоне и нарушение им правил безопасности может привести к несчастным случаям, т.е. травме, аварии, катастрофе. Опасность может быть оценена количественно, например, величиной риска. Риск понимается как возможность (вероятность) возникновения нежелательного события за определенный отрезок времени. Величина риска и обратная величина —уровень безопасности — зависят от конкретных условий и обстоятельств, в которых протекает жизнь и деятельность человека, а также от его психофизиологических свойств, определяющих его поведение при нахождении в опасной зоне.

Риск в производственной среде определяется прежде всего техническими факторами: устойчивостью работы машин, оборудования, инструментов, приспособлений, а также методами технологии и организации производства, условиями микроклимата на рабочем месте. Именно эти факторы при неблагоприятном стечении обстоятельств становятся вредными и опасными для работников, приводящими к травмам, заболеваниям, а также к летальному исходу.

## **4.2.Производственная безопасность**

### **4.2.1 Анализ опасных и вредных производственных факторов**

#### ***Опасные факторы при наладке электропривода***

К опасным факторам производства относятся такие факторы, которые могут привести при не соблюдении правил техники безопасности к физическим травмам, а также к смертельным случаям. К опасным факторам при наладке электропривода прокатной клетки относятся:

1. Наличие движущихся агрегатов и механизмов.
2. Наличие высокого напряжения.

### **4.2.2. Электробезопасность:**

Для предотвращения поражения электрическим током, где размещаются рабочее место, оборудование должно быть оснащено защитным заземлением, занулением в соответствии с техническими требованиями по эксплуатации[16]. Для предупреждения электротравматизма необходимо проводить соответствующие организационные и технические мероприятия: 1) оформление работы нарядом или устным распоряжением; 2) проведение инструктажей и допуск к работе; 3) надзор во время работы. Уровень напряжения для питания ЭВМ в данной аудитории 220 В, для серверного оборудования 380 В. По опасности поражения электрическим током помещение – помещения без повышенной опасности (сухое, хорошо отапливаемое, помещение с токонепроводящими полами, с температурой 18-20°, с влажностью 40-50%) [16].

Основными непосредственными причинами электротравматизма, являются: 1) прикосновение к токоведущим частям электроустановки, находящейся под напряжением; 2) прикосновение к металлическим конструкциям электроустановок, находящимся под напряжением; 3) ошибочное включение электроустановки или несогласованных действий обслуживающего персонала; 4) поражение шаговым напряжением и др.

Основными техническими средствами защиты, согласно ПУЭ, являются защитное заземление, автоматическое отключение питания, устройства защитного отключения, изолирующие электрозащитные средства, знаки и плакаты безопасности. Наличие таких средств защиты предусмотрено в рабочей зоне. В целях профилактики периодически проводится инструктаж работников по технике безопасности.

Не следует размещать рабочие места вблизи силовых кабелей, технологического оборудования, создающего помехи в работе [4].

### Вредные факторы

К вредным факторам при наладке электропривода относятся:

1. Производственный шум – от работы различных механизмов, шум трансформатора, шум работающих кранов.
2. Загазованность – вредные газы при работе с паяльником, общецеховая загазованность.
3. Запыленность.
4. Тепловое излучение.
5. Электромагнитное излучение.

Потенциально возможная ОВПФ сведены в таблице №-1

Фактор	Нормы
Повышенная запыленность и загазованность воздуха рабочей зоны.	В машинном зале (где производится наладка ЭП) применяется приточная и вытяжная вентиляция. Концентрация производственной пыли на рабочих местах не превышает, установленной ПДК – 0,4 мг/м <sup>3</sup> и составляет 0,32 мг/м <sup>3</sup> .
Повышенный уровень шума на рабочих местах.	На рабочих местах, где производится наладка ЭП, уровень шума не превышает ПДУ – 85 дБА[17]

Отсутствие или недостаток естественного света, недостаток освещенности рабочей зоны.	В пролетах цеха – общее освещение, естественное и искусственное верхнее. При наладке используется дополнительное местное освещение. Общее освещение составляет 260 Люкс (по нормам не менее 200 лк). [6]
Движущиеся машины, механизмы, незащищенные элементы производственного оборудования, передвигающиеся заготовки.	Входы на подкрановые пути ограждены, на лестницах повешены плакаты «Вход без наряда-допуска воспрещен». Муфты механизмов ограждены кожухами. Для прохода оборудованы пешеходными мостиками с перильным ограждением.

### 4.3. Экологическая безопасность

По валовым выделениям пыли и образованию газов прокатное производство относится к наименее тяжелым участкам металлургического производства. Нагрев и горячая прокатка слитков способствует образованию значительного количества окалины. Технологический процесс связан с применением большого количества воды для смыва и транспортировки окалины, охлаждения прокатных валков, роликов рольгангов и проводковой арматуры. Высокая степень механизации технологического процесса требует применения в большом количестве масел и смазок.

Технология нагрева и прокатки слитков включает в себя отходы производства, воздействующие на окружающую среду:

- дымовые газы, сварочный шлак, окалину и пыль в отделении нагревательных колодцев;
- окалину и пыль на стане 1250;
- обрезь на ножницах горячей резки блюминга 1250 и НЗС;
- обрезь, окалину и пыль на адьюстаже при порезке и обработке заготовок ручными резаками и на шлифовально-обдирочных станках;

- воду с примесями окалины, масел и смазок по линии прокатки на блюминге 1250, НЗС и склада горячих заготовок.

В цехе установлена одна газоочистная и пять пылеулавливающих установок. В период неблагоприятных метеоусловий производить внеплановый осмотр технического состояния всех газо- и пылеулавливающих установок с устранением выявленных отклонений от правил технической эксплуатации. В это время запрещается чистка пылеулавливающих установок, разведение костров, задымляющих территорию цеха.

Температура, влажность, скорость движения воздуха и содержание вредных веществ в воздухе рабочей зоны производственных помещений обжимного цеха соответствует

В процессе производства обеспечивается непрерывная работа всех приточно-вытяжных и аспирационных, вентиляционных установок.

В производственных помещениях предусмотрено рабочее и аварийное освещение в соответствии с требованиями санитария нормы.

#### **4.4.Безопасность в чрезвычайных ситуациях**

К источникам пожаров в прокатном цехе можно отнести:

1. Наличие широко развитой сети кабельного хозяйства, в котором все кабели горючие;
2. Наличие большого количества масла в маслоподвалах;
3. Наличие сети масляных гидроприводов, в которых постоянно поддерживается избыточное давление  $20 \text{ Мпа}$ ;
4. Использование горючих газов в нагревательных печах;
5. Наличие в применяемом электрооборудовании горючих изоляционных материалов (изоляция обмоток электрических машин, трансформаторов, различных электромагнитов);
6. Коммутационные аппараты и плавкие предохранители.

Причины, которые могут привести за собой возгорание различных предметов, заключены в следующем:

1. Нарушение нормальной работы машин и механизмов;
2. Перегрузки электрических сетей;
3. Нарушение правил пожарной безопасности.

В целях предотвращения пожара предусматривают следующие меры:

- Предотвращение образования горючей среды;
- Предотвращение образования в горючей среде или внесения в нее источников зажигания;
- Поддержание температуры и давления горючей среды ниже максимально допустимых по горючести;
- Уменьшение определяющего размера горючей среды ниже максимально допустимого по горючести;

Система пожарной защиты предусматривает следующие меры:

1. Максимально возможное применение негорючих и трудногорючих веществ и материалов в производственных процессах;
2. Ограничение количества горючих веществ и их надлежащее размещение;
3. Изоляцию горючей среды;
4. Предотвращение распространения пожара за пределы очага;
5. Применение средств пожаротушения;
6. Применение конструкций производственных объектов с регламентированным пределом их огнестойкости и горючести;
7. Эвакуацию людей в случае пожара;
8. Применение средств пожарной сигнализации и средств извещения о пожаре;
9. Применение средств коллективной и индивидуальной защиты от огня;
10. Организацию пожарной охраны объекта.

Организационными мероприятиями по обеспечению пожарной безопасности являются обучение рабочих и служащих правилам безопасности, разра-

ботка и реализация норм правил пожарной безопасности, инструкций о порядке работы с пожароопасными веществами и материалами, изготовление и применение средств наглядной агитации по обеспечению пожарной безопасности.

К первичным средствам тушения пожаров относятся: вода, песок, брезентовые накидки, огнетушители ОУ-3, ОП-3. Принцип тушения этими средствами основан на перекрытии доступа воздуха в очаг пожара.

#### **4.4.1 Чрезвычайные ситуации**

Наибольшую опасность для жизнедеятельности производственного персонала представляют аварии и катастрофы технических систем. Под аварией понимают непредвиденную внезапную остановку или нарушение нормальной (штатной) работы производственного (технологического) процесса. Как правило, авария сопровождается повреждением или уничтожением техники и других материальных ценностей, а также травматизмом работников технических систем и случайно оказавшихся на месте аварии других людей. Следствием аварий могут быть пожары и взрывы, которые усугубляют их негативное воздействие на безопасность людей и окружающей среды. Катастрофой называют внезапное бедствие, событие в технической системе или природной среде, влекущее за собой трагические последствия — разрушение зданий, сооружений и других компонентов технических систем, уничтожение материальных ценностей и гибель людей. Катастрофы и аварии, как правило, сопровождаются пожарами и взрывами, затрудняющими оказание помощи пострадавшим и ликвидацию последствий этих чрезвычайных происшествий.

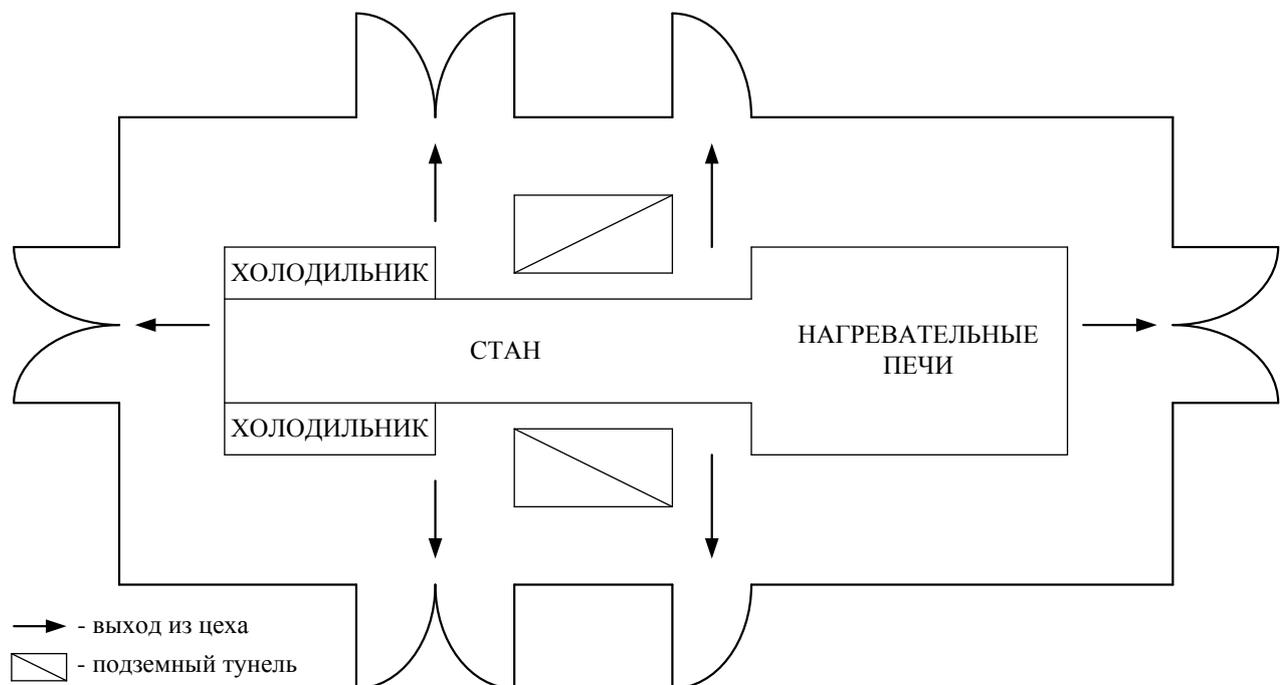


Рисунок 37 – План эвакуации

Причинами аварий и катастроф могут являться стихийные бедствия, нарушения режимов технологических процессов (несоблюдение технологической дисциплины) либо правил эксплуатации производственного, энергетического, транспортного и др. оборудования, а также правил техники безопасности. Особо тяжкие последствия имеют аварии и катастрофы на предприятиях атомной, химической, газовой, горнодобывающей промышленности, на железнодорожном, автомобильном, воздушном и водном транспорте. Такие аварии и катастрофы зачастую оказывают губительное влияние не только на людей, но и на природную среду, вызывая загазованность атмосферы, разливы на суше и воде нефти, нефтепродуктов, агрессивных жидкостей, сильнодействующих ядовитых веществ (СДЯВ), выбросы радионуклидов.

Большое значение для снижения аварий в производственной среде имеет повышение надежности технических систем. Надежность техники и технологии определяется безотказной, безаварийной работой в течение определенного отрезка времени, например, гарантийного срока. Обеспечение надежности технических систем закладывается еще при их проектировании, контролируется при изготовлении и эксплуатации.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Целью данной выпускной квалификационной работы является подтверждающий расчет существующего оборудования главного электропривода горизонтальной клетки обжимного цеха непрерывно заготовочного стана.

В систему автоматического управления главного электропривода горизонтальной клетки входят: электродвигательная, преобразовательная, передаточная и управляющая системы, вместе представляющие сложную электро-механическую структуру. Кроме того, на характер работы этой системы оказывает существенное влияние специфика прокатного производства, что дополнительно представляет целый ряд требований к системе электропривода горизонтальной клетки.

В результате выполненного нами проекта спроектирован электропривод, полностью отвечающий требованиям технического задания и всем указанным выше особенностям. Так, электромеханические характеристики электропривода, ограниченные значениями  $\omega = \omega_{\text{эл.макс}}$  и  $I = I_{\text{эл.макс}}$ , удовлетворяют номинальным значениям области существования характеристик, проектируемой системы преобразователь – двигатель.

Статические характеристики привода, при настройке на П-регулятор скорости, ПИ-регулятор тока якоря, тока возбуждения и ЭДС двигателя удовлетворяют заданным условиям: погрешность поддержания максимальной скорости ( $\Delta\omega = 0,212 \%$ ); погрешность поддержания минимальной скорости ( $\Delta\omega = 2,12 \%$ ).

При исследовании логарифмических амплитудных частотных и фазочастотных характеристик замкнутого контуров скорости, спроектированная САУ РЕП обеспечивает необходимую, полосу пропускания по модулю ( $f_m=47,65 \text{ Гц}$ ) и по фазе ( $f_\phi = 33,36 \text{ Гц}$ ). При исследовании переходных процессов, динамические показатели качества САУ РЭП во всем диапазоне регули-

рования скорости полностью удовлетворяют требованиям технического задания. Время пуска электропривода до максимальной рабочей скорости составляет  $t_n=5$  с при перерегулировании  $\sigma < 1$  %.

Электропривод горизонтальной клетки, кроме того, снабжён системой защиты и сигнализации, обеспечивающей безаварийную и безопасную работу.

В разделе «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» выполнен технический проект и решены следующие задачи:

- в результате проведения SWOT-анализа были выявлены сильные и слабые стороны выбора технического проекта. Установлено, что технический проект имеет несколько важных преимуществ, обеспечивающих повышение производительности, безопасности экономичности технического производства.

- при планировании технических работ был разработан график занятости для двух исполнителей, составлена ленточная диаграмма Ганта, позволяющая оптимально скоординировать работу исполнителя.

- составление сметы технического проекта позволило оценить первоначальную сумму затрат на реализацию технического проекта.

- оценка ресурсоэффективности проекта, проведенная по интегральному показателю, дала высокий результат (4,6 по 5-балльной шкале), что говорит об эффективности реализации технического проекта.

В разделе «Социальная ответственность» мы рассмотрели вредные и опасные факторы, угрожающие обслуживающему электротехническому персоналу. В соответствии с этим разработаны меры техники безопасности, производственной санитарии и пожарной безопасности.

## Список использованных источников

1. Копылов В.П. Справочник по электрическим машинам. Том 1. – М.: Энергоатомиздат, 1982.
2. Удут Л.С., Мальцева О.П., Коянин Н.В. Проектирование автоматизированных электроприводов постоянного тока. Учебное пособие. – Томск, 1991.
3. Справочник по комплектным тиристорным электроприводам. Под ред. Перельмутера В.М. – М.: Энергоатомиздат, 1988.
4. Бычков. В.П. Электропривод и автоматизация металлургических производств. – М.: Высшая школа, 1977.
5. Королев А.А. Конструкция и расчет машин и механизмов прокатных станов. – М.: Металлургия, 1969.
6. Башарин А.В., Новиков В.А., Соколовский Г.Г. Управление электроприводами энергоиздат, 1982.
7. Зимин Е.Н., Яковлев В.И. Автоматическое управление электроприводами. – М.: Высшая школа, 1979.
8. Межотраслевые правила по охране труда при эксплуатации электроустановок. – Спб.: Издательство ДЕАН, 2001.
9. Правила эксплуатации электроустановок потребителей. – Челябинск, 1998.
10. Кузьмина Е.А, Кузьмин А.М. Методы поиска новых идей и решений "Методы менеджмента качества" №1 2003 г.
11. Кузьмина Е.А, Кузьмин А.М. Функционально-стоимостный анализ. Экскурс в историю. "Методы менеджмента качества" №7 2002 г.
12. Коршунова Л. А., Кузьмина Н. Г. Технико-экономическое обоснование инновационного проекта. Методические указания по выполнению экономического раздела ВКР для студентов энергетических специальностей всех форм обучения. – Томск: Изд-во ТПУ, 2012.
13. Скворцов Ю.В. Организационно-экономические вопросы в дипломном проектировании: Учебное пособие. – М.: Высшая школа, 2006. – 399 с.

## THE CONCLUSION

The object of this present qualification work is designing and working out of the electro-conductive of looming scissors in the squeezing department of the continuous-preparing mill OAO «ZSMK».

The system of automatic control of the electro-conductive of looming scissors is consist of: electro motion, transformation, transmission and controlling systems, which all together is present the completed electromechanical structure. Besides, the specific rolling production is exert influence on the character of the work of this system, which in addition is produce the series of demands in system of the electro-conductive of looming scissors.

As the results of this project the electro-conductive were a demand, which is meet task and all the peculiarities in, aforesaid. So, the electromechanical characteristics of limited by the meating  $\omega = \omega_{\text{эн.макс}}$  and  $I = I_{\text{эн.макс}}$ , is satisfy to nominal meatings of the field of existence characteristics and the system «transformer-motor that we have designing.

The statistical characteristics of conductive, when its tunes on the P-regulator of current are satisfy by setting conditions: the error to supporting of maximal speed ( $\Delta\omega=0,212\%$ ); the error to supporting of minimal speed ( $\Delta\omega=2,12\%$ ).

The designing SAU REP is provide necessary stock of stability ( $\Delta\varphi=40^\circ$ ), the zone of the module skipping ( $f_M=47,65 \text{ Gts}$ ), and of the fase ( $f_f=33,36 \text{ Gts}$ ), when we are investigating the logarithmical amplitude frequency and fasefrequency characteristics of the broken and closed contours of speed (EDS). The dynamical reading of quality by SAU REP in all diapason of regulation speed are satisfy completely by demands of technical task, when we are investigating the pasager processes. The time of setting in motion the electro-conductive to maximal working speed is:  $t_n=5 \text{ s}$ , with deregulation  $\sigma < 1 \%$ .

The electro-conductive of looming scissors is supply with system of defenses and signaling, which is providing with unrepair, and foolproof work.

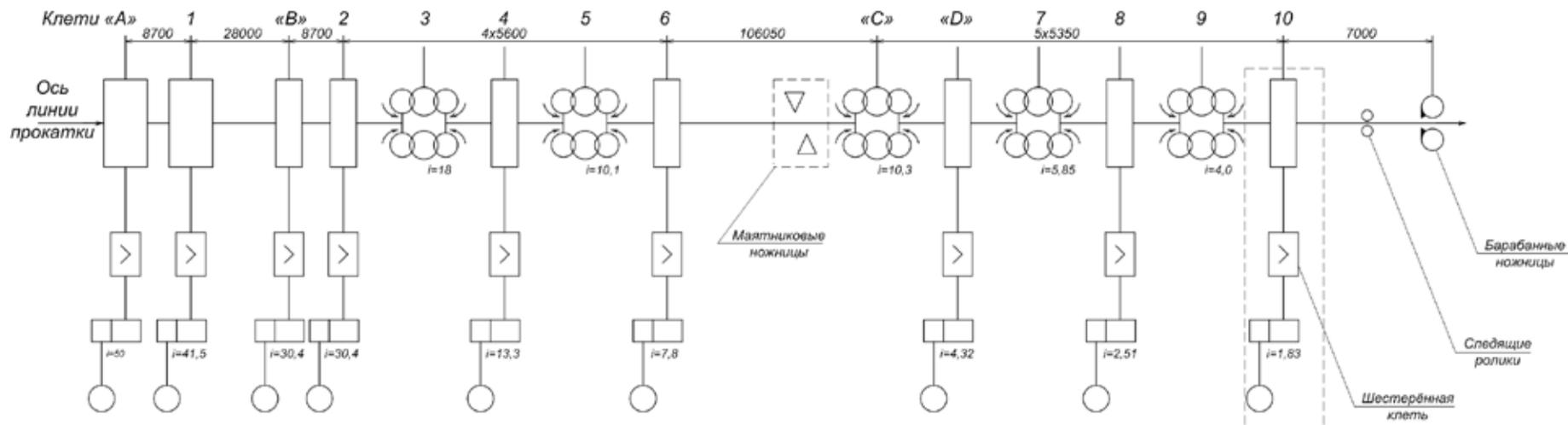
In the economic part of this present qualification work was considered the questions about the planning, financing and caring out of the starting works of the electro-conductive of looming scissors. The system of caring out of PNR is composed.

In the part of foolproof in life of this project we was considered the harmful and dangerous factors, which is threaten by service electro technical personnel. The measures of the technical foolproof, production attendantion and fire-foolproof was worked out.

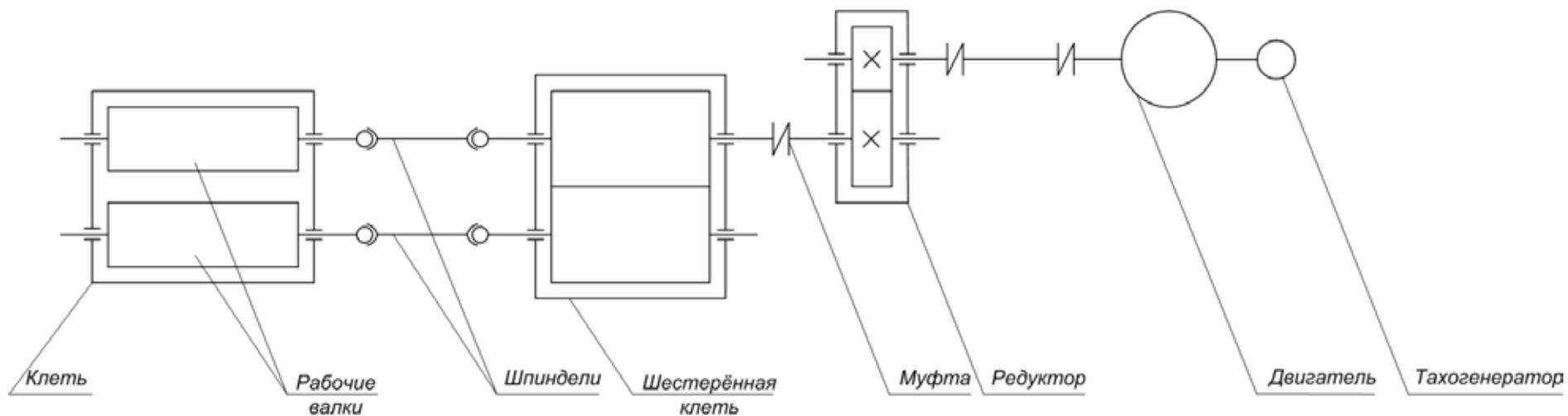
## **ПРИЛОЖЕНИЕ А**

Графический материал

## Схема непрерывно-заготовочного стана

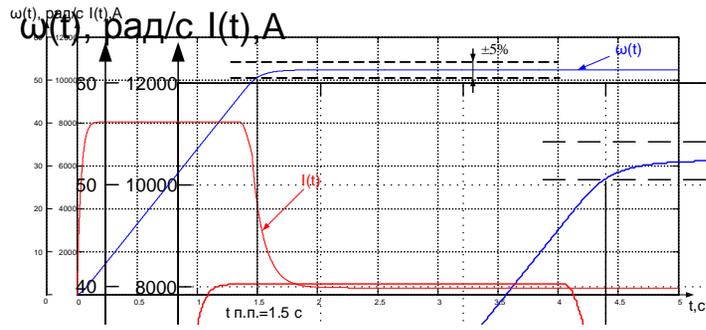


## Кинематическая схема общего вида электропривода клетки №10

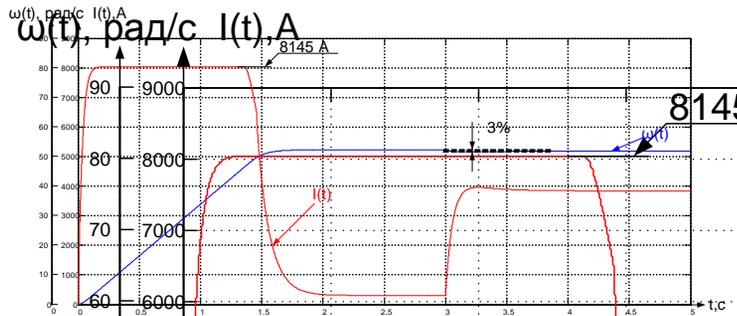




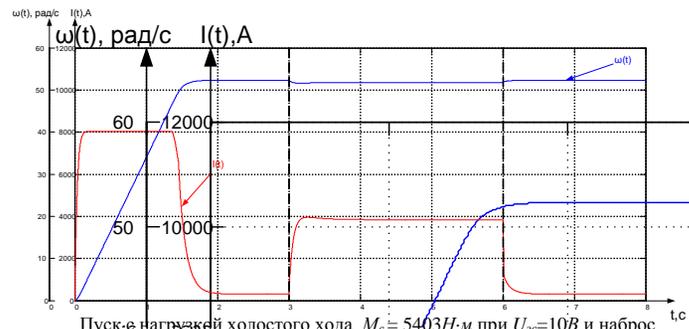




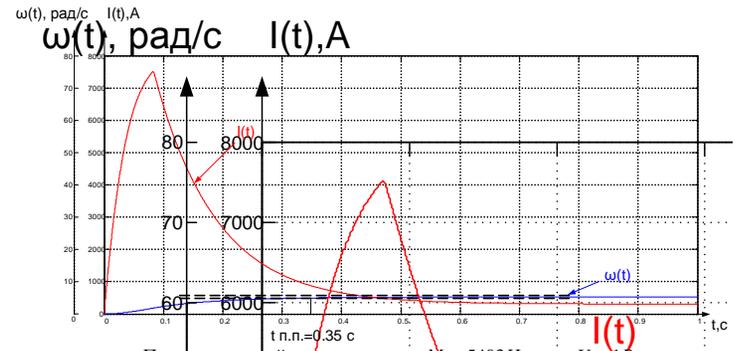
Пуск с нагрузкой холостого хода  $M_c = 5403H\cdot m$  при  $U_{sc}=10V$ .



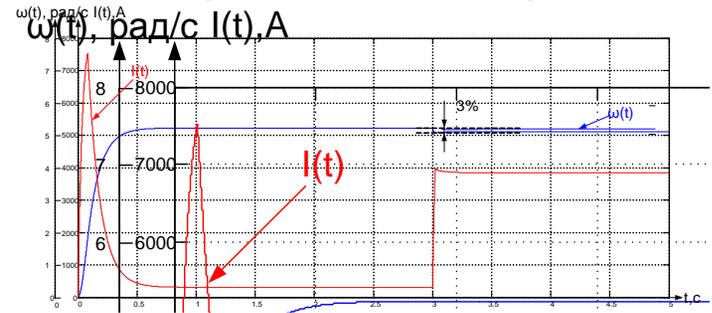
Пуск с нагрузкой холостого хода  $M_c = 5403H\cdot m$  при  $U_{sc}=10V$  и наброс нагрузки через 3 секунд до момента прокатки  $M_c=62185,8H\cdot m$ .



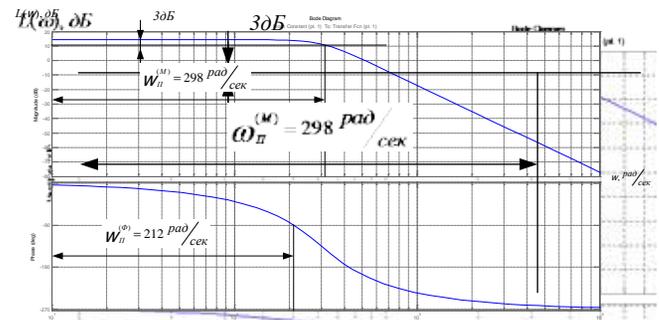
Пуск с нагрузкой холостого хода  $M_c = 5403H\cdot m$  при  $U_{sc}=10V$  и наброс нагрузки через 3 секунд до момента прокатки  $M_c=62185,8H\cdot m$  в 6 секунд сброс нагрузки, что соответствует окончанию прокатки.



Пуск с нагрузкой холостого хода  $M_c = 5403H\cdot m$  при  $U_{sc}=1B$ .



Пуск с нагрузкой холостого хода  $M_c = 5403H\cdot m$  при  $U_{sc}=1B$  и наброс нагрузки через 3 секунд до момента прокатки  $M_c=62185,8H\cdot m$ .



ЛЧХ замкнутого контура скорости