

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
Асинхронный электропривод вентилятора котла

УДК 62-83-523:697.32:697.9

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
3-5Г4Б1	Романов Павел Владимирович		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Каракулов А.С.	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
Р 1	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> .
Р 2	Уметь формулировать задачи в области <i>электроэнергетики и электротехники</i> , анализировать и решать их с использованием всех требуемых и доступных ресурсов.
Р 3	Уметь проектировать <i>электроэнергетические и электротехнические системы и их компоненты</i> .
Р 4	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.
Р 5	Применять современные методы и инструменты практической инженерной деятельности при решении задач в области <i>электроэнергетики и электротехники</i> .
Р 6	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.
Р 7	Использовать знания в области менеджмента для управления комплексной инженерной деятельностью в области <i>электроэнергетики и электротехники</i>
Р 8	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> .
Р 9	Эффективно работать индивидуально и в качестве члена или лидера команды, в том числе междисциплинарной, в области <i>электроэнергетики и электротехники</i> .
Р 10	Проявлять личную ответственность и приверженность нормам профессиональной этики и нормам ведения комплексной инженерной деятельности.
Р 11	Осуществлять комплексную инженерную деятельность в области <i>электроэнергетики и электротехники</i> с учетом правовых и культурных аспектов, вопросов охраны здоровья и безопасности жизнедеятельности.
Р 12	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. Иващутенко

(Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Бакалаврской работы

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

Студенту:

Группа	ФИО
3-5Г4Б1	Романову Павлу Владимировичу

Тема работы:

Асинхронный электропривод вентилятора котла

Утверждена приказом директора (дата, номер)	№ 3483/с от 06.05.2019г.
---	--------------------------

Срок сдачи студентом выполненной работы:	31.05.2019г.
--	--------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	Материалы преддипломной практики, техническая литература, техническая документация.
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	введение; описание технологического процесса; обоснование и выбор системы электропривода; выбор элементов и расчет параметров силового канала регулируемого электропривода; расчет статических и динамических характеристик; безопасность и экологичность проекта; экономическая часть; заключение.

Перечень графического материала	Функциональная схема Схема электрическая структурная. Имитационная модель электропривода Динамические характеристики электропривода Статические характеристики электродвигателя и электропривода Технико-экономические показатели.
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	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	05.04.2019г.
---	--------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Каракулов А.С.	к.т.н.		05.04.2019г.

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
3-5Г4Б1	Романов Павел Владимирович		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 энергетики

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:	31.05.2019г.
--	--------------

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	Каракулов А.С.	к.т.н.		

СОГЛАСОВАНО:

И. о. руководителя ОЭЭ ИШЭ

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Ивашутенко А.С.	к.т.н.		

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ

Разработать регулируемый асинхронный частотно-регулируемый электропривод вентилятора котла БЭМ-25/4,0-380Г, удовлетворяющий следующим техническим требованиям и характеристикам.

1. Режим работы – продолжительный, нагрузка реактивная.
2. Электропривод нереверсивный, диапазон регулирования в рабочей зоне $D=1:10$, при плавном регулировании скорости в указанном диапазоне.
3. Погрешность поддержания заданной скорости вращения на нижней рабочей скорости не более 5 % .
4. Управление электроприводом – ручное, с пульта управления обслуживающим персоналом, в автоматизированном режиме поддержания давления с возможностью интеграции в систему управления более высокого уровня.
5. Электродвигатель должен быть предназначен для работы в условиях повышенной температуры, иметь закрытое исполнение со степенью защиты не ниже IP54.
6. Преобразователь должен быть предназначен для работы в закрытых стационарных помещениях при температуре окружающего воздуха от 5° до 45°С и относительной влажности не более 80% .
7. Система управления электроприводом должна обеспечивать надежную защиту от перегрузок и аварий, простоту управления и обслуживания.
8. Сеть трёхфазная, $380 \pm 10\%$ В, 50 ± 1 Гц.

РЕФЕРАТ

ДУТЬЕВОЙ ВЕНТИЛЯТОР, АСИНХРОННЫЙ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД, ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЧАСТОТЫ, СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ, СТАТИЧЕСКИЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ, ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА РЕГУЛИРОВАНИЯ.

Объектом выпускной квалификационной работы является электропривод дутьевого вентилятора.

Цель работы – разработка и исследование асинхронного частотно-регулируемого электропривода дутьевого вентилятора.

В выпускной квалификационной работе был произведён расчет и выбор приводного двигателя; преобразователя частоты, а также определены параметры силовой цепи. Обоснован выбор способа управления, рассчитаны механические и электромеханические характеристики. Методом имитационного моделирования на ЭВМ исследованы переходные процессы в основных режимах работы.

Выпускная квалификационная работа выполнена в текстовом редакторе MicrosoftWord 2010; для расчетов и построений рисунков использовались программы: MathCAD 14, MicrosoftVisio, MicrosoftPowerPoint 2010; имитационное моделирование выполнено с помощью пакета программSimulink (MatLab 7.11).

Содержание

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ	12
ВВЕДЕНИЕ.....	17
1. ОПИСАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА КОТЕЛЬНОЙ.....	18
1.1. Управление исполнительными механизмами котла	25
1.2. Управление котлом в различных теплотехнических состояниях	28
1.3. Обоснование применения частотно-регулируемого электропривода для вентилятора	37
2.ВЫБОР ОБОРУДОВАНИЯ И РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ	40
2.1. Аэродинамические характеристики и параметры вентилятора ВДН- 12,5У	40
2.2. Механические характеристики вентилятора.....	43
2.3. Выбор приводного двигателя.....	45
2.4. Расчёт естественных характеристик электродвигателя	52
2.5. Выбор типа преобразователя и способа регулирования	57
2.6. Структурная схема силового канала системы преобразователь частоты – асинхронный электродвигатель.....	58
2.7. Расчёт характеристик разомкнутой системы ПЧ-АД и оценка выполнения заданной области работы электропривода	60
2.8. Расчет статических характеристик разомкнутой системы преобразователь частоты - асинхронный двигатель при частотном управлении.....	67
3. СТРУКТУРНАЯ СХЕМА САУ ЭП И НАСТРОЙКА КОНТУРОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ.....	72
3.1. Структурная схема линеаризованной непрерывной САУ частотно- регулируемого асинхронного электропривода с векторным управлением	72
3.2 Структурная схема нелинейной САУ регулируемого асинхронного электропривода с векторным управлением.....	74

3.3 Оптимизация контуров регулирования САУ электропривода с учетом квантования сигналов	76
3.3.1. Оптимизация контура тока с ПИ-регулятором, аналоговым датчиком тока и учетом квантования сигналов в контуре.....	77
3.3.2. Оптимизация контура скорости с ПИ-регулятором и без датчика скорости.....	83
3.3.3. Оптимизация контура потокосцепления ротора с ПИ-регулятором без датчика потока	89
4. РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ВЕНТИЛЯТОРА И ЕЁ ИССЛЕДОВАНИЕ	92
4.1. Имитационные исследования нелинейной САУ регулируемого электропривода	92
4.2. Имитационные исследования работы САУ электропривода в составе технологической установки	118
ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»	127
5 ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ.....	128
5.1 SWOT-анализ электропривода приемного рольганга	128
5.2 Планирование и формирование графика работ по реализации технического проекта.....	132
5.2.1 Определение трудоемкости выполнения ТП	134
5.2.2 Разработка графика проведения технического проекта.....	135
5.3 Расчёт затрат на осуществление технического проекта	136
5.3.1 Расчет материальных затрат	138
5.3.2 Полная заработная плата исполнителей темы	139
5.3.3 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления).....	140
5.3.4 Накладные расходы.....	140

5.3.5 Формирование сметы затрат технического проекта	141
5.3.6. Определение ресурсоэффективности проекта	141
ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»	144
6 СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ.....	145
6.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	146
6.2 Производственная безопасность.....	149
6.3 Экологическая безопасность.....	155
6.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	156
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	158
Список используемой литературы	160

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время не один промышленный технологический процесс невозможно представить, в которых не используются электрические двигатели. Частотные преобразователи, в технологических процессах решают задачи автоматизации управления электрическими двигателями, и являются неотъемлемым звеном современного электропривода.

По отношению к другим типам приводов, частотный электропривод имеет ряд значительных преимуществ:

- плавный пуск и торможение электропривода;
- широкий диапазон регулирования скорости вращения электродвигателя;
- высокая точность поддержания скорости вращения электродвигателя на установившихся режимах;
- режимы энергосбережения;
- и др.

На любом предприятии и в любых технологических условиях существуют как каждодневные задачи, так и задачи специфические, связанные с особенностью технологического процесса и технологического оборудования, решение которых не всегда является простой задачей.

Из всех механизмов котельной, приводимых в движение асинхронными двигателями, определяющее значение с точки зрения энергетической эффективности имеют тягодутьевые механизмы. Они потребляют почти 60% электроэнергии от собственных нужд котельной.

Использование частотного регулирования электроприводов тягодутьевых механизмов обеспечивает:

- автоматическое поддержание на заданном уровне разрежения на выходе котла и давления подаваемого в котел воздуха во всех режимах работы (розжиг/останов котла, работа при различном количестве включенных горелок);

- сокращение времени розжига по сравнению с ручным управлением;
устойчивый автоматический розжиг котла без отрыва пламени.

При использовании в электроприводе вентилтора котла средств автоматизации помимо экономии электроэнергии обеспечивается стабильный режим работы котельной; минимальный выброс вредных веществ в атмосферу, увеличение срока эксплуатации оборудования.

1. ОПИСАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА КОТЕЛЬНОЙ

Система управления реализована на базе программируемых логических контроллеров КР-500, размещенных в шкафу управления котлом со встроенной операторской панелью Weintek и SCADA-системы Trace Mode на АРМ оператора.

Система управления включает следующие средства:

- станция управления с операторской панелью (рисунок 1.1);
- операторская станция;
- шкаф электрический для управления регулирующей арматурой;
- шкаф электрический для управления запорной арматурой;
- аппаратура частотного регулирования скоростью двигателей тягодутьевых машин;
- комплект приборов КИП и А.

Электропитание станции управления осуществляется напряжением 220 В, потребляемая мощность до 3,0 кВт.

Заземление станции управления и шкафов электрических осуществляется в соответствии с общими требованиями ПУЭ для потребителей до 1000 В. Отдельного контура заземления для средств автоматики котла не требуется.

Станция управления (контроллер с модулями УСО) имеет климатическое исполнение УХЛ 3.1 при температуре окружающего воздуха от 0 до +40°C.

Конструктив станции имеет габаритные размеры 1800x600x600 двухстороннего обслуживания, исполнение IP54 по защите от внешних воздействий, что обеспечивает устойчивую работу аппаратуры в производственных помещениях. Поэтому станция управления и шкафы электрические могут размещаться в непосредственной близости от котла.

В состав операторской станции входят два компьютера офисного исполнения, поэтому она должна размещаться в отдельном помещении с комфортными условиями окружающей среды: температура от 15 до 25°C, относительная влажность 40... 70%.

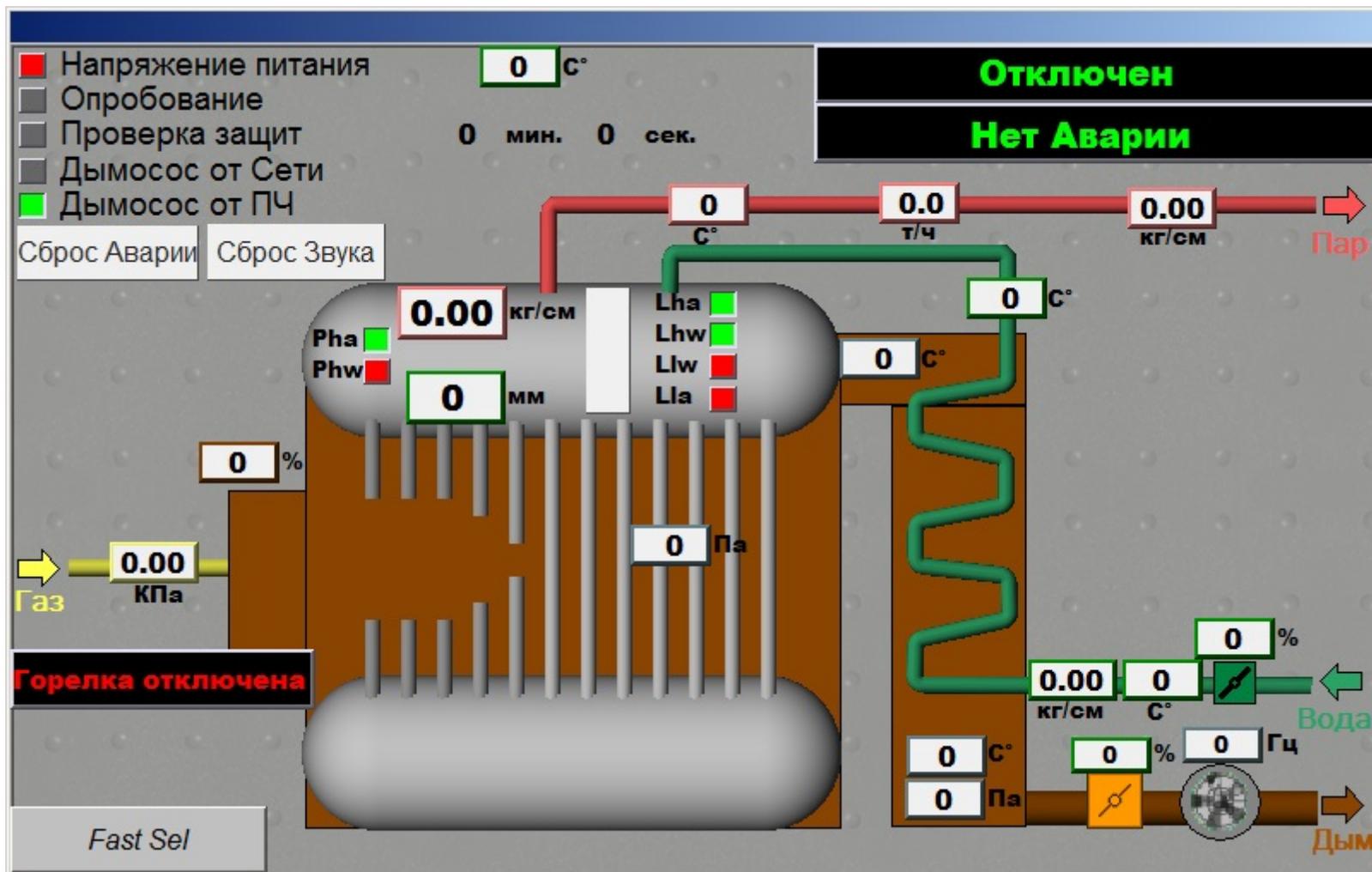


Рисунок 1.1 – Мнемосхема системы автоматического управления технологическим процессом

Контроль состояния технологического оборудования и отдельных исполнительных механизмов осуществляется с помощью показывающих приборов, датчиков технологических параметров и состояния исполнительных механизмов котла. Сигналы от датчиков вводятся в устройство управления для анализа и выработки управляющих воздействий в соответствии с алгоритмом управления. Одновременно эти сигналы используются для отображения информации об объекте, регистрации и сигнализации средствами системы управления (местный пульт станции управления, дисплей операторской станции). Комплект приборной продукции обеспечивает контроль параметров, характеризующих работу котла, обеспечивающих автоматическое управление котлом и полное представление информации оперативному персоналу о режимах работы и состоянии оборудования котла.

Устройство управления формирует сигналы управления, в том числе признаки состояния оборудования, пороговые сигналы текущих значений аналоговых датчиков, аварийной и предупредительной сигнализации, управляющие воздействия схем управления, регулирования и защит на исполнительном механизме котла.

Управление исполнительными механизмами осуществляется через низковольтные коммутирующие устройства (НКУ), которые обеспечивают коммутацию рабочего напряжения электропривода исполнительного механизма по сигналам от устройства управления или по команде оператора с пультов системы управления. Управление исполнительными механизмами в автоматическом режиме обеспечивает установку арматуры в открытое и закрытое положение, останов запорного устройства арматуры в любом промежуточном положении, автоматическое отключение привода при достижении запорным устройством арматуры крайних положений, плотное закрытие запорной арматуры с созданием гарантированного усилия на уплотнительных поверхностях рабочего органа, блокировку взаимоисключающих команд управления (открыть и закрыть), выдачу

сигналов крайних положений и аварийных отключений привода (заклинивание, перегрузка и т.д.).

Электроприводы задвижек и запорных вентилей оснащены концевыми выключателями, определяющими крайние положения "открыто" и "закрыто".

Управление регулирующими устройствами предполагает формирование сигналов управления «больше/меньше» различной длительности (широтно-импульсная модуляция). Исполнительные механизмы регулирующих клапанов (МЭО) и встроенные электроприводы регулирующих клапанов оборудованы аналоговыми датчиками для индикации положения рабочего органа.

Перечень исполнительных механизмов котла представлен в приложении (таблица 2).

Средства автоматизации (исполнительные механизмы, приборы контроля и измерения теплотехнических параметров и состояния исполнительных механизмов) с технологическим оборудованием можно условно разделить на следующие функциональные группы:

- пароводяной тракт котла;
- горелка и топливопроводы котла;
- воздухогазоходы котла.

Оборудование пароводяного тракта обеспечивает питание котла водой, поддержание требуемых значений уровня воды в барабане и солесодержания котловой воды, выработку пара, его перегрев и отвод перегретого пара потребителю.

Пароводяной тракт котла включает узел питания, экономайзер, два барабана котла с системой опускных и испарительных труб, линию непрерывной продувки барабана котла, линию аварийного слива воды из барабана, пароперегреватель и паропроводы, обеспечивающие отвод вырабатываемого пара.

Котел оборудован газомазутной горелкой ГМ-20Х и топливопроводом, которые обеспечивают работу котла на газообразном топливе.

Горелка ГМ-20Х комплектуется электрогазовым запальником. Запальник имеет встроенные электрод зажигания и контрольный электрод ионизационного датчика. Автоматика котла включает высоковольтный трансформатор розжига для получения искры зажигания и прибор контроля пламени ФЭСП-2 для преобразования сигнала ионизационного датчика о наличии пламени запальника в стандартный сигнал типа «сухой» контакт.

Контроль наличия факела горелки осуществляется тем же прибором ФЭСП-2, который включает низкочастотный фотодатчик. Для крепления ФЭСП-2 горелка "оборудована визирной трубой с фланцем.

На горелке установлены отборные устройства для подключения показывающих напорометров (207 и 208) для визуального контроля давления периферийного и внутреннего воздуха горелки, устанавливаемых по месту в непосредственной близости от горелки.

Топливопровод котла служит для подачи газообразного топлива на запальник и горелку котла и оснащен блоком газовым БГ-8.01. Ду 150.

Газовоздуховоды (газовоздушный тракт) и тягодутьевое оборудование котла обеспечивают подачу воздуха на горелку в количестве, необходимом для оптимального горения, отвод продуктов сгорания (дымовых газов) и поддержание заданного разрежения в топке.

Функциональная схема регулятора давления воздуха приведена на рисунке 1.2.

Исполнительными механизмами газовоздуховодов являются:

- дутьевой вентилятор (ДВ);
- направляющий аппарат вентилятора с МЭО (ИМ3);
- дымосос котла (ДС);
- направляющий аппарат дымососа с МЭО (ИМ4).

Для включения тепловой защиты и контроля состояния вентилятора и дымососа служит аппаратура управления двигателем (АУД) тягодутьевых машин. АУД выбирается проектом привязки и включает оборудование частотного регулирования скорости вращения

тягодутьевых машин, а также схему контроля состояния двигателя вентилятора или дымососа. Схема контроля состояния обеспечивает формирование дискретного сигнала типа «сухой» контакт (КС) об отключении двигателя. Сигнал формируется при любом отключении двигателя, в том числе при срабатывании тепловой защиты или защиты по максимальному току двигателя. В частности, для контроля включенного состояния двигателей могут быть использованы выходные дискретные сигналы частотного регулятора.

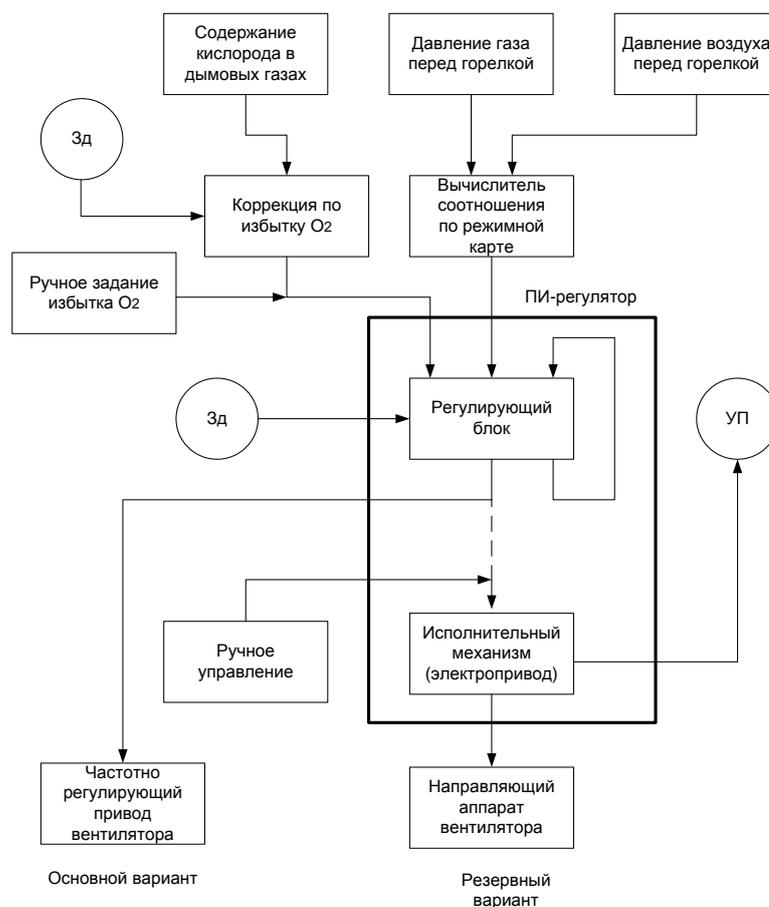


Рисунок 1.2 – Функциональная схема регулятора давления воздуха

Газовоздуховоды оснащаются приборами и датчиками для контроля следующих параметров:

- температура воздуха перед горелкой (114);
- давление воздуха перед горелкой (206,224,231);
- разрежение в топке (210,225,232);
- температура дымовых газов до (115) и после экономайзера (116);

- разрежение перед дымососом (211);
- содержание кислорода в дымовых газах за котлом (512).

Датчик температуры воздуха перед горелкой обеспечивает визуальный контроль текущего значения параметра на щите управления и формирование сигналов предупредительной сигнализации оснижении температуры. При наладке необходимо учитывать, при какой температуре воздуха составляется режимная карта, и отклонение от этого значения на 20°С должно вызывать предупредительную сигнализацию.

Приборы контроля давления воздуха перед горелкой обеспечивают визуальный контроль текущего значения параметра по месту и на щите управления, формирование сигналов предупредительной и аварийной сигнализации оснижении давления и используются при регулировании пускового давления воздуха перед горелкой и соотношения топливо-воздух. Сигнал датчика содержания кислорода служит корректирующим сигналом при регулировании оптимального соотношения топливо-воздух.

Приборы контроля разрежения в топке обеспечивают визуальный контроль по месту и на щите управления, формирование сигналов предупредительной и аварийной сигнализации о снижении разрежения (отсутствии тяги) и используются для поддержания постоянного разрежения в топке. Датчик температуры дымовых газов за экономайзером обеспечивает визуальный контроль текущих значений параметра и включение предупредительной сигнализации при повышении температуры.

1.1. Управление исполнительными механизмами котла

Управление котлом в автоматическом режиме осуществляется через управление исполнительными механизмами котла, оборудованными электроприводами.

К исполнительным механизмам типа «электропривод с датчиком состояния» относятся тягодутьевые машины, управление которыми осуществляется с помощью специальной аппаратуры управления двигателями (АУД) ИМ. В состав АУД входят коммутирующие устройства, обеспечивающие включение и отключение двигателя по команде устройства управления, защитное отключение при нарушении режима работы двигателя (например, перегрузка) и средства контроля состояния двигателя (КС), которые обеспечивают формирование достоверного сигнала о состоянии двигателя. Порядок управления определяется схемой АУД и может осуществляться как одной командой «включить/отключить», так и формированием отдельных команд «включить» и «отключить» по двум каналам управления.

При управлении исполнительным механизмом данного типа выдача сигнала от датчика состояния. Сигнал от датчика состояния «двигатель включен» должен измениться через время, необходимое на выполнение выданной команды (уточняется при наладке). Несоответствие сигнала состояния исполнительного механизма текущей команде по истечении контрольного времени вызывает формирование сигнала о неисправности исполнительного механизма и включение предупредительной сигнализации.

В проекте управление скоростью вращения двигателя тягодутьевых машин осуществляется дискретным сигналом в виде двоичного цифрового кода.

Управление исполнительными реверсивными механизмами запорной арматуры осуществляется с помощью низковольтных коммутирующих устройств (НКУ), которые обеспечивают включение в прямом и обратном направлении, отключение двигателя по команде устройства управления, защитное отключение при нарушении режима работы двигателя (например, перегрузка). При этом нештатное отключение двигателя, неисправность НКУ, вызывающая

потерю управления исполнительным механизмом, в том числе отключение питания, должно сопровождаться формированием сигнала предупредительной сигнализации.

Для управления исполнительным механизмом устройство управления выдает на НКУ команды «открыть», «стоп» и «закрыть». По команде «открыть» НКУ включает двигатель для перемещения запорного органа арматуры в положение «открыто», по команде «закрыть» - для перемещения запорного органа арматуры в положение «закрыто», и обеспечивает автоматический останов двигателя в крайних положениях. При выполнении команды «закрыть» аппаратура НКУ реализует «плотное» закрытие арматуры, т.е. обеспечивает при закрытии гарантированное усилие на запорном органе за счет применения муфт предельного момента привода или реле максимального тока в составе НКУ. Командой «стоп» запорный орган может быть установлен в любом промежуточном положении.

Управление исполнительными реверсивными механизмами регулирующих устройств (клапаны, затворы, заслонки, направляющие аппараты) также осуществляется с помощью низковольтных коммутирующих устройств (НКУ), которые обеспечивают включение в прямом и обратном направлении, отключение двигателя по команде устройства управления, защитное отключение при нарушении режима работы двигателя (например, перегрузка).

В состав НКУ регулирующих устройств входят бесконтактные реверсивные пускатели типа ПБР, что позволяет применять широтно-импульсную модуляцию с малой длительностью управляющего сигнала для перемещения рабочего органа при регулировании. При этом нештатное отключение двигателя, неисправность НКУ, вызывающая потерю управления исполнительным механизмом, в том числе отключение питания, сопровождается предупредительной сигнализацией «Авария Исполнительного Механизма».

Для контроля положения рабочего органа регулирующего устройства кроме концевых выключателей крайних положений КВО и КВЗ используется аналоговый датчик положения (ДП) сигнал которого пропорционален степени открытия регулирующего устройства и служит для контроля перемещения рабочего органа при выполнении команд управления «больше» и «меньше».

Приведенный алгоритм управления исполнительными механизмами различного типа дан в общем виде и подлежит уточнению при проектировании автоматики котла с учетом принятых схем управления и подключения конкретных НКУ.

1.2. Управление котлом в различных теплотехнических состояниях

Управление котлом в автоматическом режиме заключается в выполнении требуемой последовательности технологических операций под управлением автоматики для поддержания заданных теплотехнических параметров, выполнения команд оператора и защиты оборудования. Технологический алгоритм определяет последовательность действий при управлении котлом в зависимости от состояния оборудования. Состояние котла определяется состоянием оборудования, характеризуемого сигналами датчиков теплотехнических параметров котла и положения исполнительных механизмов. Предлагаемый алгоритм управления включает следующие теплотехнические состояния котла:

- отключен;
- проверка готовности и установка исполнительного механизма в исходное положение;
- исходное; .
- подготовка к розжигу;
- розжиг;

- прогрев;
- рабочий режим;
- останов.

Смена состояний осуществляется по командам оператора или автоматически по результатам выполнения технологических операций. В автоматическом режиме при нарушении порядка выполнения технологических операций, заданных алгоритмом, и отклонении параметров за допустимые пределы предусматриваются следующие варианты реакции системы на нештатные ситуации:

- включение предупредительной сигнализации;
- блокировка команд управления отдельным исполнительным механизмом;
- приостановка выполнения (блокировка) дальнейших технологических операций до принятия решения оператором о порядке продолжения работы;
- смена состояния (при срабатывании защит - останов котла, переход в состояние останов).

Во всех случаях включается предупредительная звуковая сигнализация, которая сопровождается выдачей сообщения оператору. Причина сигнализации фиксируется и запоминается в хронологическом порядке.

Автоматическое управление котлом начинается по команде оператора. По команде пуска контролируется давление в барабане котла. Если давление выше 0,1 МПа, осуществляется перевод котла в состояние «останов». Если давление в барабане ниже или равно 0,1 МПа, осуществляется переход в состояние «проверка готовности и установка исполнительных механизмов в исходное положение».

В состоянии котла «проверка готовности и установка исполнительных механизмов в исходное положение» осуществляется проверка текущих значений технологических параметров и состояния оборудования

котла. При этом текущие значения параметров сравниваются с уставками, а исполнительные механизмы переводятся в исходное положение.

Установка исполнительных механизмов котла в исходное состояние выполняется одновременно. При выявлении неисправности исполнительных механизмов или невозможности выполнения команд, а также при несоответствии текущих значений технологических параметров, указанных выше, включается предупредительная сигнализация, работа с остальными исполнительными механизмами продолжается.

Котел автоматически переводится в состояние «Исходное» при успешном выполнении действий по установке исполнительных механизмов в исходное положение и соответствии основных параметров следующих значениям:

- давление пара в барабане P222 ниже L1 (0,1 МПа);
- уровень воды в барабане в пределах диапазона ± 75 мм от среднего рабочего уровня;
- давление воздуха перед горелкой P224 ниже LA (0,15 кПа);
- пламя запальника отсутствует;
- факел горелки отсутствует;
- давление газа между клапанами ПЗК1 и ПЗК2 P226 ниже LA (0,5 кПа);
- давление газа перед горелкой P227 ниже LA (0,5 кПа).

При нарушении условий завершения операций переход в состояние «исходное» блокируется. В этом случае по команде оператора повторяется выполнение операций по установке оборудования котла в исходное положение после устранения причин неисправности исполнительных механизмов и восстановления рабочих значений параметров или котел переводится в состояние «останов».

Состояние котла «исходное» характеризует готовность котла к пуску в работу в автоматическом режиме. Из состояния «Исходное» при отсутствии блокировок оператор может перевести котел в состояние «Подготовка к розжигу» или командой «Останов котла» в состояние «отключен».

Подготовка начинается с включения тягодутьевого оборудования. Операции пусковой вентиляции и опрессовка газопровода выполняются одновременно.

Включение тягодутьевого оборудования выполняется в следующем порядке. Сначала включается дымосос ДС и регулятор разрежения в топке. Регулятор поддерживает заданное значение разрежения в топке, изменяя скорость вращения двигателя дымососа или воздействуя на направляющий аппарат дымососа. При включении дымососа разрежение в топке, как правило, значительно ниже требуемого значения $-20...-40$ Па и может выйти за пределы нижнего диапазона прибора (-200 Па), что не является нарушением режима, направляющий аппарат при этом остается закрытым.

После завершения разгона дымососа включается вентилятор котла ДВ и регулятор пускового давления воздуха перед горелкой. Регулятор поддерживает заданное значение давления воздуха перед горелкой, изменяя скорость вращения двигателя вентилятора или воздействуя на направляющий аппарат вентилятора. Значение пускового давления воздуха выбирается при наладке, чтобы обеспечить количество подаваемого в топку воздуха в объеме $25...30\%$ от номинального. Давление воздуха при этом должно быть выше уставки предупредительной сигнализации $0,15$ кПа. После включения регулятора давления воздуха дается время $20...40$ секунд (уточняется при наладке) на установление рабочих значений параметров.

По окончании операций стадии включения тягодутьевого оборудования осуществляется переход на стадию пусковой вентиляции.

На стадии «пусковая вентиляция» осуществляется контроль следующих параметров:

- дымосос и вентилятор включены;
- разрежение в топке имеет рабочее значение ($-100 \text{ Па} < P_t < -5 \text{ Па}$);
- давление воздуха перед горелкой выше $0,15$ кПа.

При соответствии параметров требуемым значениям начинается отсчет времени пусковой вентиляции топки и газоходов котла. Время пусковой вентиляции-10 минут (уточняется при выполнении пусконаладочных работ). Отключение дымососа или вентилятора вызывает автоматический останов котла действием защит. Отклонение параметров разрежения в топке и давления воздуха за указанные пределы вызывает включение предупредительной сигнализации и приостановку отсчета времени вентиляции.

Одновременно со стадией «пусковая вентиляция» выполняются технологические операции стадий «подготовка пароводяного тракта» и «опрессовка газопровода».

При выполнении технологических операций стадии подготовки оборудования пароводяного тракта осуществляется контроль параметров, ввод локальных защит по уровню (перелив и упуск воды) в барабане котла, установка арматуры в определенное положение и стабилизация уровня воды в барабане.

Несоответствие параметров ожидаемым значениям вызывает включение предупредительной сигнализации, дальнейшее выполнение операций опрессовки газопровода блокируется. Выполнение операций опрессовки может быть продолжено только по команде оператора «повторить опрессовку» после устранения причин блокировки.

После успешного завершения технологических операций по стадиям в состоянии котла «подготовка к розжигу» при наличии признаков «Пусковая вентиляция выполнена», «Опрессовка завершена» и рабочих значениях параметров пароводяного тракта формируется сообщение «Готовность к розжигу».

При наличии признака Готовности к розжигу персонал по команде «Выполнить розжиг» переводит котел в состояние «Розжиг». Технологические операции по подготовке к розжигу могут быть прерваны по команде оператора «Останов котла» или автоматически действием защит

при отключении любой из тягодутьевых машин. Котел при этом переводится в состояние «Останов».

При выполнении операций розжига вводятся защиты, действующие на останов котла в следующих случаях:

- повышение (понижение) давления газа перед горелкой P227 выше НА (ниже LA);
- понижение давления воздуха ниже LA;
- повышение давления в топке (отсутствие тяги) выше НА.
- погасание факела горелки.

При успешном завершении операций розжига осуществляется автоматический переход в состояние «прогрев».

В состоянии «прогрев» выполняются: регулирование разрежения в топке котла, поддержание пусковых значений давления газа и воздуха перед горелкой (25...30% тепловой производительности), управление оборудованием пароводяного тракта.

При переходе на стадию подключения паровой нагрузки начинает открываться главная паровая задвижка.

В состоянии "Рабочий режим" котел вырабатывает до 25 тонн в час перегретого пара с номинальными параметрами (3,9 МПа и 410...450°C).

Устойчивая работа котла достигается автоматическим регулированием основных технологических параметров.

В состоянии «рабочий режим» включены все защиты котла, и отклонение параметров за допустимые пределы вызывает останов котла действием защит.

Регулирование соотношения «топливо-воздух» должно обеспечивать подачу воздуха на горелку в соответствии с режимной картой. Регулятор формирует управляющее воздействие на исполнительном механизме направляющего аппарата вентилятора (ИМ2) или цифровой сигнал в виде двоичного кода для управления скоростью вращения двигателя вентилятора через частотный преобразователь.

Регулирование соотношения осуществляется по давлению топлива и воздуха перед горелкой. При этом задание регулятору соотношения (давления воздуха) формируется по текущему давлению топлива по режимной карте, определяющей соотношение давления «топливо-воздух» (рисунок 1.3).

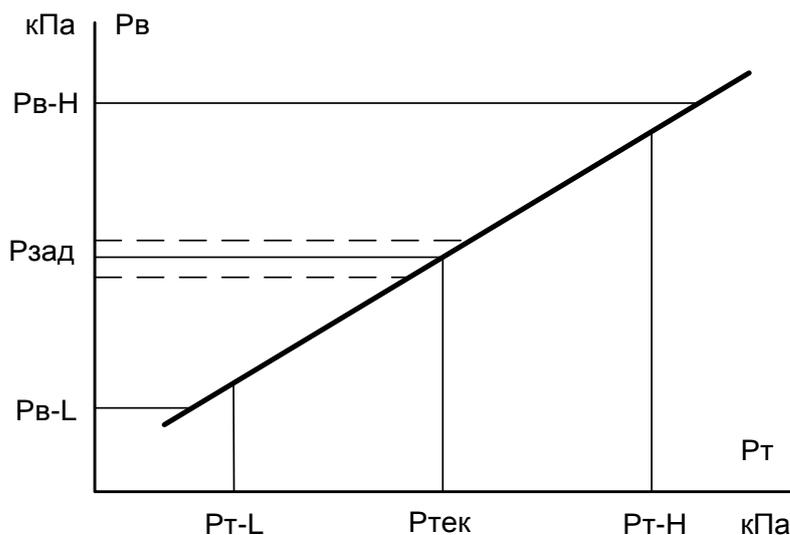


Рисунок 1.3- Характеристика соотношения «топливо-воздух»

В случае если зависимость оптимального соотношения давлений топлива и воздуха нелинейная, график строится по нескольким точкам с линейной аппроксимацией между соседними точками. По заданной зависимости устройство управления определяет требуемое давление воздуха перед горелкой ($P_{зад}$) по текущему значению давления топлива ($P_{тек}$). Одновременно определяются верхняя ($P_{вдв}$) и нижняя ($P_{вдн}$) границы допустимого отклонения давления воздуха при данном давлении топлива.

Если в процессе регулирования текущее значение давления воздуха выходит за границы допустимых отклонений, выполняется блокировка управления исполнительным механизмом подачи топлива регулятора тепловой

производительности с учетом направления движения. Так, если $P_v < P_{вдн}$, то блокируется выполнение команд «больше», а если $P_v > P_{вдв}$, то блокируются команды «меньше».

Регулятор соотношения сравнивает $P_{зад}$ с текущим значением давления воздуха и по сигналу рассогласования формирует управляющее воздействие по ПИ-закону. Для оптимизации процесса сжигания топлива при регулировании соотношения вводится корректирующий сигнал содержания свободного кислорода в уходящих дымовых газах. Увеличение содержания кислорода в уходящих газах вызывает снижение подачи воздуха, снижение содержания кислорода - увеличение подачи воздуха к горелке.

Регулятор разрежения обеспечивает поддержание постоянного заданного значения (-20...-30 Па) разрежения в топке за счет изменения скорости вращения двигателя дымососа или изменения положения ИМ4 направляющего аппарата дымососа.

Из состояния «рабочий режим» котел может быть переведен в состояние «останов» по команде оператора или автоматически действием защит. Котел переводится в состояние "Останов" по пусковой команде оператора из состояния «отключен», если давление в барабане котла больше 0,1 МПа, или по команде «останов котла» из любого состояния после выдачи команды на пуск автоматического управления. Автоматически котел переводится в состояние «останов» действием защит при введенной защите и отклонении параметра за пределы допустимого диапазона. При останове котла автоматикой выполняются операции, обеспечивающие перевод оборудования котла в отключенное состояние и установку в исходное положение исполнительных механизмов. Последовательность операций останова зависит от состояния котла, в котором он находился перед остановом. В общем случае при останове из состояния «рабочий режим» технологические операции останова котла выполняются по стадиям в следующей последовательности:

- отключение регуляторов тепловой производительности котла и соотношения топливо-воздух;
- отключение горелки;
- вентиляция топки;
- отключение тягодутьевого оборудования (ТДО);
- управление оборудованием пароводяного тракта.

Стадии переключения регуляторов и отключения горелки, если она включена, выполняются одновременно. Вентиляция топки и отключение тягодутьевого оборудования выполняется последовательно после отключения горелки.

Управление оборудованием пароводяного тракта начинает выполняться после погасания факела и осуществляется одновременно с операциями остальных стадий.

Успешное выполнение технологических операций останова котла завершается переходом котла в состояние "отключен"

Из состояния «останов» при выполнении определенных условий по команде оператора на пуск котла, котел может быть переведен в состояние «подготовка к розжигу». Команда на пуск может быть подана только после успешного завершения операций по отключению горелки, и порядок перехода зависит от состояния тягодутьевого оборудования.

1.3. Обоснование применения частотно-регулируемого электропривода для вентилятора

Дутьевые вентиляторы являются механизмами длительного режима работы, нагрузка на валу приводного двигателя спокойная, перегрузок в установившемся режиме не возникает. Вентиляторы являются механизмами, обладающими большим моментом инерции, что необходимо учитывать при расчете пусковых характеристик электроприводов.

Пуск вентилятора может производиться как при разгруженной машине (закрит направляющий аппарат), так и при нормальной работе на сеть. В первом случае максимальный момент при пуске равен примерно 0,5 номинального, во втором – номинальному. При пуске мощных вентиляторов с большим диаметром рабочего колеса обычно требуется ограничение ускорений при пуске во избежание появления чрезмерных динамических напряжений в лопатках рабочего колеса и резкого возрастания пускового тока.

Анализ аэродинамических характеристик вентилятора показывает, что при уменьшении расхода воздуха по условиям технологического процесса изменением положения заслонок даже до 60° - 50° не приводит к снижению потребляемой мощности из сети, а только уменьшает расход (т.е. отдаваемую мощность). Эффективное снижение потребляемой мощности при уменьшении расхода по требованиям технологического процесса возможно только при снижении скорости электродвигателя. В связи с этим особое значение для дутьевых вентиляторов имеет применение регулируемого электропривода, т. к. по некоторым источникам КПД вентиляторов при регулируемом электроприводе должно быть больше, чем при нерегулируемом в среднем на 15–20% [3].

Наиболее эффективным средством модернизации при работе агрегата с приводом от имеющегося асинхронного электродвигателя является применение частотно-регулируемого привода.

Кроме повышения КПД, применение регулируемого привода для вентиляторов позволяет в ряде случаев упростить конструкцию турбомашин, исключив направляющий аппарат. Кроме улучшения энергетических характеристик, значительно изменяются эксплуатационные показатели: увеличивается межремонтный цикл из-за снижения механических нагрузок и смягчения пусковых режимов, легко выбирается необходимый технологический режим и обеспечивается параллельная работа вентиляторов.

Система управления тягодутьевым механизмом включает несколько частотных преобразователей (управление приводом дымососов и вентиляторов), датчики разряжения и датчики давления, пульт управления оператора.

Использование частотного регулирования электроприводов тягодутьевых механизмов обеспечивает:

- автоматическое поддержание на заданном уровне разрежения на выходе котла и давления подаваемого в котел воздуха во всех режимах работы (розжиг/останов котла, работа при различном количестве включенных горелок);

- устойчивый автоматический розжиг котла без отрыва пламени.

Время розжига меньше по сравнению с ручным управлением.

При автоматическом поддержании параметров наряду с экономией электроэнергии обеспечивается оптимальный режим работы котельной, минимизация вредных выбросов в атмосферу, увеличение срока службы оборудования.

Модернизация действующих котельных производится с минимальными изменениями существующей структуры: частотные преобразователи включаются в разрыв силовой сети 380 В между пусковой аппаратурой и электродвигателями. Дроссельные заслонки в каналах дымососа и вентилятора полностью открыты.

В контрольных точках устанавливаются датчики разрежения и давления воздуха, сигналы с которых подаются на входы соответствующих частотных преобразователей, образуя замкнутые системы автоматического регулирования.

Система преобразователь частоты–асинхронный двигатель создает дополнительные возможности:

- обеспечивает программируемую защиту электродвигателя от перегрузок в рабочих и аварийных режимах;

- обеспечивает перепрограммирование режимов плавного пуска и торможения электродвигателя;

- предусматривает возможность автоматического (программируемого) перевода системы в режим экономии электроэнергии при работе с моментом нагрузки меньше номинального;

- повышает надежность оборудования, увеличивает срок службы основного технологического оборудования.

2.ВЫБОР ОБОРУДОВАНИЯ И РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ

2.1. Аэродинамические характеристики и параметры вентилятора ВДН-12,5У

Вентилятор ВДН-12,5У имеет диаметр рабочего колеса $D = 1250 \text{ мм}$ и скорость вращения колеса 980 об/мин , что определяет непосредственное соединение с электродвигателем. Момент инерции вентилятора $J_{\text{вент}} = 2,4 \text{ Н}\cdot\text{м}$.

Область аэродинамических характеристик вентилятора ВДН-12,5У приведена на рисунке 2.1. Характеристики вентилятора приведены для параметров воздуха при нормальных атмосферных условиях.

По аэродинамическим характеристикам для выбранной точки работы i определяются производительность, создаваемое давление и КПД вентилятора.

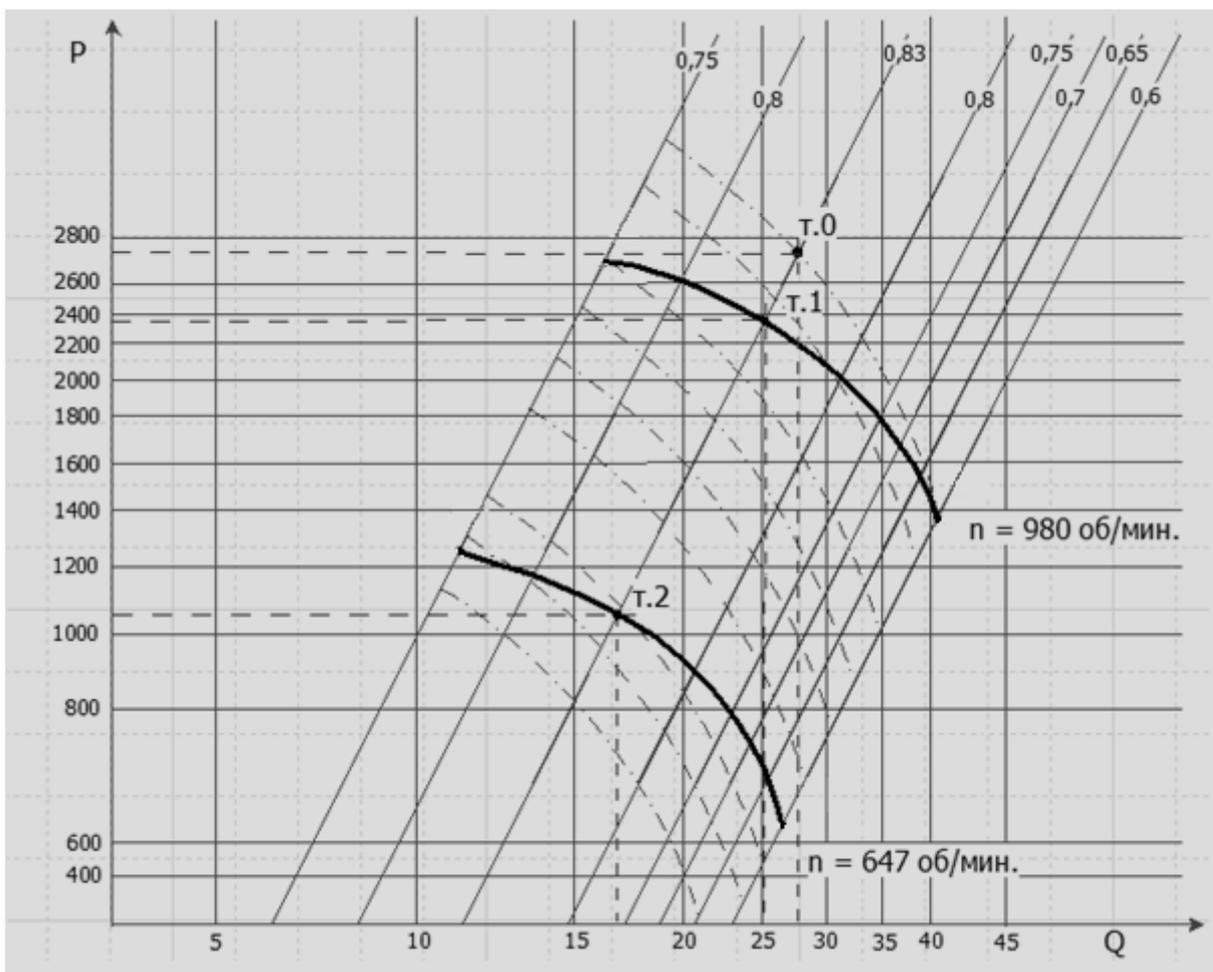


Рисунок 2.1 – Область аэродинамических характеристик вентилятора ВДН-12,5У

Полная и полезная мощность и полный и полезный момент на валу вентилятора, а также скорость вращения приводного двигателя определяются расчетным путем по приведенным ниже расчетным выражениям.

Полная мощность на валу

$$N_{\text{вал}i} = N_{\text{баз}} \times \frac{Q_i}{Q_{\text{баз}}} \times \frac{P_i}{P_{\text{баз}}} \times \frac{\eta_{\text{баз}}}{\eta_i}, \text{ Вт.}$$

Полезная мощность на валу вентилятора

$$N_{\text{пол}i} = N_{\text{вал}i} \times \eta_i, \text{ Вт.}$$

Скорость вращения приводного двигателя в выбранной точке работы

$$\omega_i = \omega_{\text{баз}} \times \frac{Q_i}{Q_{\text{баз}}} \text{ или } \omega_i = \omega_{\text{баз}} \times \sqrt{\frac{P_i}{P_{\text{баз}}}}, \text{ рад/с.}$$

Полный момент нагрузки на валу вентилятора

$$M_{\text{вал}i} = \frac{N_{\text{вал}i}}{\omega_i}, \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

Полезный момент нагрузки на валу вентилятора

$$M_{\text{пол}i} = \frac{N_{\text{пол}i}}{\omega_i}, \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

Расчет параметров вентилятора в рабочих точках т.1 и т.2 при максимальном $h = 0,83$

Параметры базовой точки т.0 (общей для расчета мощности во всех точках работы вентилятора):

$$Q_{\text{баз}} = 27800 \text{ м}^3/\text{ч}, \quad P_{\text{баз}} = 2738 \text{ Па}, \quad h_{\text{н}} = 83\%, \quad N_{\text{баз}} = 30000 \text{ Вт.}$$

Точка 1- точка номинального режима работы вентилятора. Параметры т.1 в соответствии с аэродинамическими характеристиками вентилятора:

$$Q_{\text{н}} = 25200 \text{ м}^3/\text{ч}, \quad P_{\text{н}} = 2350 \text{ Па}, \quad h_{\text{н}} = 83\%,$$

$$n_H = 980 \text{ об/мин или } \omega_H = 102,625 \text{ рад/с.}$$

Расчетные параметры в т.1:

– полная мощность на валу

$$N_{\text{вал1}} = 30000 \times \frac{25200}{27800} \times \frac{2350}{2738} \times \frac{0,83}{0,83} = 23340,57 \text{ Вт;}$$

– полезная мощность на валу вентилятора

$$N_{\text{пол1}} = 23340 \times 0,83 = 19373 \text{ Вт;}$$

– полный момент нагрузки на валу вентилятора

$$M_{\text{вал1}} = \frac{23340}{102,625} = 227,435 \text{ Н·м;}$$

– полезный момент нагрузки на валу вентилятора.

$$M_{\text{пол1}} = \frac{19373}{102,625} = 188,771 \text{ Н·м.}$$

Точка 2. Параметры т.2 в соответствии с аэродинамическими характеристиками вентилятора.

$$Q_{\text{т.2}} = 16700 \text{ м}^3/\text{ч}, \quad p_{\text{т.2}} = 1066 \text{ Па}, \quad h_H = 83\%,$$

$$n_{\text{т.2}} = 647 \text{ об/мин или } \omega_{\text{т.2}} = 67,754 \text{ рад/с.}$$

Расчетные параметры в т.2:

– полная мощность на валу

$$N_{\text{вал2}} = 30000 \times \frac{16700}{27800} \times \frac{1066}{2738} \times \frac{0,83}{0,83} = 7016,44 \text{ Вт;}$$

– полезная мощность на валу вентилятора

$$N_{\text{пол2}} = 7016 \times 0,83 = 5823,64 \text{ Вт;}$$

– полный момент нагрузки на валу вентилятора

$$M_{\text{вал2}} = \frac{7016}{67,754} = 103,558 \text{ Н·м;}$$

– полезный момент нагрузки на валу вентилятора.

$$M_{\text{пол2}} = \frac{5824}{67,754} = 85,953 \text{ Н·м.}$$

2.2. Механические характеристики вентилятора

Механическая характеристика вентилятора при работе в номинальном режиме и $h = 0,83$ (точки т.1 и т.2)

Номинальный режим работы вентилятора соответствует максимальному значению полного КПД и характеризуется следующими параметрами:

- номинальный КПД $h_H = 83 \%$;
- номинальная скорость вращения $n_H = 980$ об/мин;
- номинальная производительность $Q_H = 25200$ м³/ч;
- номинальное давление $p_H = 2350$ Па.

Выражение для механической характеристики вентилятора при работе с постоянным значением КПД h_i имеет следующий вид:

$$M_{с.венти}(\omega) = a_i \times M_{полн i} + (1 + b_i) \times M_{полн i} \times \frac{\omega}{\omega_H}^x,$$

где a_i и b_i – коэффициенты постоянных и переменных потерь вентилятора в режиме работы с постоянным значением h_i ;

$$a_i \times M_{полн i} = DM_{пост} = \text{const}$$

- момент постоянных потерь на валу вентилятора.

Из условия равенства постоянных и переменных потерь вентилятора в номинальном режиме работы (т. 1) определим значения коэффициентов потерь при работе вентилятора с $h_H = 0,83$ (точки работы т. 1 – т. 2) [15]:

$$a_H = b_H = \frac{1 - h_H}{2 \times h_H} = \frac{1 - 0,83}{2 \times 0,83} = 0,102$$

Тогда момент постоянных потерь на валу вентилятора

$$DM_{\text{пост}} = a_H \times M_{\text{пол.н}} = 0,102 \times 88,771 = 19,332 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

Из условия

$$M_{\text{вал.2}} = DM_{\text{пост}} + (1 + b_H) \times M_{\text{пол.н}} \times \frac{\eta_{\text{т.2}}^x}{\eta_H^x}$$

после подстановки численных значений

$$103,558 = 19,332 + (1 + 0,102) \times 88,771 \times \frac{0,67,754 \cdot \eta^x}{0,102,625 \cdot \eta^x}$$

и решения уравнения относительно x определим значение показателя степени механической характеристики вентилятора при регулировании производительности с номинальным значением КПД $\eta_H = 0,83$, $x = 2,18$.

В результате получаем общее выражение для механической характеристики вентилятора в режиме регулирования производительности с номинальным значением КПД $\eta_H = 0,83$.

$$M_{\text{с.вент}}(\omega) = 19,332 + (1 + 0,102) \times 88,771 \times \frac{0,67,754 \cdot \omega^{2,18}}{0,102,625 \cdot \omega^{2,18}}$$

Механическая характеристика вентилятора приведена на рисунке 2.2. В интервале рабочих скоростей вентилятора выделена область изменения момента сопротивления на валу вентилятора, соответствующая границам заданной области его аэродинамических характеристик (точки т.1- т.2). Из анализа механической характеристики вентилятора делаем вывод, что изменение режима работы вентилятора в пределах заданной области его аэродинамических характеристик не приводит к существенному изменению нагрузки двигателя.

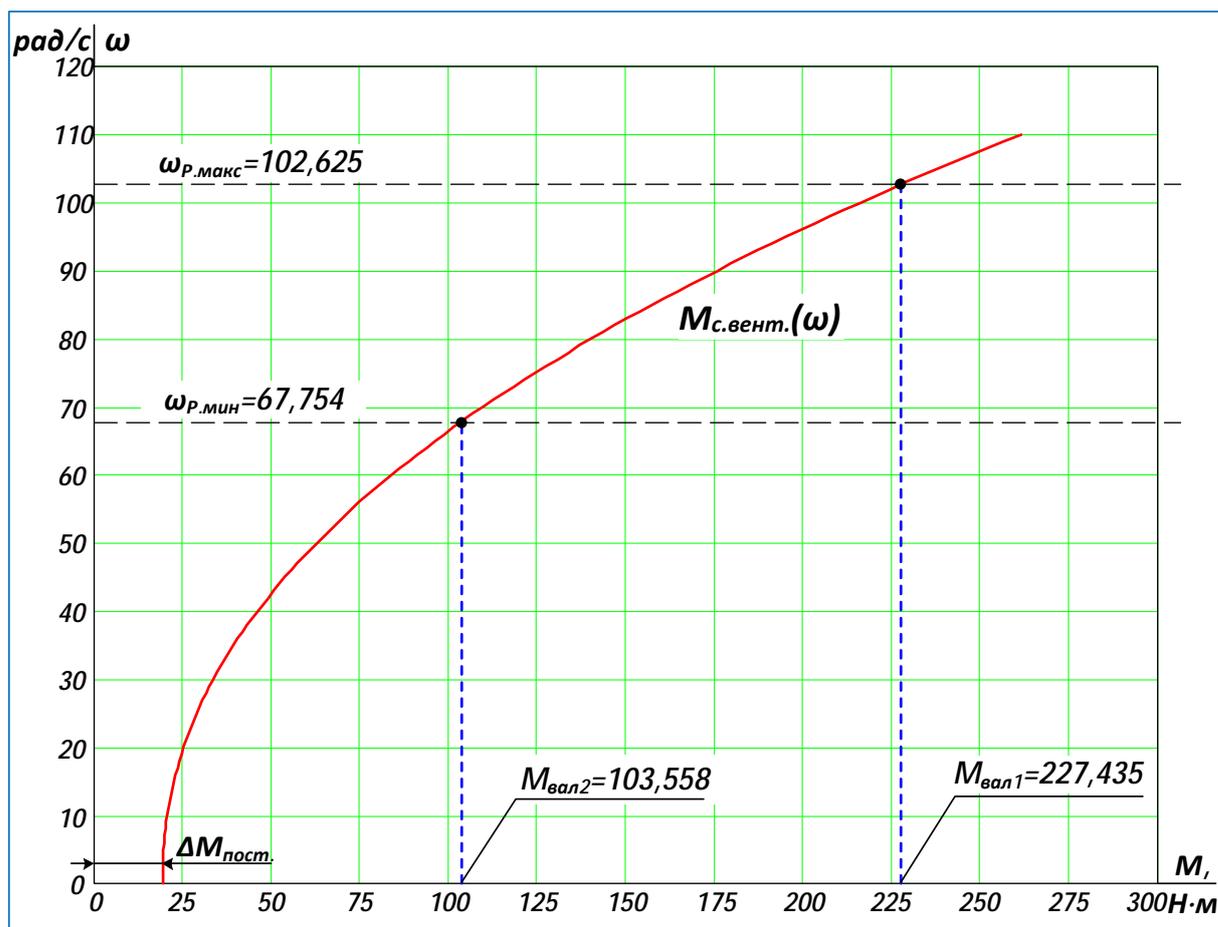


Рисунок 2.2 – Механическая характеристика вентилятора $M_{с\text{ вент}} = f(\omega)$

2.3. Выбор приводного двигателя

Номинальная мощность приводного двигателя должна быть равна или несколько больше мощности на валу вентилятора во всех его возможных технологических режимах работы. В режиме регулирования производительности вентилятор потребляет наибольшую мощность при работе в т.1, где $N_{вал1} = 23340$ Вт.

Согласно [10] при синхронной скорости 1000 об/мин ближайшим большим по мощности является электродвигатель 5A200L6, номинальная мощность которого равна 30000 Вт. Заметим, что электродвигатель выбранной мощности удовлетворяет работе вентилятора во всей области аэродинамических характеристик при нормальных атмосферных условиях.

Технические характеристики электродвигателя 5A200L6 приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Технические характеристики электродвигателя 5A200L6.

Типо-размер	n_0 , об/мин	$U_{1н}$, В	$P_{дв.н}$, кВт	При номинальной нагрузке			s_k , %	$J_{дв}$, кг·м ²
				s_n , %	$\cos j_n$	η_n , %		
5A 200 L6	1000	380	30	0,02	0,84	0,912	0,098	0,46

Продолжение таблицы 2.1

$m_{п} = \frac{M_{пуск}}{M_n}$	$m_k = \frac{M_{макс}}{M_n}$	$m_m = \frac{M_{мин}}{M_n}$	$k_{i_{дв}} = \frac{I_{пуск}}{I_n}$	Степень защиты
2,4	2,4	1	6,5	IP54



Рис. 2.3 – Электродвигатель промышленный 5A200L6.

Расчетные параметры электродвигателя

Номинальное скольжение

$$s_H = \frac{n_0 - n_{\text{дв.н}}}{n_0} = \frac{1000 - 980}{1000} = 0,02$$

Синхронная угловая частота вращения электродвигателя

$$\omega_0 = \frac{p \times n_0}{30} = \frac{3,14 \times 1000}{30} = 104,72 \text{ рад/с.}$$

Номинальная угловая частота вращения электродвигателя

$$\omega_{\text{дв.н}} = \frac{p \times n_{\text{дв.н}}}{30} = \frac{3,14 \times 980}{30} = 102,625 \text{ рад/с.}$$

Номинальный момент электродвигателя

$$M_{\text{дв.н}} = \frac{P_{\text{дв.н}}}{\omega_{\text{дв.н}}} = \frac{30000}{102,625} = 292,325 \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

Номинальное фазное напряжение статора

$$U_{1\text{фн}} = \frac{U_{1\text{лн}}}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220 \text{ В.}$$

Номинальный линейный ток статора

$$I_{1\text{фн}} = I_{1\text{лн}} = \frac{P_{\text{дв.н}}}{3 \times U_{1\text{фн}} \times \cos f_H \times \eta_H} = \frac{30000}{3 \times 220 \times 0,84 \times 0,912} = 59,33 \text{ А.}$$

Максимальный потребляемый ток двигателя при прямом пуске

$$I_{1\text{макс}} = k_{i,\text{дв}} \times I_{1\text{фн}} = 5,8 \times 59,33 = 344,137 \text{ А.}$$

Критический момент двигателя на естественной характеристике

$$M_K = m_K \times M_{\text{дв.н}} = 2,4 \times 292,325 = 701,581 \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

Пусковой момент электродвигателя при прямом пуске.

$$M_{\text{дв.пуск}} = m_{\text{п}} \times M_{\text{дв.н}} = 2,4 \times 292,325 = 701,581 \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

Определение параметров схемы замещения

Параметры схемы замещения определим по методике, изложенной в [16]

Ток холостого хода асинхронного электродвигателя

$$I_0 = I_{1\text{фн}} \times \sqrt{\frac{\frac{\frac{3}{\zeta} I_{1\text{фн}}^2 \frac{\sigma}{\delta} - \frac{e p_* (1 - s_H) \dot{U}}{\hat{e} (1 - p_* s_H) \hat{U}}}{\frac{e p_* (1 - s_H) \dot{U}}{\hat{e} (1 - p_* s_H) \hat{U}}}}{1 - \frac{e p_* (1 - s_H) \dot{U}}{\hat{e} (1 - p_* s_H) \hat{U}}}} =$$

$$59,33 \times \sqrt{\frac{\frac{\frac{3}{\zeta} 16,435^2 \frac{\sigma}{\delta} - \frac{e 0,75 (1 - 0,02) \dot{U}}{\hat{e} (1 - 0,75 \cdot 0,02) \hat{U}}}{\frac{e 0,75 (1 - 0,02) \dot{U}}{\hat{e} (1 - 0,75 \cdot 0,02) \hat{U}}}}{1 - \frac{e 0,75 (1 - 0,02) \dot{U}}{\hat{e} (1 - 0,75 \cdot 0,02) \hat{U}}}} = 21,029 \text{ А,}$$

где

$p_* = \frac{P}{P_H}$ – коэффициент загрузки двигателя, о.е; принимаем $p_* = 0.75$;

$\cos j_{p_*}$ – коэффициент мощности при частичной загрузке, о.е;

принимаем $\cos f_{p_*} = 0.805$ [16];

h_{p_*} – КПД при частичной загрузке, о.е; принимаем $h_{p_*} = h_H = 0,912$

[16];

$$I_{1p_*} = \frac{p_* \times P_{\text{дв.н}}}{3 \times U_{1\text{фн}} \times \cos f_{p_*} \times h_{p_*}} = \frac{0,75 \times 30000}{3 \times 220 \times 0,805 \times 0,912} = 46,435 \text{ А – ток статора}$$

двигателя при частичной нагрузке.

Приведенное к обмотке статора активное сопротивление обмотки ротора в номинальном режиме

$$R_2' = \frac{3 \times U_{1\text{фн}}^2 \times (1 - s_H)}{2 \times m_K \times P_{\text{двн}} \times C_1^2 \times \frac{\sigma}{\delta} + \frac{1}{s_K} \frac{\sigma}{\delta}} = \frac{0,959}{1,1 + \frac{1}{0,098} \times 0,031} = 0,082 \text{ Ом,}$$

где

$$C_1 = 1 + \frac{I_0}{2 \times k_j \times I_{1\text{фн}}} = 1 + \frac{21,029}{2 \times 5,8 \times 59,334} = 1,031$$

– коэффициент, характеризующий соотношение $\frac{X_{m^+} X_{1s}}{X_m}$;

$$s_K = s_H \times \frac{m_K + \sqrt{m_K^2 - [1 - 2 \times s_H \times b \times (m_K - 1)]}}{1 - 2 \times s_H \times b \times (m_K - 1)} =$$

$$= 0,02 \times \frac{2,4 + \sqrt{(2,4)^2 - [1 - 2 \times 0,02 \times 1,1 \times (2,4 - 1)]}}{1 - 2 \times 0,02 \times 1,1 \times (2,4 - 1)} = 0,098$$

– критическое скольжение;

b – коэффициент, характеризующий соотношение активных сопротивлений статора и ротора, примем $\beta = 1,1$.

Активное сопротивление обмотки статора

$$R_1 = C_1 \times R_2 \times b = 1,031 \times 0,082 \times 1,1 = 0,093 \text{ Ом.}$$

Индуктивное сопротивление короткого замыкания

$$X_{\text{кн}} = g \times C_1 \times R_2 = 10,15 \times 1,031 \times 0,082 = 0,861 \text{ Ом,}$$

где

$$g = \sqrt{\frac{1}{s_K^2} - b^2} = \sqrt{\frac{1}{0,098^2} - 1,1^2} = 10,15.$$

Индуктивное сопротивление рассеяния фазы роторной обмотки, приведенное к обмотке статора

$$X_{2s} = \frac{0,58 \times X_{\text{кн}}}{C_1} = \frac{0,58 \times 0,861}{1,031} = 0,484 \text{ Ом.}$$

Приведенная индуктивность обмотки ротора, обусловленная потоком рассеяния

$$L_{2s} = \frac{X_{2s}}{2 \times \rho \times f_{1\text{н}}} = \frac{0,484}{2 \times 3,14 \times 50} = 0,00154 \text{ Гн.}$$

Индуктивное сопротивление рассеяния фазы статорной обмотки

$$X_{1S} = 0,42 \times X_{кн} = 0,42 \times 0,861 = 0,361 \text{ Ом.}$$

Индуктивность обмотки статора, обусловленная потоком рассеяния

$$L_{1S} = \frac{X_{1S}}{2 \times \rho \times f_{1H}} = \frac{0,361}{2 \times 3,14 \times 50} = 0,00115 \text{ Гн.}$$

Индуктивное сопротивление контура намагничивания.

$$X_m = \frac{E_m}{I_0} = \frac{204,268}{21,029} = 9,713 \text{ Ом,}$$

где

$$E_m = \sqrt{(U_{1\phi H} \times \cos f_H - R_1 \times I_{1\phi H})^2 + (U_{1\phi H} \times \sqrt{1 - \cos^2 f_H} + X_{1S} \times I_{1\phi H})^2} =$$

$$= \sqrt{(220 \times 0,84 - 0,093 \times 59,334)^2 + (220 \times \sqrt{1 - 0,84^2} + 0,361 \times 59,334)^2} = 204,268 \text{ В}$$

– ЭДС ветви намагничивания, наведенная потоком воздушного зазора в обмотке статора в номинальном режиме.

Результирующая индуктивность, обусловленная магнитным потоком в воздушном зазоре, создаваемым суммарным действием токов статора (индуктивность контура намагничивания)

$$L_m = \frac{X_m}{2 \times \rho \times f_{1H}} = \frac{9,713}{2 \times 3,14 \times 50} = 0,031 \text{ Гн}$$

Проверка адекватности расчетных параметров двигателя

При найденных параметрах рассчитываются значения номинального электромагнитного момента двигателя $M_{эм.н}$ и $M_{эм.н}^*$:

$$M_{\text{эм.н}}(s_{\text{н}}) = M_{\text{эм.н}} = \frac{3 \times U_{1\phi\text{н}}^2 \times R'_2}{\omega_0^2 \times s_{\text{н}} \times X_{\text{кн}}^2 + R_1 + \frac{R'_2}{s_{\text{н}}} + \frac{R_1 \times R'_2}{s_{\text{н}} \times X_{\text{м}}^2}} =$$

$$= \frac{3 \times 220^2 \times 0,082}{104,72 \times 0,02 \times 0,861^2 + 0,093 + \frac{0,082}{0,02} + \frac{0,093 \times 0,082}{0,02 \times 9,713}} = 309,315 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

$$M^*_{\text{эм.н}} = \frac{3}{2} \times z_p \times \frac{L_m}{(L_m + L_{2s})} \times Y_{2\text{н}} \times \sqrt{2} \times \sqrt{I_{1\text{н}}^2 - I_0^2} =$$

$$= \frac{3}{2} \times 3 \times \frac{0,031}{(0,031 + 1,542 \times 10^{-3})} \times 0,92 \times \sqrt{2} \times \sqrt{59,33^2 - 21,03^2} = 309,254 \text{ Н}\cdot\text{м},$$

где z_p – число пар полюсов, $z_p = \frac{60 \times f_{1\text{н}}}{n_{\text{дв.н}}} = \frac{60 \times 50}{1000} = 3$

$$Y_{2\text{н}} = \sqrt{2} \times I_0 \times L_m = \sqrt{2} \times 21,03 \times 0,031 = 0,92 \text{ Вб}.$$

Должны выполняться условия:

$$M^*_{\text{эм.н}} \gg M_{\text{эм.н}};$$

$$M^*_{\text{эм.н}} = (1,05, 1,1) \times M_{\text{дв.н}} = (1,05, 1,1) \times 292,325 = (306,94, 321,56) \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

По результатам расчета эти условия выполняются [17].

Расчитанные параметры схемы замещения сведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Параметры схемы замещения электродвигателя

$R_1,$ Ом	$X_{1\sigma},$ Ом	$L_{1\sigma},$ Гн	$X_{\text{м}},$ Ом	$L_{\text{м}},$ Гн	$R'_2,$ Ом	$X'_{2s},$ Ом	$L'_{2s},$ Гн	$X_{\text{кн}},$ Ом
0,093	0,361	0,00115	9,713	0,031	0,082	0,484	0,00154	0,861

2.4. Расчёт естественных характеристик электродвигателя

Естественная механическая характеристика двигателя

Естественная механическая характеристика $M(s)$ асинхронного двигателя для частоты $f_{1H} = 50 \text{ Гц}$ рассчитывается по выражению:

$$M(s) = \frac{3U_{1\text{фН}}^2 R'_2}{w_0^2 X_{\text{кН}}^2 + R_1 + \frac{R'_2}{s} + \frac{R_1 R'_2}{s X_{\text{м}}^2}}; \quad (2.1)$$

где M – электромагнитный момент двигателя, Н·м.

По результатам расчёта построена механическая характеристика $w(M)$ (рисунок 2.3), где значения угловой скорости вращения двигателя находятся по выражению

$$w = w_0 (1 - s). \quad (2.2)$$

Рассчитаны значения электромагнитного номинального момента

$$M_{\text{эм}}(s_{\text{н}}) = M_{\text{эм}} = \frac{3U_{1\text{фН}}^2 R'_2}{w_0^2 X_{\text{кН}}^2 + R_1 + \frac{R'_2}{s_{\text{н}}} + \frac{R_1 R'_2}{s_{\text{н}} X_{\text{м}}^2}} =$$

$$= \frac{3 \times 220^2 \times 0,082}{104,72 \times 0,02 \times 0,861^2 + 0,093 + \frac{0,082}{0,02} + \frac{0,093 \times 0,082}{0,02 \times 9,713}} = 309,315 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

критического скольжения

$$s_K = R_2' \sqrt{\frac{1 + \frac{\sigma R_1}{\sigma X m \phi}}{R_1^2 + (X_{KH})^2}} = 0,082 \sqrt{\frac{1 + \frac{0,093}{9,713}}{0,093^2 + (0,861)^2}} = 0,095$$

и электромагнитного критического момента

$$M_{\text{ЭМ.К}}(s_H) = M_{\text{ЭМ.К}} = \frac{3U_{1\phi H}^2}{2\omega_0 \left[R_1 + \sqrt{(R_1^2 + X_{KH}^2) \left(1 + \frac{\sigma R_1}{\sigma X m \phi} \right)} \right]} =$$

$$= \frac{3 \times 220^2}{2 \times 104,72 \left[0,093 + \sqrt{(0,093^2 + 0,861^2) \left(1 + \frac{0,093}{9,713} \right)} \right]} = 723 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

соответствующие расчетной естественной механической характеристике двигателя.

По выражению (2.1) для скольжения $s=1$ рассчитано значение электромагнитного пускового момента $M_{\text{ЭМ.П}}$.

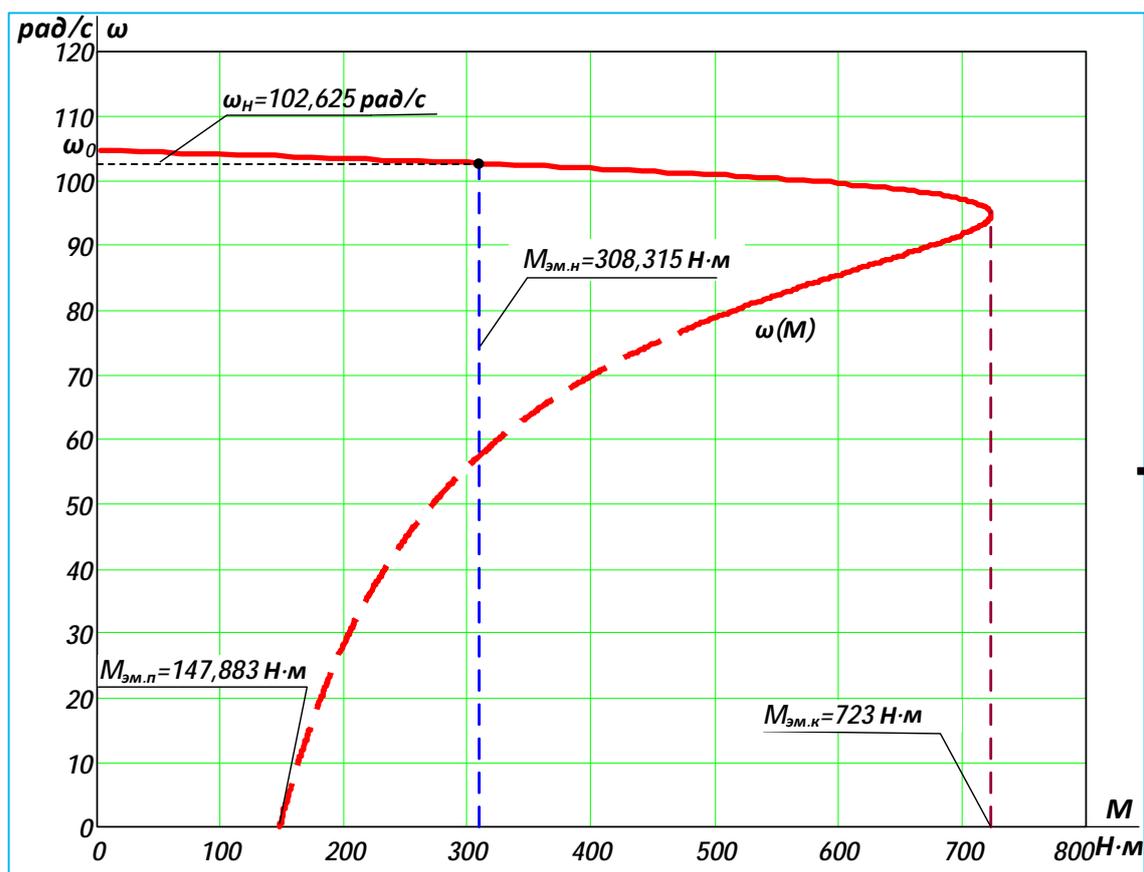


Рисунок 2.3 – Естественная механическая характеристика асинхронного двигателя $\omega(M)$

Поскольку механическая характеристика двигателя рассчитана для электромагнитного момента, то полная нагрузка на валу электродвигателя должна учитывать собственный момент двигателя. Момент от сил трения на валу электродвигателя можно принять постоянным и равным:

$$DM_{с.дв} = M_{эм.н} - M_{дв.н} = 309,315 - 292,325 = 16,99 \text{ Н}\cdot\text{м},$$

Естественная электромеханическая характеристика двигателя

Естественная электромеханическая характеристика $I_1(s)$ электродвигателя для частоты $f_{1н} = 50 \text{ Гц}$ рассчитывается по выражению:

$$I_1(s) = \sqrt{I_0^2 + I_2'(s)^2 + 2I_0 I_2'(s) \sin f_2(s)} \quad (2.3)$$

где $I_1 = I_{1\phi}$ – действующее значение фазного тока двигателя, А;

$$I_2'(s) = \frac{U_{1\phi H}}{\pm \sqrt{\frac{R_1^2}{s^2} + X_{KH}^2 + \frac{R_2^2}{s^2} + \frac{2R_1 R_2}{s X_{KH}}}} = \frac{220}{\pm \sqrt{0,093^2 + \frac{0,082^2}{s^2} + 0,861^2 + \frac{2 \cdot 0,093 \cdot 0,082}{s \cdot 9,713}}}, \quad (2.4)$$

– приведённый к обмотке статора ток ротора, А;

$$I_0 = \frac{U_{1\phi H}}{\sqrt{R_1^2 + \frac{R_2^2}{s^2} + X_{KH}^2}} = \frac{220}{\sqrt{0,093^2 + (0,361 + 9,713)^2}} = 21,835 \text{ А}, \quad (2.5)$$

– действующее значение тока холостого хода;

$$\sin f_2(s) = \frac{X_{KH}}{\sqrt{\frac{R_1^2}{s^2} + X_{KH}^2 + \frac{R_2^2}{s^2} + \frac{2R_1 R_2}{s X_{KH}}}} = \frac{0,861}{\sqrt{0,093^2 + \frac{0,082^2}{s^2} + 0,861^2}}. \quad (2.6)$$

По результатам расчёта построены электромеханические характеристики двигателя $w(I_1)$ и $w(I_2')$ (рисунок 2.4), где значения угловой скорости вращения двигателя находятся по выражению (2.2).

По выражениям (2.3) – (2.6) для скольжений $s = s_H$ и $s = 1$ рассчитаны значения номинального тока статора $I_H(s_H)$ и максимального тока двигателя при прямом пуске $I_{1\text{макс}}(s=1)$.

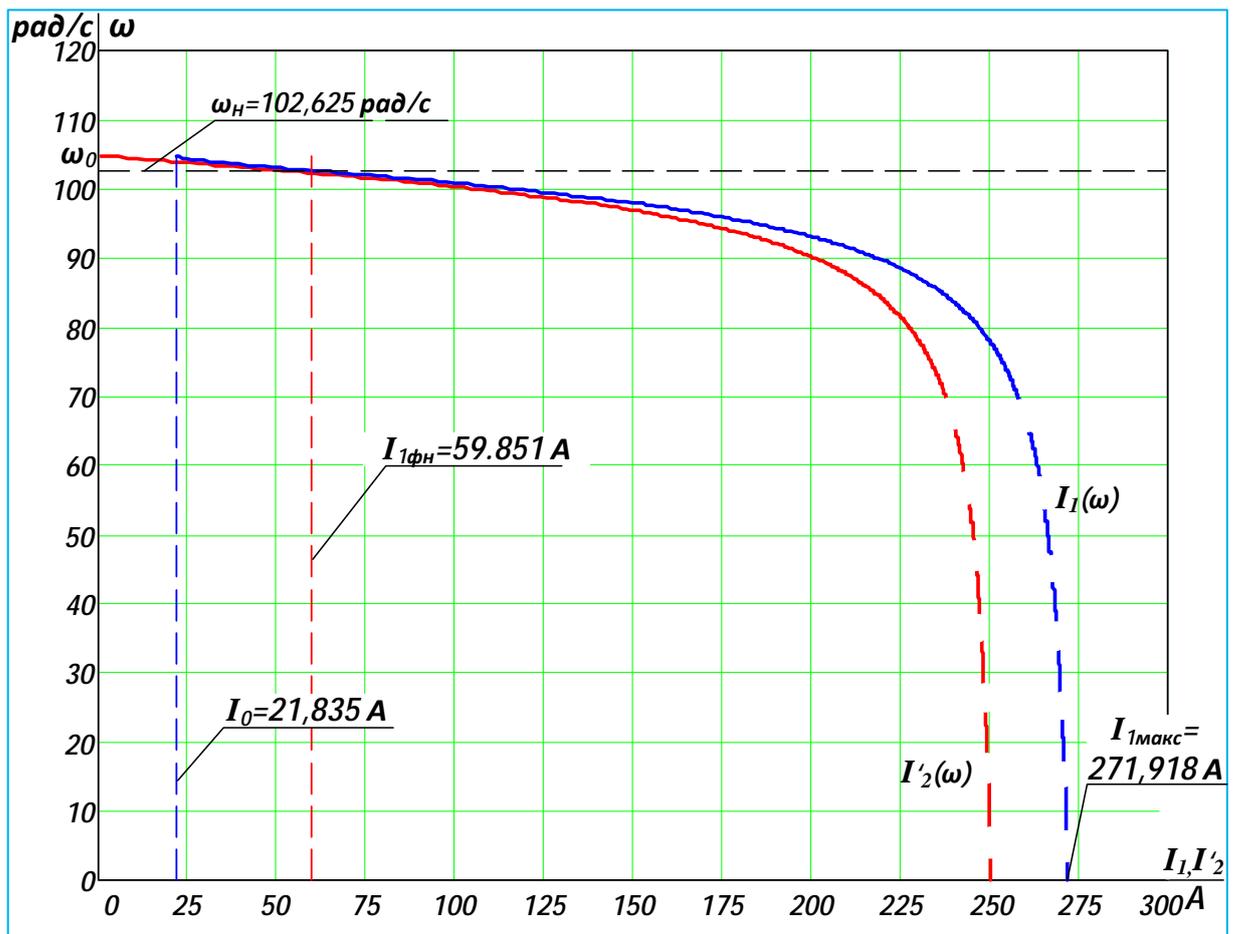


Рисунок 2.4 – Естественные электромеханические характеристики двигателя

$$\omega(I_1) \text{ и } \omega(I_2')$$

Оценка достоверности расчётных характеристик двигателя

В результате расчёта естественных характеристик двигателя получены следующие параметры для их характерных точек:

$$s_H = 2\%; \quad s_K = 9,5\%; \quad I_{1H} = 59,581 \text{ A}; \quad I_{1\text{макс}} = 271,918 \text{ A};$$

$$I_{1\text{макс}} / I_{1H} = 4,56 \text{ A}; \quad M_{\text{эм.н}} = 309,315 \text{ Н}\cdot\text{м}; \quad M_{\text{эм.к}} = 723 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

$$M_{\text{эм.к}} / M_{\text{эм.н}} = 2,34; \quad M_{\text{эм.пуск}} = 147,883 \text{ Н}\cdot\text{м}; \quad M_{\text{эм.пуск}} / M_{\text{эм.н}} = 0,478;$$

Справочные и расчётные параметры двигателя:

$$s_H = 2\% ; s_K = 9,8\% ; I_{\text{дв.н}} = 59,334 \text{ А} ; I_{\text{дв.макс}} = 344,137 \text{ А}$$

$$I_{\text{дв.макс}} / I_{\text{дв.н}} = 5,8 ; M_{\text{дв.н}} = 292,325 \text{ Н}\cdot\text{м} ; M_K = 701,814 \text{ Н}\cdot\text{м} ;$$

$$M_K / M_{\text{дв.н}} = 2,4 ; M_{\text{дв.пуск}} = 701,814 \text{ Н}\cdot\text{м} ; M_{\text{дв.пуск}} / M_{\text{дв.н}} = 2,4$$

Сравнения параметров расчётных характеристик со справочными параметрами двигателя показывают соответствие условиям для их характерных точек $M_{\text{эм.н}} > M_{\text{дв.н}}$, $M_{\text{эм.к}} > M_K$. Условие $M_{\text{эм.пуск}} > M_{\text{дв.пуск}}$ не выполняется, поэтому часть характеристики $\omega(M)$ показана пунктиром. Так как $I_{1\text{макс}} < I_{\text{дв.макс}}$, то на электромеханических характеристиках часть тоже показана пунктиром.

2.5. Выбор типа преобразователя и способа регулирования

Для регулируемого асинхронного электропривода используем преобразователь серии ИРБИ 8Х3, фирмы ИРБИС, параметры которого приведены в таблице 2.3 [22].

Таблица 2.3 – Параметры преобразователя частоты ИРБИ 8

Модель	Число фаз на входе	U_H , В	$I_{\text{и.н}}$, А	$I_{\text{и.макс}}$, А	Рекомендуемая мощность двигателя, кВт
ИРБИ 823-30	3	380	63	$1,1 \times I_{\text{и.н}} = 69,3$	30

Общие технические данные преобразователя частоты ИРБИ 823-30:

– коэффициент мощности 0,8;

- КПД не менее 0,95;
- выходная частота 1÷100 Гц;
- частота ШИМ 0,7÷20 кГц.

Способ управления – векторный.

2.6. Структурная схема силового канала системы преобразователь частоты – асинхронный электродвигатель

Структурная схема силового канала системы преобразователь частоты – асинхронный электродвигатель реализована во вращающейся двухфазной системе координат, ориентированной по результирующему вектору потокосцепления ротора, и приведена на рисунке 2.5. Управляющими сигналами на входе преобразователя структурной схемы силового канала (рисунок 2.5) являются цифровые сигналы в виде двоичного кода. Выходные напряжения преобразователя представляют собой составляющие напряжения статора U_{1d} и U_{1q} в ортогональной системе координат d , q , ориентированной по результирующему вектору потокосцепления ротора Y_{2d} [17].

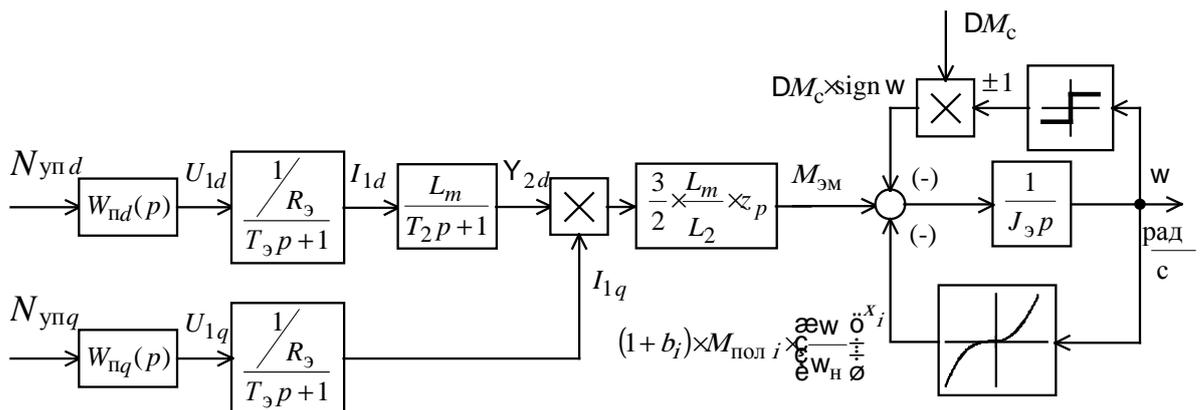


Рисунок 2.5 – Структурная схема силового канала системы преобразователь – асинхронный электродвигатель во вращающейся двухфазной системе координат, ориентированной по результирующему вектору потокосцепления ротора, с компенсацией внутренних обратных связей

Расчет параметров структурной схемы двигателя

Эквивалентные индуктивности обмоток

- статора

$$L_1 = L_{1s} + L_m = 0,00115 + 0,031 = 0,032 \text{ Гн.}$$

- ротора, приведённой к цепи статора

$$L'_2 = L'_{2s} + L_m = 0,00154 + 0,031 = 0,0325 \text{ Гн.}$$

Коэффициент рассеяния

$$s = 1 - \frac{L_m^2}{L_1 \times L'_2} = 1 - \frac{0,031^2}{0,032 \times 0,0325} = 0,082.$$

Эквивалентное сопротивление цепи статора

$$R_{1\text{э}} = R_1 + R'_2 \times \frac{L_m^2}{L'_2{}^2} = 0,093 + 0,082 \times \frac{0,031^2}{0,0325^2} = 0,168 \text{ Ом.}$$

Электромагнитные постоянные времени цепи статора и ротора:

$$T_{1\text{э}} = \frac{\sigma \times L_1}{R_{1\text{э}}} = \frac{0,082 \times 0,032}{0,168} = 0,016 \text{ с.}$$

$$T_2 = \frac{L'_2}{R'_2} = \frac{0,0325}{0,082} = 0,395 \text{ с.}$$

Расчет параметров механической *системы*

Эквивалентный момент инерции привода

$$J_{\text{э}} = J_{\text{дв}} + J_{\text{м}} = 0,46 + 2,4 = 2,86 \text{ кг}\cdot\text{м}^2,$$

где $J_{\text{м}} = 2,4 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ момент инерции вентилятора.

2.7. Расчёт характеристик разомкнутой системы ПЧ-АД и оценка выполнения заданной области работы электропривода

Расчет механических характеристик

1. Механическая характеристика $w(M)$ электродвигателя для значения частоты $f_1 = f_{1H}$ рассчитана по выражениям (2.1) и (2.2) и приведена на рисунке 2.6.

2. При векторном управлении потокосцепление ротора поддерживается постоянным, поэтому зависимость максимального момента электродвигателя при $f_1 \neq f_{1H}$ рассчитана из условия его равенства электромагнитному критическому моменту $M_{дв.макс}(w) = M_{эм.к}(w_k)$ [17]:

$$M_{дв.макс}(w) = M_{эм.к}(f_{1H}) = const,$$

где

$$M_{эм.к}(f_{1H}) = \frac{3U_{1\Phi H}^2}{2w_0 \left[R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_{кН}^2} \right] \left[1 + \frac{\sigma R_1}{X_{\sigma}} \right]} =$$

$$= \frac{3 \times 220^2}{2 \times 104,72 \times [0,093 + \sqrt{0,093^2 + 0,861^2}] \left[1 + \frac{0,093}{9,713} \right]} = 723 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

$$w \neq w_k(f_{1H}),$$

$$w_k(f_{1H}) = w_0 (1 - s_k(f_{1H})) = 104,72 (1 - 0,95) = 94,766 \text{ рад/с},$$

$$s_k(f_{1H}) = R_2' \sqrt{\frac{1 + \frac{\sigma R_1}{X_{\sigma}}}{R_1^2 + (X_{кН})^2}} = 0,082 \sqrt{\frac{1 + \frac{0,093}{9,713}}{0,093^2 + (0,861)^2}} = 0,95.$$

Характеристика $M_{дв.макс}(w)$ приведена на рисунке 2.6.

Расчет электромеханических характеристик

Электромеханическая характеристика электродвигателя $w(I_1)$ рассчитана по выражениям (2.2) и (2.3)–(2.6) для значения частоты $f_1 = f_{1н}$ и приведена на рисунке 2.7

Определение заданной области работы

В плоскости механической характеристики $w(M)$ рисунка 2.6 рассчитаны и построены:

1. Характеристика статического момента полной нагрузки $M_c(w)$:

$$M_c(w) = M_{с.вент}(w) + DM_{с.дв} = 19,332 + 208,103 \times \frac{w}{102,625}^{2,18} + 16,99;$$

2. Зависимость длительно допустимого момента электродвигателя $M_{дв.длит.доп}(w)$ (при $f_1 \leq f_{1н}$, $w \leq w_{дв.н}$) по выражению:

$$M_{дв.длит.доп}(w) = M_{дв.н} \times 0,5 + \frac{w}{w_{дв.н}} + DM_{с.дв} \quad \text{при } w_{эп.мин} \leq w \leq 0,5 \times w_{дв.н};$$

$$M_{дв.длит.доп}(w) = M_{дв.н} + DM_{с.дв} \quad \text{при } 0,5 \times w_{дв.н} < w \leq w_{дв.н},$$

где $M_{дв.н} = 292,325 \text{ Н}\cdot\text{м}$

3. Значение максимального электромагнитного момента нагрузки в точке номинального режима работы вентилятора при скорости $w_H = 102,625$ рад/с.

$$M_{с.макс} = M_{с.вент}(w_H) + DM_{с.дв} = 19,332 + 208,103 \times \frac{102,625}{102,625}^{2,18} + 16,99 = 244,425 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

4. Значение $M_{эп.макс}$ соответствующее максимальному току электропривода $I_{эп.макс}$. Для этого на естественной электромеханической характеристике определено соответствующее

$$I_{\text{Эп. макс}} = I_{\text{И. макс}}$$

значение

скольжения

$$s_{T.1} = \frac{w_0 - w_{T.1}}{w_0} = \frac{104,7 - 102,166}{104,7} = 0,0244 \text{ и при этом скольжении найдено}$$

значение максимального электромагнитного момента

$$M_{\text{Эм. макс}} = \frac{3U_{1\text{фн}}^2 R_2'}{w_0 s_{T.2} (X_{\text{кн}})^2 + R_1 + \frac{R_2'}{s_{T.2}} + \frac{R_1 R_2'}{s_{T.2} X_{\text{м}}^2}} = \frac{3 \times 220^2 \times 0,082}{104,72 \times 0,0244 \times (0,861)^2 + 0,093 + \frac{0,082}{0,0244} + \frac{0,093 \times 0,082}{0,0244 \times 9,713}} = 366,561 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

В плоскости электромеханической характеристики $w(I_1)$ рисунка 2.7 рассчитаны и построены:

1. Зависимость длительно допустимого тока электродвигателя

$I_{\text{дв. длит. доп}}(w)$ по выражениям:

$$I_{\text{дв. длит. доп}}(w) = I_{\text{дв.н}} \times 0,5 + \frac{w}{w_{\text{дв.н}}} \text{ при } w_{\text{Эп. мин}} \leq w \leq 0,5 w_{\text{дв.н}};$$

$$I_{\text{дв. длит. доп}}(w) = I_{\text{дв.н}} \text{ при } 0,5 w_{\text{дв.н}} < w \leq w_{\text{дв.н}},$$

где $I_{\text{дв.н}} = 59,334 \text{ А},$

$w_{\text{Эп. мин}} = 67,754 \text{ рад/с},$

$w_{\text{дв.н}} = 102,625 \text{ рад/с}.$

2. Значение $I_{\text{с. макс}}$, соответствующее длительной максимальной нагрузке $M_{\text{с. макс}}$. Решив относительно s уравнение (2.1)

$$M_{\text{с.макс}} = \frac{3 \times U_{1\text{фн}}^2 \times R_2'}{w_0^2 \times s \times (X_{\text{кн}})^2 + \frac{\omega}{c} R_1 + \frac{R_2'}{s} + \frac{\omega R_1 \times R_2'}{c s \times X_{\text{м}}}} = 244.425 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

$$= \frac{3 \times 220^2 \times 0,082}{104,72^2 \times (0,861)^2 + \frac{\omega}{c} 0,093 + \frac{0,082}{s} + \frac{\omega 0,093 \times 0,082}{c s \times 9,713}}$$

для найденного значения скольжения $s_{T.2} = 0,0154$ по формулам (2.3)–(2.6) определяем значения тока $I_{\text{с.макс}}$, и по выражению (2.2) значение скорости

$$I_2'(s_{T.2}) = \frac{U_{1\text{фн}}}{\pm \sqrt{\frac{\omega}{c} R_1 + \frac{R_2'}{s_{T.2}} + X_{\text{кн}}^2 + \frac{\omega R_1 \times R_2'}{c s_{T.2} \times X_{\text{м}}}}} =$$

$$= \frac{220}{\pm \sqrt{\frac{\omega}{c} 0,093 + \frac{0,082}{0,0154} + 0,861^2 + \frac{\omega 0,093 \times 0,082}{c 0,0154 \times 9,713}}} = 39,6 \text{ А,}$$

$$\sin f_2(s_{T.2}) = \frac{X_{\text{кн}}}{\sqrt{\frac{\omega}{c} R_1 + \frac{R_2'}{s_{T.2}} + X_{\text{кн}}^2}} = \frac{0,861}{\sqrt{\frac{\omega}{c} 0,093 + \frac{0,082}{0,0154} + 0,861^2}} = 0,156,$$

$$I_{\text{с.макс}} = \sqrt{I_0^2 + I_2'^2(s_{T.2}) + 2 \times I_0 \times I_2'(s_{T.2}) \times \sin f_2(s_{T.2})} =$$

$$\sqrt{21,835^2 + 39,6^2 + 2 \times 21,835 \times 39,6 \times 0,156} = 48,12 \text{ А,}$$

$$w_{T.2} = w_0 \times (1 - s_{T.2}) = 104,7 \times (1 - 0,0154) = 103,1 \text{ рад/с.}$$

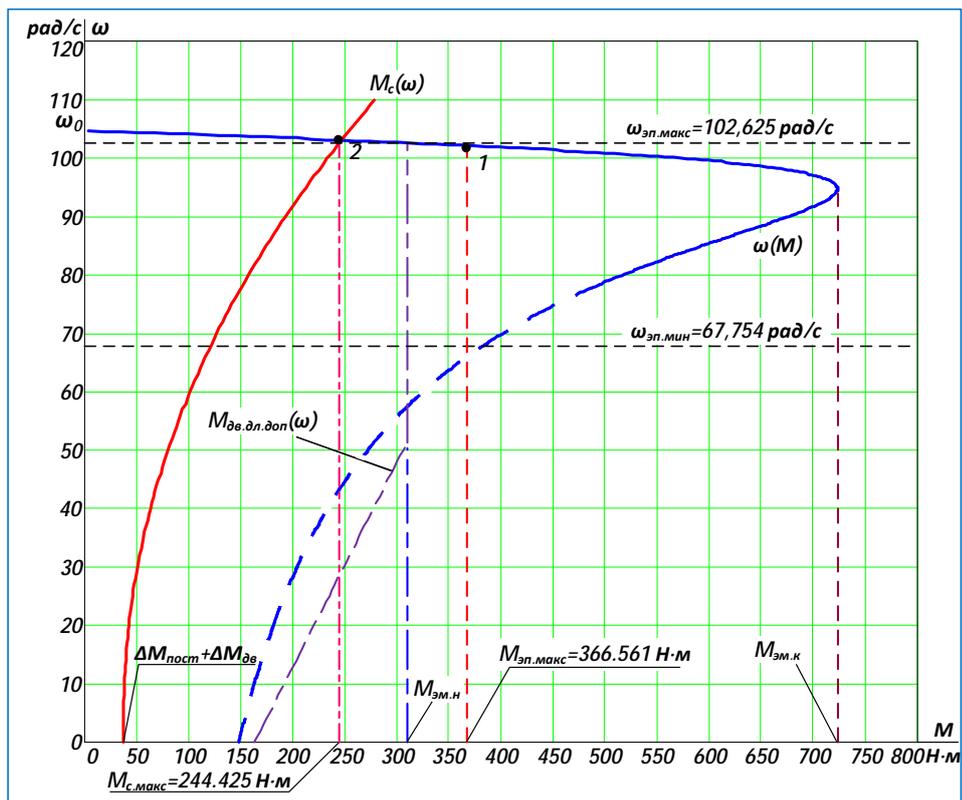


Рисунок – 2.6 Механические характеристики электропривода и нагрузки $w(M)$ при векторном управлении

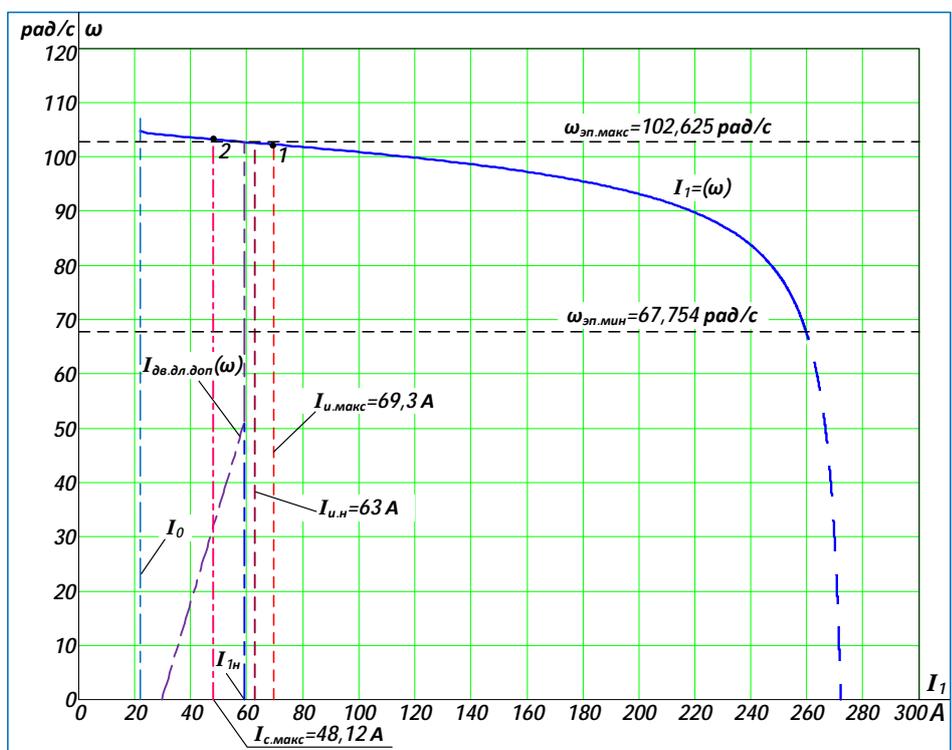


Рисунок 2.7 – Электромеханические характеристики электропривода $w(I_1)$ и нагрузки при векторном управлении

Проверка правильности выбора двигателя

Анализ приведенных на рисунке 2.6 механических характеристик электропривода $\omega(M)$ и нагрузки $M(\omega)$ (рисунок 2.6) показывает, что во всем диапазоне регулирования скорости выполняются условия:

$$\begin{aligned} M_{\text{дв.длит.доп}}(\omega)^3 &\leq M_{\text{с.макс}} \\ M_{\text{дв.макс}}(\omega)^3 &\leq M_{\text{эп.макс}} \end{aligned}$$

следовательно, двигатель по моменту выбран правильно.

По результатам построения электромеханических характеристик электропривода $\omega(I_1)$ (рисунок 2.7) во всем диапазоне регулирования скорости имеем:

$$I_{\text{дв.длит.доп}}(\omega)^3 \leq I_{\text{с.макс}}$$

Во всем диапазоне регулирования скорости, что подтверждает правильность выбора двигателя по току.

Проверка правильности выбора преобразователя

На рисунке 2.7 в плоскости электромеханических характеристик построены характеристики, соответствующие номинальному и максимально допустимому току преобразователя:

$$I_{\text{и.н}} = 63 \text{ А},$$

$$I_{\text{и.макс}} = 69,3 \text{ А}.$$

Анализ приведенных на рисунке 2.7, показывает, что $I_{\text{и.н}}^3 \leq I_{\text{с.макс}}$, следовательно преобразователь по току выбран правильно.

Обеспечение адекватности модели электродвигателя [17]

Оценим адекватность параметров модели и справочных и полученных расчетных параметров электродвигателя. Параметры двигателя, соответствующие справочным данным: $I_{\text{дв.н}} = I_{1\text{ф.н}}; M_{\text{дв.н}}$. Параметры двигателя расчетные: $I_0; I_1(s_{\text{н}}); M_{\text{эм.н}}$ и $U_{2\text{н}}$. За основные параметры электродвигателя примем значения номинального тока $I_{1\text{фн}}$ и номинального электромагнитного момента $M_{\text{эм.н}}$. Решив совместно систему уравнений

$$U_{2\text{н}} = \frac{M_{\text{эм.н}}}{\frac{3}{2} \times p \times \frac{L_{\text{м}}}{L_2} \times \sqrt{2} \times \sqrt{I_{1\text{фн}}^2 - I_0^2}},$$

$$U_{2\text{н}} = \sqrt{2} \times I_0 \times L_{\text{м}}$$

относительно тока I_0 , определим значение тока намагничивания I_0^* , соответствующее параметрам структурной схемы.

Найденное значение $I_0^* = 21,034$ А несущественно отличается от значения расчетного тока намагничивания $I_0 = 21,835$ А.

Рассчитаем параметры структурной схемы, необходимые для оптимизации контуров регулирования:

Значение номинального потокосцепления

$$U_{2d\text{н}}^* = U_{2\text{н}}^* = \sqrt{2} \times I_0^* \times L_{\text{м}} = \sqrt{2} \times 21,034 \times 0,031 = 0,92 \text{ Вб};$$

Значение номинального тока I_{1d}^*

$$I_{1d\text{н}}^* = \sqrt{2} \times I_0^* = \sqrt{2} \times 21,034 = 29,747 \text{ А};$$

Значение номинального тока I_{1q}^*

$$I_{1qH}^* = \sqrt{2} \times \sqrt{(I_{1\phi H})^2 - (I_0^*)^2} = \sqrt{2} \times \sqrt{59,334^2 - 21,034^2} = 78,461 \text{ А};$$

Максимально допустимое значение тока I_{1d}^*

$$I_{1d \text{ макс}}^* = \sqrt{2} \times I_{\text{эп. макс}}^* = \sqrt{2} \times 69,3 = 98 \text{ А}$$

Максимально допустимое значение тока I_{1q}^*

$$I_{1q \text{ макс}}^* = \sqrt{2} \times \sqrt{(I_{\text{эп. макс}}^*)^2 - (I_0^*)^2} = \sqrt{2} \times \sqrt{69,3^2 - 21,034^2} = 95,718 \text{ А},$$

где $I_{\text{эп. макс}}^* = I_{\text{и. макс}} = 69,3 \text{ А}$

2.8. Расчет статических характеристик разомкнутой системы преобразователь частоты - асинхронный двигатель при частотном управлении

Механическая характеристика разомкнутой системы преобразователь частоты – асинхронный двигатель в статическом режиме рассчитана при номинальной частоте f_{1H} , постоянном потокоцеплении ротора $Y_{2d} = Y_{2H}$ и разомкнутой системе регулирования составляющей напряжения двигателя U_{1q} по выражению

$$\begin{aligned} \omega(M) &= \omega_0(f_{1H}) - \text{Ди}(M) = \frac{2p \times f_{1H}}{z_p} - \frac{M}{\frac{3}{2} \times \frac{L_m^2}{L_s^2} \times z_p^2 \times \frac{1}{R_{1\text{э}}} \times Y_{2H}^2}, \\ &= \frac{2p \times 50}{3} - \frac{M}{\frac{3}{2} \times \frac{0,031^2}{0,032^2} \times 3^2 \times \frac{1}{0,168} \times 0,92^2}, \frac{\text{рад}}{\text{с}} \end{aligned}$$

и построена в плоскости механической характеристики $\omega(M_{\text{эм}})$ двигателя.

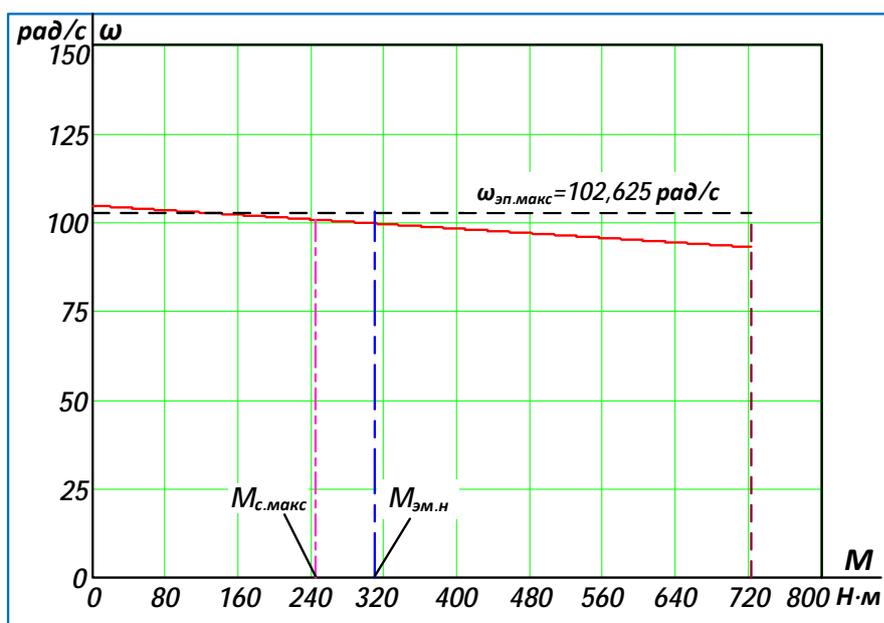


Рисунок 2.8 – Статическая механическая характеристика разомкнутой системы преобразователь частоты – асинхронный двигатель

Электромеханическая характеристика разомкнутой системы преобразователь частоты – асинхронный двигатель в статическом режиме рассчитана при номинальной частоте $f_{1н}$, постоянном потокоцеплении ротора $Y_{2d} = Y_{2н}$ и разомкнутой системе регулирования составляющей напряжения двигателя U_{1q} по выражению

$$\omega(I_{1\phi}) = \frac{2p \times f_{1н}}{z_p} \cdot \frac{\sqrt{2 \times I_{1\phi}^2 - \frac{\alpha Y_{2н} \sigma^2}{\epsilon L_m \delta}}}{\frac{L_m \times z_p \times 1}{L\phi} \times \frac{1}{R_{1\sigma}} \times Y_{2н}}$$

$$= \frac{2p \times 50}{3} \cdot \frac{\sqrt{2 \times I_{1\phi}^2 - \frac{\alpha 0,92 \sigma^2}{\epsilon 0,031 \delta}}}{\frac{0,031}{0,0325} \times 3 \times \frac{1}{0,168} \times 0,92}, \text{ рад/с},$$

где $I_{1\phi} = \frac{1}{\sqrt{2}} \times \frac{Y_{2н}}{L_m}$,

и построена в плоскости электромеханической характеристики $\omega(I_1)$ двигателя.

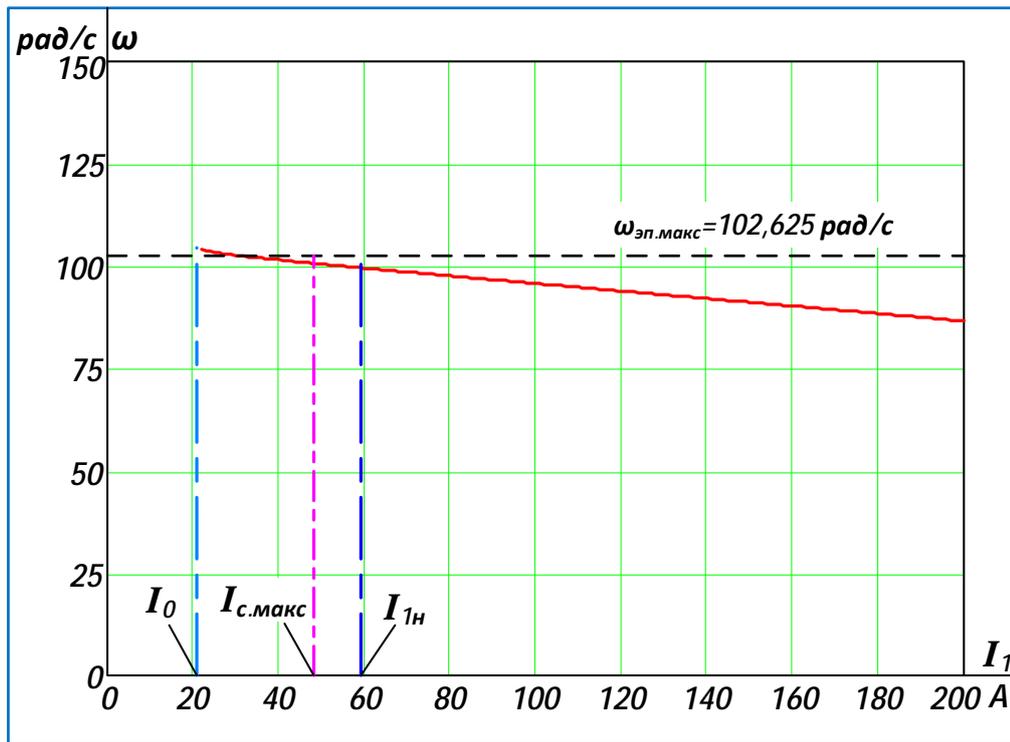


Рисунок 2.9 – Статическая электромеханическая характеристика разомкнутой системы преобразователь частоты – асинхронный двигатель

Выбор напряжения питающей сети асинхронного электропривода с частотным векторным управлением

Поскольку жесткость статических характеристик разомкнутой системы преобразователь – двигатель оказывается меньше жесткости естественных характеристик двигателя, то, очевидно, что необходимо иметь некоторый запас по напряжению питающей сети для обеспечения требуемой максимальной рабочей скорости электропривода и его быстродействия.

Напряжение питающей сети выбираем из следующего условия:

– при скорости двигателя $w^* = w_{\text{эл.макс}}$ преобразователь должен обеспечивать ток $I_{1\phi}^* \approx I_{\text{с макс}}$ (максимальное быстродействие электропривода достигается при выполнении условия $I_{1\phi}^* \approx I_{1\phi \text{ макс}}$).

При выбранных значениях максимальной скорости w^* и тока $I_{1\phi}^*$ рассчитаны требуемые значения:

– составляющей тока I_{1q} двухфазной модели двигателя во вращающейся системе координат d, q

$$I_{1q}^* = \sqrt{2} \times \sqrt{(I_{1\phi}^*)^2 - I_0^2} = \sqrt{2} \times \sqrt{48,118^2 - 21,034^2} = 61,202 \text{ А};$$

– частоты питающего напряжения

$$f_1^* = \frac{1}{2p} \times \frac{\omega}{\omega} \times w^* \times z_p + R_{\phi} \times \frac{L_m}{L_{\phi}} \times \frac{I_{1q}^*}{Y_{2H}} \times \frac{\ddot{\theta}}{\ddot{\theta}}$$

$$= \frac{1}{2p} \times \frac{\omega}{\omega} \times 102,625 \times 3 + 0,082 \times \frac{0,031}{0,0325} \times \frac{61,202}{0,92} \times \frac{\ddot{\theta}}{\ddot{\theta}} = 49,652 \text{ Гц};$$

– составляющей напряжения U_{1d} двухфазной модели двигателя во вращающейся системе координат d, q

$$U_{1d}^* = \frac{\omega R_{1\phi}}{\omega L_m} - R_2' \times \frac{L_m}{L_{\phi}^2} \times \frac{\ddot{\theta}}{\ddot{\theta}} \times Y_{2H} - 2p \times f_1^* \times s \times L_1 \times I_{1q}^* =$$

$$= \frac{\omega \cdot 0,168}{\omega \cdot 0,031} - 0,082 \times \frac{0,031}{0,0325^2} \times \frac{\ddot{\theta}}{\ddot{\theta}} \times 0,92 - 2p \times 49,652 \times 0,082 \times 0,032 \times 61,202 = -47,231 \text{ В};$$

– составляющей напряжения U_{1q} двухфазной модели двигателя во вращающейся системе координат d, q

$$U_{1q}^* = 2p \times f_1^* \times \frac{s \times L_1}{L_m} \times Y_{2H} + \frac{L_m}{L_{\phi}} \times Y_{2H} \times z_p \times w^* + R_{1\phi} \times I_{1q}^* =$$

$$= 2p \times 49,652 \times \frac{0,082 \times 0,032}{0,031} \times 0,092 + \frac{0,031}{0,0325} \times 0,092 \times 3 \times 102,625 + 0,168 \times 61,202 =$$

$$= 304,299 \text{ В};$$

– фазного напряжения трехфазного двигателя

$$U_{1\phi}^* = \frac{1}{\sqrt{2}} \times \sqrt{(U_{1d}^*)^2 + (U_{1q}^*)^2} = \frac{1}{\sqrt{2}} \times \sqrt{(-47,231)^2 + (304,299)^2} = 217,748$$

В;

– напряжения звена постоянного тока преобразователя

$$U_d^* = \sqrt{3} \times \sqrt{2} \times U_{1\phi}^* = \sqrt{3} \times \sqrt{2} \times 217,748 = 533,372 \text{ В};$$

– напряжения питающей сети

$$U_c^* = \frac{U_d^*}{1.35} = \frac{533,372}{1.35} = 395 \text{ В.}$$

Расчет параметров элементов структурной схемы силового канала электропривода

Расчет параметров преобразователя

В простейшем случае без учета ШИМ инвертор представляет собой линейный усилитель с чистым запаздыванием на величину периода широтно-импульсной модуляции $T_{\text{ШИМ}}$

$$T_{\text{и}} = T_{\text{ШИМ}} = \frac{1}{f_{\text{ШИМ}}} = \frac{1}{10000} = 1 \times 10^{-4} \text{ с,}$$

где $f_{\text{ШИМ}} = 10000$ Гц – несущая частота инвертора (частота ШИМ).

Максимальные значения действующего и амплитудного фазного напряжения двигателя принимаем, соответственно, равными:

$$U_{1\phi\text{н}} = 220 \text{ В}; U_{1\phi\text{т}} = \sqrt{2} \times U_{1\phi\text{н}} = \sqrt{2} \times 220 = 311,1 \text{ В.}$$

С учетом ШИМ напряжения инвертора и при соединении обмоток статора двигателя в звезду условие согласования напряжения преобразователя и двигателя

$$U_{d0} \geq \frac{\sqrt{2} \times \sqrt{3} \times U_{1\text{н}}}{g_{\text{макс}}} = \frac{\sqrt{2} \times \sqrt{3} \times 220}{0,95} = 567,25 \text{ В,}$$

где $g_{\text{макс}} < 1$ – максимальное значение коэффициента относительной продолжительности включения ключей инвертора, примем $g_{\text{макс}} = 0,95$ о.е., тогда требуемое значение линейного напряжения источника питания преобразователя

$$U_c = \frac{U_{d0}}{1,35} = \frac{567,25}{1,35, 1,41} = 401, 420 \text{ В};$$

Принимаем коэффициент усиления инвертора

$$k_{\text{и}} = \frac{U_{\text{д}}^*}{\sqrt{3}} = \frac{533,372}{\sqrt{3}} = 307,943.$$

3. СТРУКТУРНАЯ СХЕМА САУ ЭП И НАСТРОЙКА КОНТУРОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ

3.1. Структурная схема линеаризованной непрерывной САУ частотно-регулируемого асинхронного электропривода с векторным управлением

Структурная схема частотно-регулируемого асинхронного электропривода приемника с векторным управлением приведена на рисунке 3.1. Электропривод реализован по схеме с независимым управлением потокосцеплением.

На схеме рисунок 3.1 приняты следующие обозначения:

$W(p)_{\text{рт}}, W(p)_{\text{р}\gamma}, W(p)_{\text{рс}}$ – передаточные функции регуляторов тока, потокосцепления и скорости;

$k_{\text{т}}$ – коэффициент обратной связи по току, 1/А ;

k_{γ} – коэффициент обратной связи по потокосцеплению ротора, 1/Вб ;

$k_{\text{с}}$ – коэффициент обратной связи по скорости, 1/рад/с .

$T_{\text{мто}}, T_{\text{м}\gamma\text{о}}$ и $T_{\text{мсо}}$ – малые постоянные времени цепи обратной связи по току, потокосцеплению и скорости, с

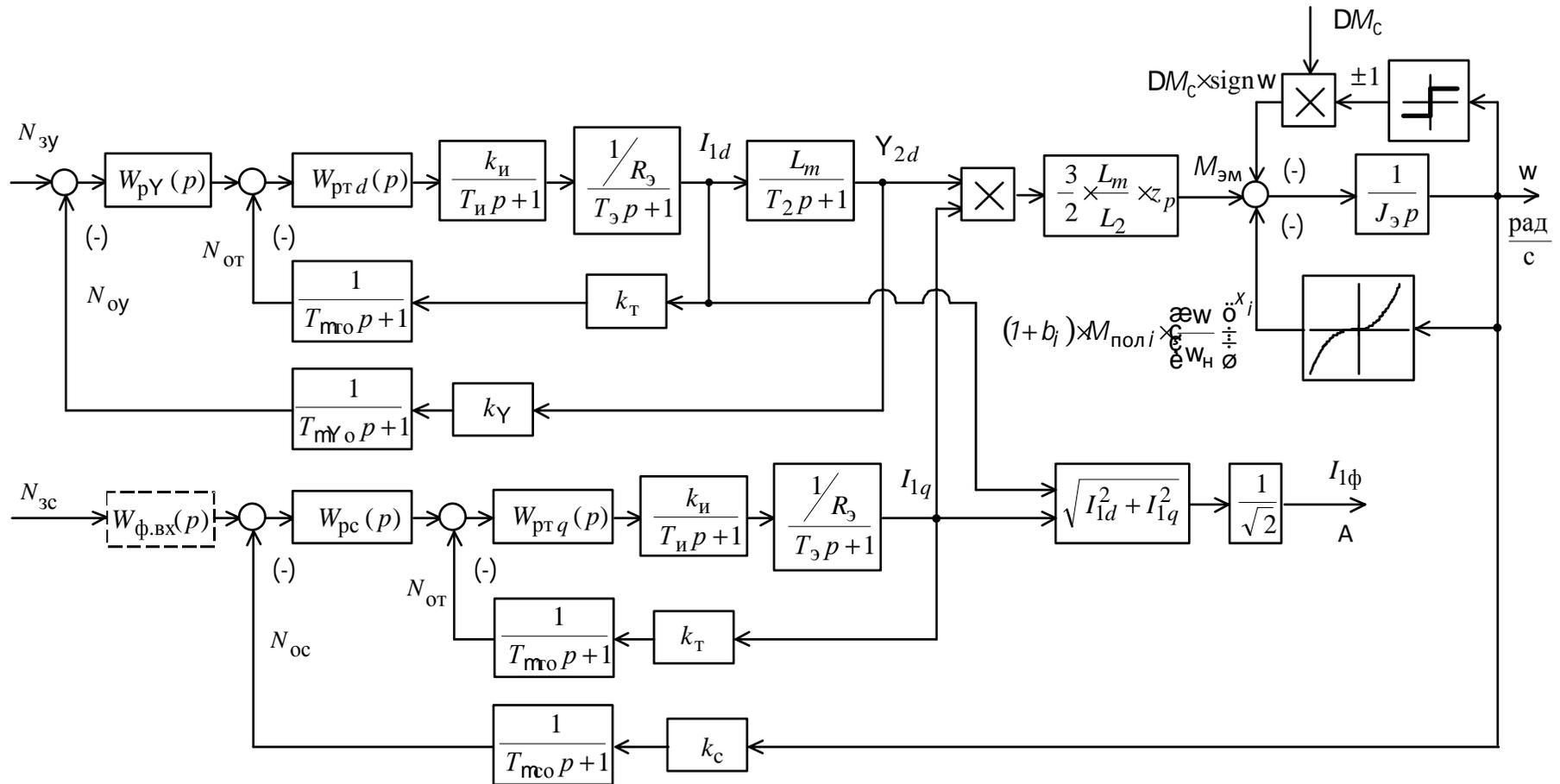


Рисунок 3.1 – Структурная схема линейризованной непрерывной САУ частотно-регулируемого асинхронного электропривода при векторном управлении

3.2 Структурная схема нелинейной САУ регулируемого асинхронного электропривода с векторным управлением

Структурная схема нелинейной непрерывной САУ частотно-регулируемого асинхронного электропривода при векторном управлении приведена на рисунке 3.2. Учтены следующие основные нелинейности элементов системы управления электропривода, двигателя и нагрузки:

– постоянное ограничение выходного сигнала регуляторов тока, в общем случае равно

$$N_{рт.макс} = N_{уп.макс};$$

– постоянное ограничение выходного сигнала регулятора потокосцепления, в общем случае равно

$$N_{p\psi макс} = k_T \times I_{1d макс}^*;$$

– постоянное ограничение выходного сигнала регулятора скорости, в общем случае равно

$$N_{рс.макс} = k_T \times I_{1q макс}^*$$

при постоянном значении допустимого максимального тока электропривода.

– ограничение выходного напряжения инвертора на уровне

$$E_{и.макс} = \sqrt{2} \times U_{1фн}, \text{ В};$$

– внутренние перекрестные обратные связи асинхронного двигателя;

– реактивный вентиляторный характер нагрузки

$$M_c(\omega) = M_c \times \text{sign } \omega, \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

где величина момента M_c изменяется от $(M_{с.вент.мин} + \Delta M_{с.дв})$ до

$(M_{с.вент.макс} + \Delta M_{с.дв})$;

3.3 Оптимизация контуров регулирования САУ электропривода с учетом квантования сигналов

Учет квантования по уровню сигналов в контуре тока

АЦП в цепи обратной связи по току устанавливается для преобразования аналогового сигнала с датчика тока в цифровой сигнал обратной связи по току на вход программно реализуемого цифрового регулятора тока.

Разрядность АЦП в составе датчика тока $n_{\text{ацп.дт}}$ с учетом допустимого перерегулирования тока $s \leq 10\%$ должна удовлетворять условию

$$2^{n_{\text{ацп.дт}}} > \frac{1.1 \times \sqrt{I_{1q \text{ макс}}^{*2} + I_{1d \text{ н}}^{*2}}}{0.5 \times I_{1d \text{ мин}} \times D_T} = \frac{1.1 \times \sqrt{95.718^2 + 29.747^2}}{0.5 \times 29.747 \times 0.03} = 241.6,$$

где

$$I_{1d \text{ мин}} = I_{1d \text{ н}}^* = \frac{y_{2d \text{ н}}^*}{L_m} = 29.747 \text{ А}$$

$D_T < 0.05$ – погрешность измерения тока, определяемая квантованием сигнала по уровню, о.е. Выбираем $D_T = 0.03$

Разрядность АЦП принято $n_{\text{ацп.дт}} = 12$.

Имитационные модели контуров регулирования, учитывающие квантование сигналов обратной связи по уровню и времени и сигналов управления по времени, приведены на рис.3.3 и 3.4.

3.3.1. Оптимизация контура тока с ПИ-регулятором, аналоговым датчиком тока и учетом квантования сигналов в контуре

Контур токов I_{1d} и I_{1q} реализованы по одной схеме и имеют одинаковые параметры (рис.3.3 и 3.4). Аналоговые сигналы с первичных преобразователей тока двух фаз обмотки статора преобразуются с помощью АЦП в цифровые сигналы. В цепи измерения токов могут быть установлены аналоговые сглаживающие фильтры.

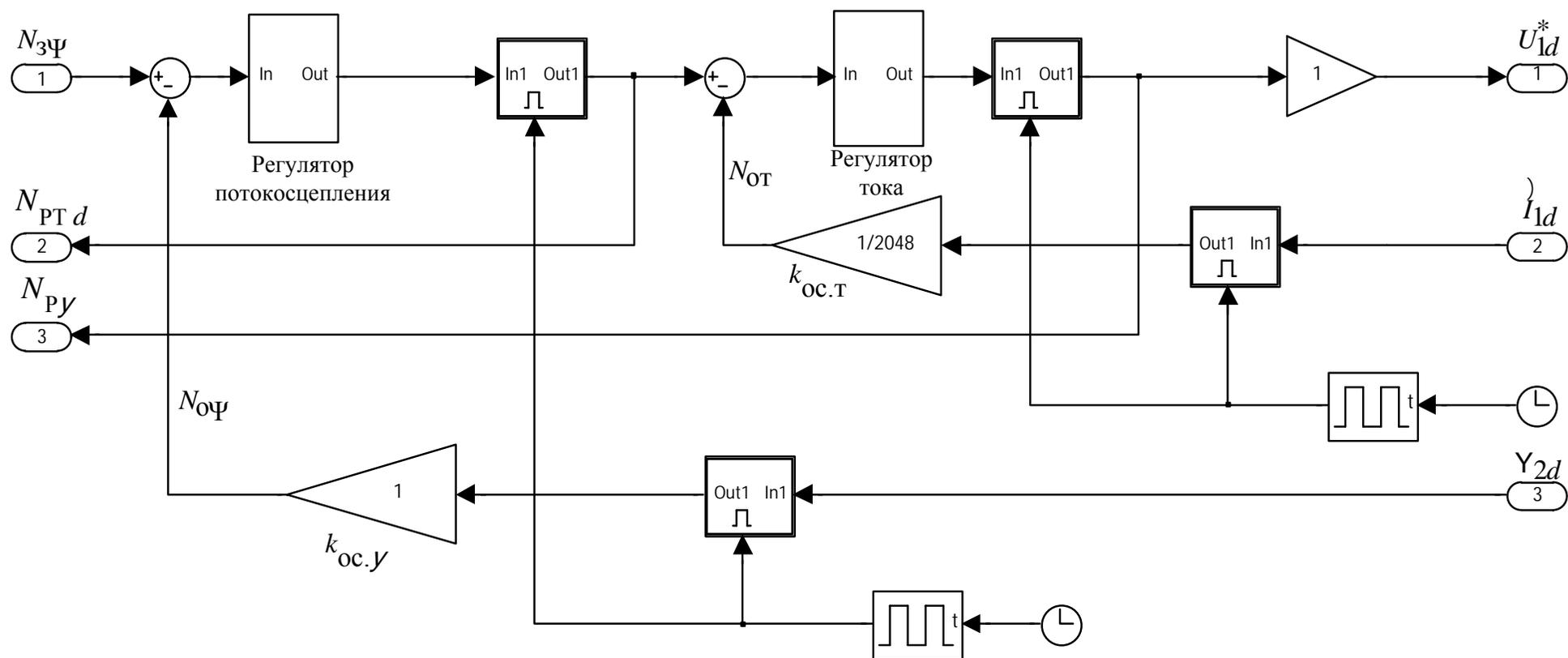


Рисунок 3.3 – Имитационная модель контура регулирования потокосцепления ротора Y_{2d} с внутренним контуром тока

I_{1d}

Параметры элементов контура тока

Коэффициент передачи датчика тока

$$k_{\text{дт}} = \frac{0,5 \times 2^{n_{\text{ацп.дт}}}}{s_{\text{т}} \times (\sqrt{2} \times I_{\text{эп.макс}})} = \frac{0,5 \times 4096}{1,2 \times (\sqrt{2} \times 69,3)} = 17,414 \text{ 1/А},$$

где $s_{\text{т}}$ – коэффициент, учитывающий возможное перерегулирование тока, принято $s_{\text{т}} = 1,2$;

$n_{\text{ацп. дт}}$ – разрядность АЦП датчика тока преобразователя;

Интервал квантования сигналов в цепи обратной связи контура тока

$$T_{\text{ос.т}} = n_{\text{ос.т}} \times T_{\text{шим}} = 1 \times 10^{-4} = 1 \times 10^{-4} \text{ с},$$

где $n_{\text{ос.т}} \geq 1$ – количество периодов модуляции для измерения тока, при частоте, принято $n_{\text{ос.т}} = 1$;

$T_{\text{пк.т}} \approx T_{\text{ос.т}}$ – интервал квантования управления в прямом канале контура тока, с;

$T_{\text{зу.и}} = T_{\text{шим}} = 1 \times 10^{-4} \text{ с}$ – интервал времени задержки подачи управления от регулятора тока к ключам инвертора;

$T_{\text{ф.от}}$ – постоянная времени аналогового фильтра в цепи измерения тока, $T_{\text{ф.от}} = 0$ т.к. фильтр отсутствует;

$N_{\text{зт.макс}}$ – максимальное значение задания на входе контура тока, соответствующее максимальному значению тока электропривода $I_{\text{эп.макс}}$,

в относительных единицах $N_{\text{зт.макс}} = \frac{1}{s_{\text{т}}}$

Расчетные параметры настройки и показатели качества работы контура тока

Передаточная функция ПИ-регулятора тока

$$W(p)_{\text{PT}} = k_{\text{PT}} \times \frac{T_{\text{PT}} \times p + 1}{T_{\text{PT}} \times p}.$$

Параметры настройки регулятора:

– постоянная времени регулятора тока

$$T_{\text{PT}} = T_{1Э} = 0,016 \text{ с};$$

– коэффициент усиления регулятора тока

$$k_{\text{PT}} = \frac{T_{1Э} \times R_{1Э}}{k_{\text{И}} \times k_{\text{T}} \times a_{\text{T}} \times T_{\text{мЭ}}} = \frac{0,016 \times 0,168}{307,943 \times 0,0085 \times 2 \times 1,5 \times 10^{-4}} = 3,334,$$

где

$$k_{\text{T}} = \frac{N_{\text{зт.макс}}}{\sqrt{2} \times I_{\text{Эп.макс}}} = \frac{1}{S_{\text{T}} \times \sqrt{2} \times I_{\text{Эп.макс}}} = \frac{1}{1,2 \times \sqrt{2} \times 69,3} = 0,0085 \text{ 1/А},$$

– коэффициент обратной связи по току;

$$T_{\text{мЭ}} = \frac{T_{\text{ос.т}}}{n_{\text{T}}} + T_{\text{зу.и}} + T_{\text{ф.от}} = \frac{1 \times 10^{-4}}{2} + 1 \times 10^{-4} + 0 = 1,5 \times 10^{-4} \text{ с}$$

– эквивалентная малая постоянная времени оптимизированного контура тока;

$n_{\text{T}} = 1,3$ – коэффициент аппроксимации звена чистого запаздывания апериодическим звеном, принят $n_{\text{T}} = 2$ – настройка контура тока близка к типовой настройке на МО ($\sigma < 5\%$);

$a_{\text{T}} = 2$ – коэффициент типовой настройки контура тока на модульный оптимум (МО).

Достигнуто максимальное быстродействие контура тока, т.к. $T_{\text{ос.т}} = T_{\text{пк.т}} = T_{\text{шим}}$.

Показатели качества работы по управлению контура тока с инерционной обратной связью (без дополнительного фильтра на входе контура) при выборе $a_T = 2$ и $n_T = 2$:

– статическая ошибка по управлению

$$DI_{y.ст} = 0;$$

– полоса пропускания

$$\omega_{п.кт} = \frac{0,71}{T_{мэ}} = \frac{0,71}{1,5 \times 10^{-4}} = 4733,3 \frac{\text{рад}}{\text{с}};$$

– перерегулирование и время первого вхождения в 5%-ю зону при отработке ступенчатого управляющего воздействия:

$$s = 4.3\%, \quad t_{ру1}^{(5)} = t_{ру2}^{(5)} = 4.1 \times T_{мэ} = 4.1 \times 1,5 \times 10^{-4} = 6.15 \times 10^{-4} \text{ с.}$$

Для ограничения управления инвертором на заданном уровне $g_{\text{макс}}$ значения выходных сигналов регуляторов токов I_{1d} и I_{1q} должны удовлетворять условию

$$g_{\text{макс}}^2 = N_{\text{рт}d}^2 + N_{\text{рт}q}^2.$$

В качестве приоритетного выбрано текущее значение выходного сигнала регулятора I_{1d} , тогда допустимое значение его выходного сигнала ограничивается на постоянном уровне

$$N_{\text{рт}d \text{ доп}} = g_{\text{макс}} = 0,95,$$

а допустимое значение выходного сигнала регулятора тока I_{1q} в процессе работы ограничено в соответствии с условием

$$N_{\text{рт}q \text{ доп}} = \sqrt{g_{\text{макс}}^2 - N_{\text{рт}d}^2}.$$

Коэффициент согласования сигналов обратной связи и задания на входе контура тока

$$k_{\text{ос.т}} = \frac{k_T}{k_{\text{дт}}} = \frac{8,503 \times 10^{-3}}{17,414} = 4,883 \times 10^{-4}.$$

3.3.2. Оптимизация контура скорости с ПИ-регулятором и без датчика скорости

Структурная схема линейризованного контура скорости с ПИ-регулятором приведена на рисунке 3.5.

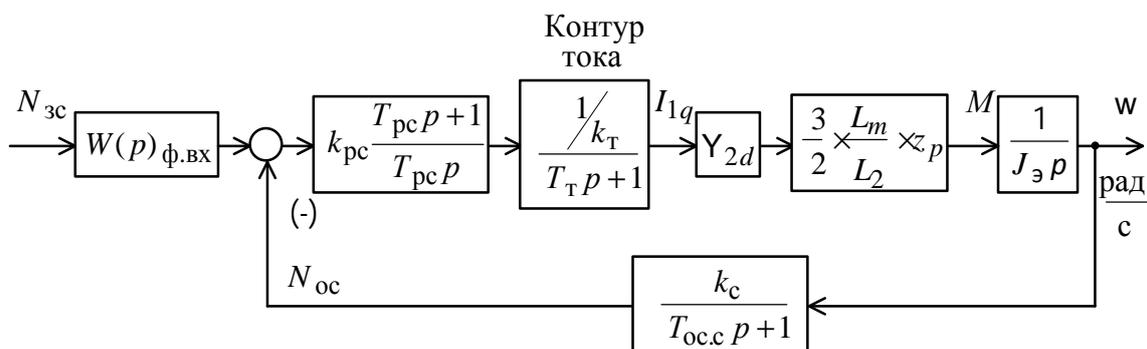


Рисунок 3.5 – Структурная схема линейризованного контура скорости с ПИ-регулятором

Внутренний оптимизированный замкнутый контур тока представлен усеченной передаточной функцией 1-го порядка

$$W(p)_{\text{т.зам}} \approx \frac{1}{k_T} \frac{1}{T_T p + 1},$$

где

$T_T = a_T \times T_{\text{мэ}} = 2 \times 1,5 \times 10^{-4} = 3 \times 10^{-4}$ с – эквивалентная постоянная времени оптимизированного контура тока.

Параметры элементов контура скорости в электроприводе без датчика скорости

$k_{\text{дс}} = 1$ – коэффициент передачи датчика скорости, с/рад,

s_c – коэффициент, учитывающий возможное перерегулирование скорости, принято $s_c = 1,5$;

$T_{oc.c} = n_{oc.c} \times T_{шим} = 10 \times 10^{-3} = 1 \times 10^{-2}$ с – интервал квантования по времени сигналов в цепи обратной связи контура скорости, где $n_{oc.c}$ – 1 целое число, принято $n_{oc.c} = 10$;

$T_{пк.с} \leq T_{oc.c}$ – интервал квантования управления в прямом канале контура скорости, с;

$T_{ф.ос}$ – постоянная времени аналогового фильтра в цепи измерения скорости, $T_{ф.от} = 0$ с, т.к. фильтр отсутствует;

$N_{зс.макс}$ – максимальное значение задания на входе контура скорости, соответствующее значению максимальной скорости привода $n_{эп.макс}$, в относительных единицах $N_{зс.макс} = \frac{1}{s_c}$.

Расчетные параметры настройки контура скорости в электроприводе без датчика скорости

Передаточная функция ПИ-регулятора скорости:

$$W(p)_{pc} = k_{pc} \times \frac{T_{pc}p + 1}{T_{pc} \times p}$$

Параметры настройки регулятора скорости:

– постоянная времени регулятора

$$T_{pc} = b_c \times a_c \times T_{мэ} = 2 \times 2 \times 8 \times 10^{-4} = 3,2 \times 10^{-3} \text{ с};$$

– коэффициент усиления регулятора

$$k_{pc} = \frac{J_{э} \times k_T}{c_M \times k_c \times a_c \times T_{мэ}} = \frac{2,86 \times 0,0085}{3,942 \times 0,0065 \times 2 \times 8 \times 10^{-4}} = 593,49,$$

где

$$c_M = \frac{3}{2} \times \frac{L_m}{L_2} \times Y_{2H} \times z_p = \frac{3}{2} \times \frac{0,031}{0,032} \times 0,92 \times 3 = 3,942 \text{ Н·м/А} -$$

коэффициент электромагнитного момента двигателя при номинальном значении потокосцепления ротора;

$$k_c = \frac{N_{зс.макс}}{W_{\Omega П.макс}} = \frac{1}{S_c \times W_{\Omega П.макс}} = \frac{1}{1,5 \times 02,625} = 0,0065 \text{ с/рад}$$

– коэффициент обратной связи по скорости;

$$T_{m\Omega} = T_T + \frac{T_{oc.c}}{n_c} + T_{\phi.oc} = 3 \times 10^{-4} + \frac{1 \times 10^{-3}}{2} + 0 = 8 \times 10^{-4} \text{ с}$$

– эквивалентная малая постоянная времени оптимизированного контура скорости;

$n_c = 1, 3$ – коэффициент аппроксимации звена чистого запаздывания аperiодическим звеном, принят $n_c = 2$ – настройка контура близка к настройке на СО;

$b_c = a_c = 2$ – коэффициенты типовой настройки контура скорости на симметричный оптимум (СО) с ПИ-регулятором.

Ограничение перерегулирования в контуре скорости с ПИ-регулятором достигается установкой на входе контура инерционного фильтра (рисунок 3.5) с постоянной времени

$$T_{\phi.вх} = T_{pc}, (T_{pc} + \frac{T_{oc.c}}{n_c} + T_{\phi.oc}) = 3,2 \times 10^{-3}, 3,7 \times 10^{-3} \text{ с.}$$

Установка на входе контура скорости инерционного фильтра одновременно с уменьшением перерегулирования уменьшает и быстродействие контура.

Для ограничения тока двигателя на заданном уровне $I_{1макс}$ значения выходных сигналов регуляторов потокосцепления и скорости в общем случае должны удовлетворять условию

$$N_{зт.макс}^2 = N_{pY}^2 + N_{pc}^2.$$

В качестве приоритетного выбрано текущее значение выходного сигнала регулятора потокосцепления, тогда допустимое значение выходного сигнала регулятора скорости в процессе работы должно поддерживаться в соответствии с условием

$$N_{\text{рс. доп}} = \sqrt{N_{\text{зт. макс}}^2 - N_{\text{рУ}}^2}.$$

Коэффициент согласования сигналов обратной связи и задания на входе контура скорости

$$k_{\text{ос.с}} = k_{\text{с}}.$$

Допустимое значение сигнала управления на входе контура скорости

$$N_{\text{зс. доп}} = k_{\text{с}} \times \omega_{\text{эл. макс}} = 0,0065 \times 102,625 = 0,667.$$

В электроприводе без датчиков потока и скорости, оказалось невозможным обеспечить предельное быстродействие электропривода и его пришлось ограничить, задавшись значением минимальной допустимой полосы пропускания $f_{\text{рЭП}} = 30$ Гц.

Определение полосы пропускания электропривода

Для настройки контура на выбранную полосу пропускания $f_{\text{рЭП}} = 30$ Гц параметры настройки ПИ-регулятора выбираем из следующих условий:

$$T_{\text{рс2}} = \frac{2,82}{\omega_{\text{рЭП}}} = \frac{2,82}{157,08} = 0,015 \text{ с,}$$

где $\omega_{\text{рЭП}} = 2\rho f_{\text{рЭП}} = 2\rho \times 30 = 157,08$ рад/с ;

$$k_{\text{рс2}} = \frac{2 \times J_{\text{э}} \times k_{\text{т}}}{Y_{2d} \times \frac{3}{2} \times \frac{L_m}{L_{\text{с}}} \times z_p \times k_{\text{с}} \times T_{\text{рс2}}} = \frac{2 \times 2,86 \times 0,0085}{0,92 \times \frac{3}{2} \times \frac{0,031}{0,0325} \times 3 \times 0,0065 \times 0,015} = 126,91,$$

При полосе пропускания $f_{\text{рЭП}} = 30$ Гц коэффициент усиления регулятора уменьшится в

$$\frac{k_{\text{рс}}}{k_{\text{рс2}}} = \frac{593,49}{157,08} \gg 4,6 \text{ раз,}$$

а постоянная времени регулятора увеличится в $\frac{T_{pc2}}{T_{pc}} = \frac{0,015}{3,2 \times 10^{-3}} \gg 4,6$ раз.

Полоса пропускания определяется при достижении системой следующих параметров:

– амплитуда выходного сигнала в 0.707 раз меньше амплитуды входного сигнала

– отставание по фазе выходного сигнала от входного составляет 90° .

График переходного процесса обработки гармонического задания $N_{3c}(t) = (0,667 \times 0,005) \sin 2p25$ представлен на рисунке 3.6.

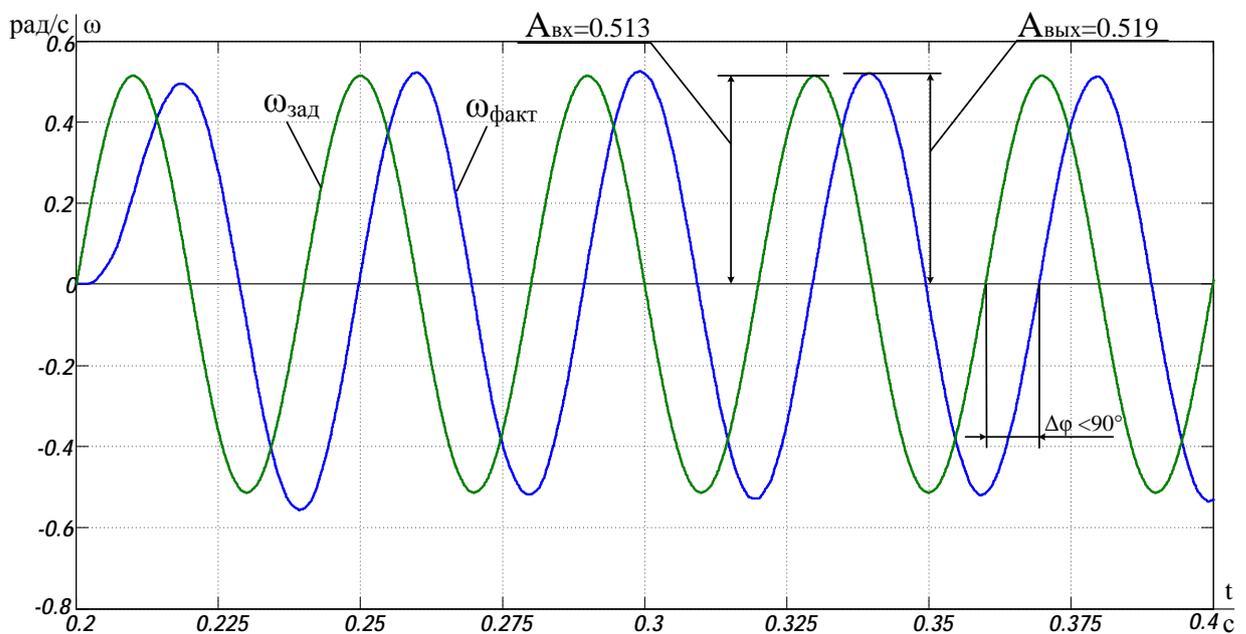


Рисунок 3.6 – Диаграмма заданной и фактической скорости $\omega = f(t)$ при частоте входного сигнала 25 Гц.

Электропривод обрабатывает частоту входного сигнала $f_{рЭП} = 25$ Гц

Графики переходного процесса при обработке ступенчатых заданий $N_{3c}(t) = (0,667 \times 0,005)$ и $N_{3c}(t) = (0,667 \times 0,05)$ представлены на рисунке 3.7а и 3.7б соответственно.

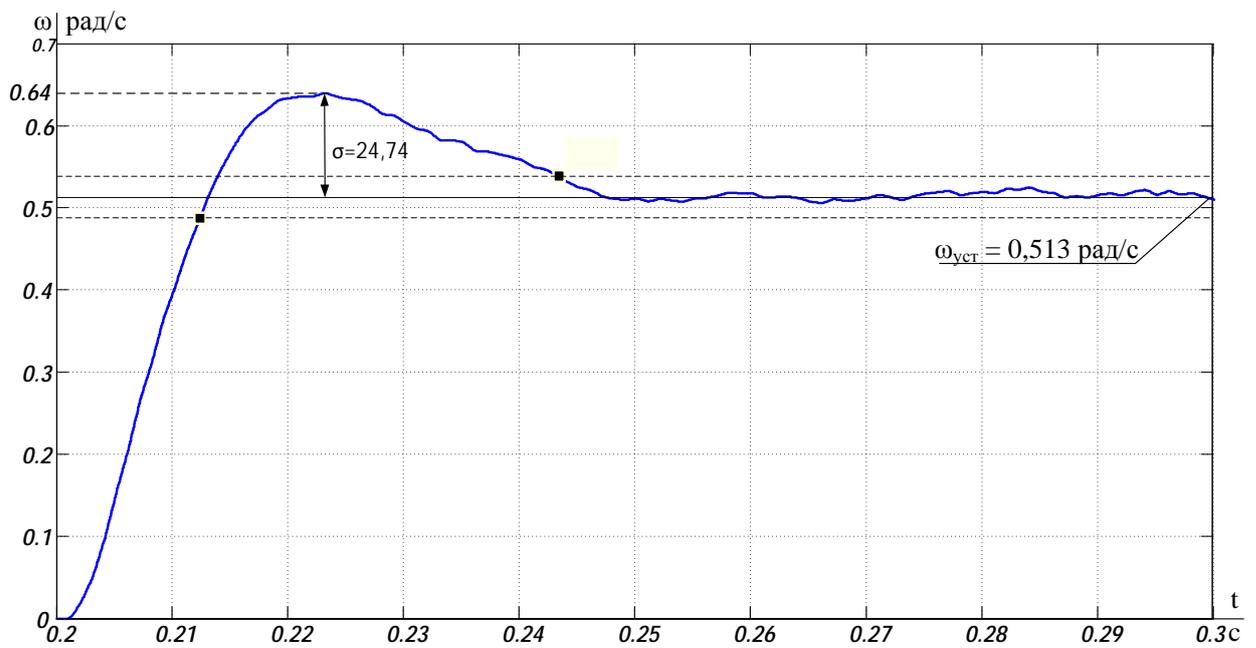


Рисунок 3.7а – Переходный процесс в контуре скорости при обработке ступенчатого задания при диапазоне регулирования $D = 1:200$.

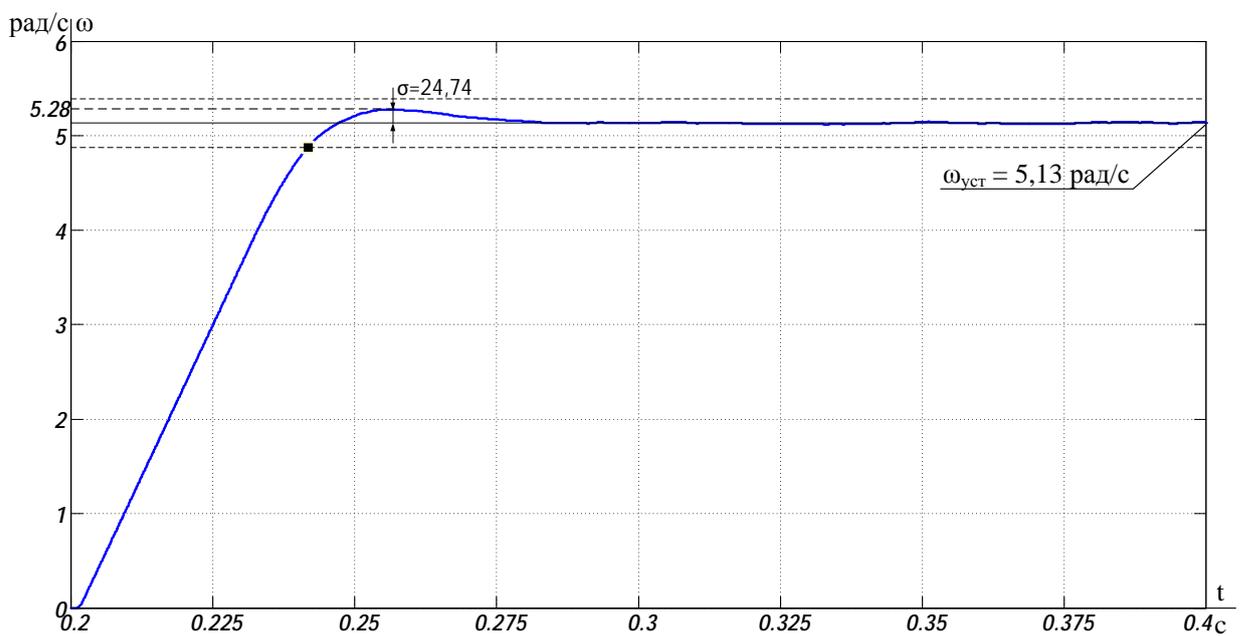


Рисунок 3.7б – Переходный процесс в контуре скорости при обработке ступенчатого задания при диапазоне регулирования $D = 1:20$.

Контур скорости при обработке ступенчатых управляющих воздействий при ступенчатом задании скорости $N_{3c}(t) = (0,667 \times 0,005)$ имеет перерегулирование 24,74 %, при большем задании $N_{3c}(t) = (0,667 \times 0,05)$ перерегулирование уменьшается и составляет меньше 5%.

3.3.3. Оптимизация контура потокосцепления ротора с ПИ-регулятором без датчика потока

Имитационная модель контура потокосцепления без датчика потока приведена на рис. 3.3.

Внутренний оптимизированный замкнутый контур тока представлен усеченной передаточной функцией 1-го порядка

$$W(p)_{T.зам} \approx \frac{1}{T_T \times p + 1},$$

где

$T_T = a_T \times T_{m\Omega} = 2 \times 1,5 \times 10^{-4} = 3 \times 10^{-4}$ с – эквивалентная постоянная времени оптимизированного контура тока.

Параметры элементов контура потокосцепления без датчика потока

$k_{д\Upsilon} = 1 \frac{1}{B\delta}$ – коэффициент передачи датчика потока;

s_{Υ} – коэффициент, учитывающий возможное перерегулирование потока, выбрано $s_{\Upsilon} = 1,2$;

$T_{ос.\Upsilon} = n_{ос.\Upsilon} \times T_{шим} = 10 \times 1 \times 10^{-4} = 1 \times 10^{-3}$ с – интервал квантования по времени сигналов в цепи обратной связи контура потокосцепления,

где $n_{oc.Y} \in \mathbb{Z}^+$ 1 целое число, выбрано $n_{oc.Y} = n_{oc.c} = 10$;

$T_{пк.Y} \in T_{oc.Y}$ – интервал квантования управления в прямом канале контура потокосцепления, с;

$T_{ф.о.Y}$ – постоянная времени аналогового фильтра в цепи измерения потока, $T_{ф.о.Y} = 0$ с, т.к. фильтр отсутствует;

$N_{3Y.макс}$ – максимальное значение задания на входе контура потокосцепления, соответствующее значению номинального потокосцепления ротора двигателя Y_{2H} , в относительных единицах $N_{3Y.макс} = \frac{1}{s_Y}$.

Расчетные параметры настройки контура потокосцепления с аналоговым датчиком

Передаточная функция ПИ-регулятора потокосцепления

$$W(p)_{pY} = k_{pY} \times \frac{T_{pY} \times p + 1}{T_{pY} \times p}$$

Параметры настройки регулятора потокосцепления ротора:

– постоянная времени регулятора

$$T_{pY} = T_2 = 0,395 \text{ с};$$

– коэффициент усиления регулятора

$$k_{pY} = \frac{T_2 \times k_T}{L_m \times k_Y \times a_Y \times T_{m\Delta}} = \frac{0,395 \times 0,0085}{0,031 \times 0,906 \times 2 \times 8 \times 10^{-4}} = 74,847,$$

где

$$k_Y = \frac{N_{3Y.макс}}{Y_{2H}} = \frac{1}{s_Y \times Y_{2H}} = \frac{1}{1,2 \times 0,92} = 0,906 \text{ 1/Вб}$$

– коэффициент обратной связи по потоку;

$$T_{m\chi_{\text{э}}} = T_{\text{T}} + \frac{T_{\text{ос.}\chi}}{n_{\chi}} + T_{\text{ф.о}\chi} = 3 \times 10^{-4} + \frac{1 \times 10^{-3}}{2} + 0 = 8 \times 10^{-4} \text{ с}$$

– эквивалентная малая постоянная времени оптимизированного контура потокосцепления;

$n_{\chi} = 1, 3$ – коэффициент аппроксимации звена чистого запаздывания апериодическим звеном, принят $n_{\chi} = 2$ – настройка контура близка к типовой настройке на МО ($s \gg 5\%$);

$a_{\chi} = 2$ – коэффициент типовой настройки контура потокосцепления на модульный оптимум (МО).

Коэффициент согласования выходного сигнала обратной связи и задания на входе контура потокосцепления

$$k_{\text{ос.}\chi} = k_{\chi}.$$

Допустимое значение сигнала управления на входе контура потокосцепления

$$N_{3\chi} = k_{\chi} \times \chi_{2\text{н}} = 0,906 \times 0,92 = 0,833.$$

Допустимое значение выходного сигнала регулятора потокосцепления ротора ограничено на постоянном уровне

$$N_{\text{р}\chi \text{ доп}} = N_{\text{зт. макс}} = k_{\text{T}} \times \sqrt{2} \times I_{\text{эп. макс}} = 0,0085 \times \sqrt{2} \times 69,3 = 0,833.$$

4. РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ВЕНТИЛЯТОРА И ЕЁ ИССЛЕДОВАНИЕ

4.1. Имитационные исследования нелинейной САУ регулируемого электропривода

Модели регулируемого асинхронного электропривода с частотным векторным управлением реализуются на основе схем:

- функциональной с моделью двухфазного двигателя (рисунок 4.1);
- функциональной с моделью трехфазного инвертора напряжения с ШИМ (рисунок 4.2).
- структурной схемы нелинейной непрерывной САУ частотно-регулируемого асинхронного электропривода с точной моделью двухфазного асинхронного двигателя при векторном управлении (рисунок 4.3).

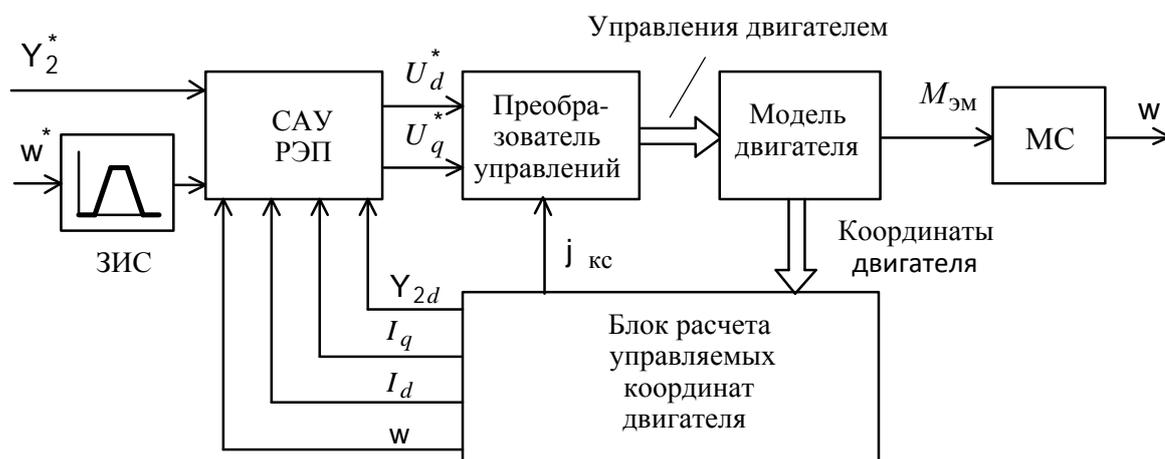


Рисунок 4.1 – Функциональная схема имитационной модели асинхронного электропривода с частотным векторным управлением и моделью двухфазного двигателя без датчиков потока и скорости

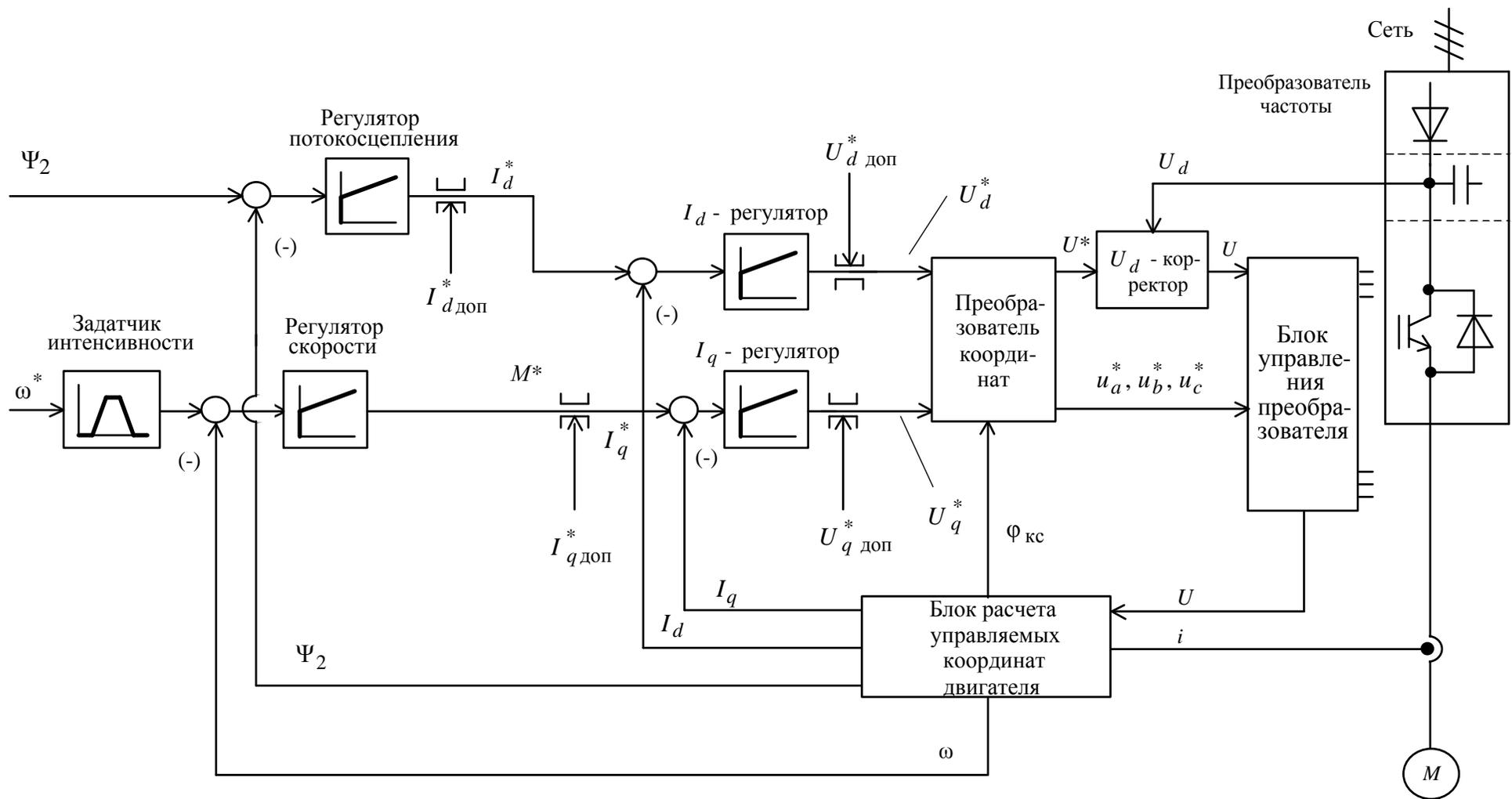


Рисунок 4.2 – Функциональная схема асинхронного электропривода с частотным векторным управлением и моделью трехфазного инвертора напряжения с ШИМ без датчиков потока и скорости

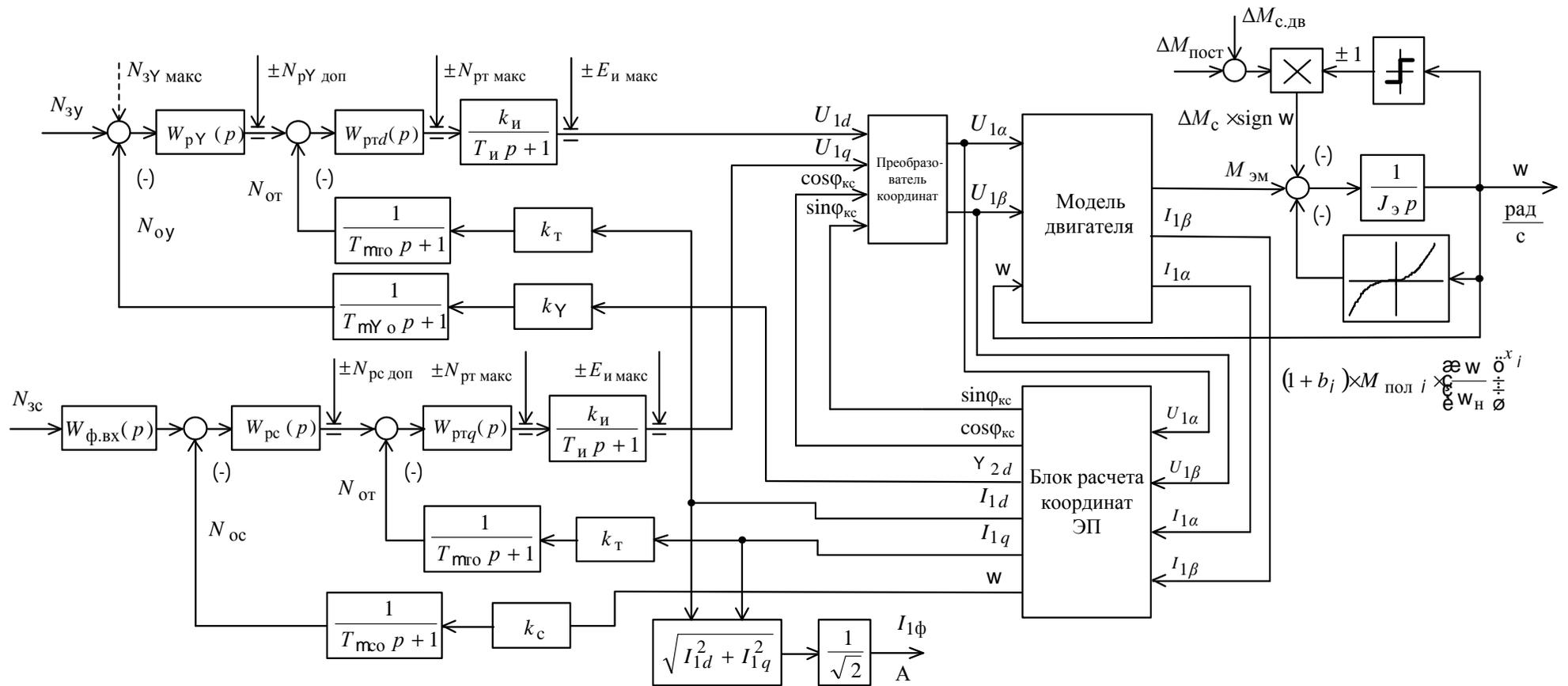


Рисунок 4.3– Структурная схема нелинейной непрерывной САУ частотно-регулируемого асинхронного электропривода при векторном управлении с точной моделью двухфазного асинхронного двигателя без датчика потока и скорости

Имитационная модель нелинейной САУ регулируемого электропривода

Схема набора имитационной модели нелинейной САУ регулируемого электропривода, составленная на основании структурной схемы рисунок 4.3, приведена на рисунке 4.4.

В состав имитационной модели нелинейной САУ регулируемого электропривода рисунок 4.4 входят суперблоки:

– имитационная модель двухфазного асинхронного электродвигателя в неподвижной системе координат (рисунок 4.5);

– имитационная модель ПИ-регулятора скорости с управляемым значением ограничения выходного сигнала (рисунок 4.6);

– имитационная модель ПИ-регулятора тока I_q с положительной обратной связью по скорости двигателя и управляемым значением ограничения выходного сигнала (рисунок 4.7);

– имитационная модель ПИ-регулятора потокосцепления и тока I_d с ограничением интегральной составляющей в режиме насыщения (рисунок 4.8);

– имитационная модель одномассовой механической системы с моментом нагрузки реактивного характера (рисунок 4.9);

– имитационная модель блока расчета координат электропривода (рисунок 4.10);

– Имитационная модель блока расчета потокосцеплений ротора в неподвижной системе координат α, β по измеренным значениям токов i_{1a}, i_{1b} и расчетным значениям напряжений управления u_{1a}, u_{1b} (рисунок 4.11);

– имитационная модель блока расчета потокосцепления ротора ψ_{2d} и угла положения координатной системы j_{kc} по расчетным значениям токов i_{1a}, i_{1b} и скорости вращения двигателя (рисунок 4.12);

– имитационная модель преобразователя напряжений статора двухфазного двигателя из вращающейся координатной системы d, q в неподвижную систему координат α, β (рисунок 4.13 *a*) и из неподвижной системы координат α, β во вращающуюся координатную систему d, q (рисунок 4.13 *б*);

– имитационная модель преобразователя координат из неподвижной двухфазной координатной системы α, β в неподвижную трехфазную систему координат a, b, c (рисунок 4.14 *a*) и из неподвижной трехфазной системы координат a, b, c в неподвижную двухфазную координатную систему α, β (рисунок 4.14 *б*);

– формирователя фазного тока двигателя $I_{1\phi}$ (рисунок 4.15);

– блок формирования нагрузки (рисунок 4.16)

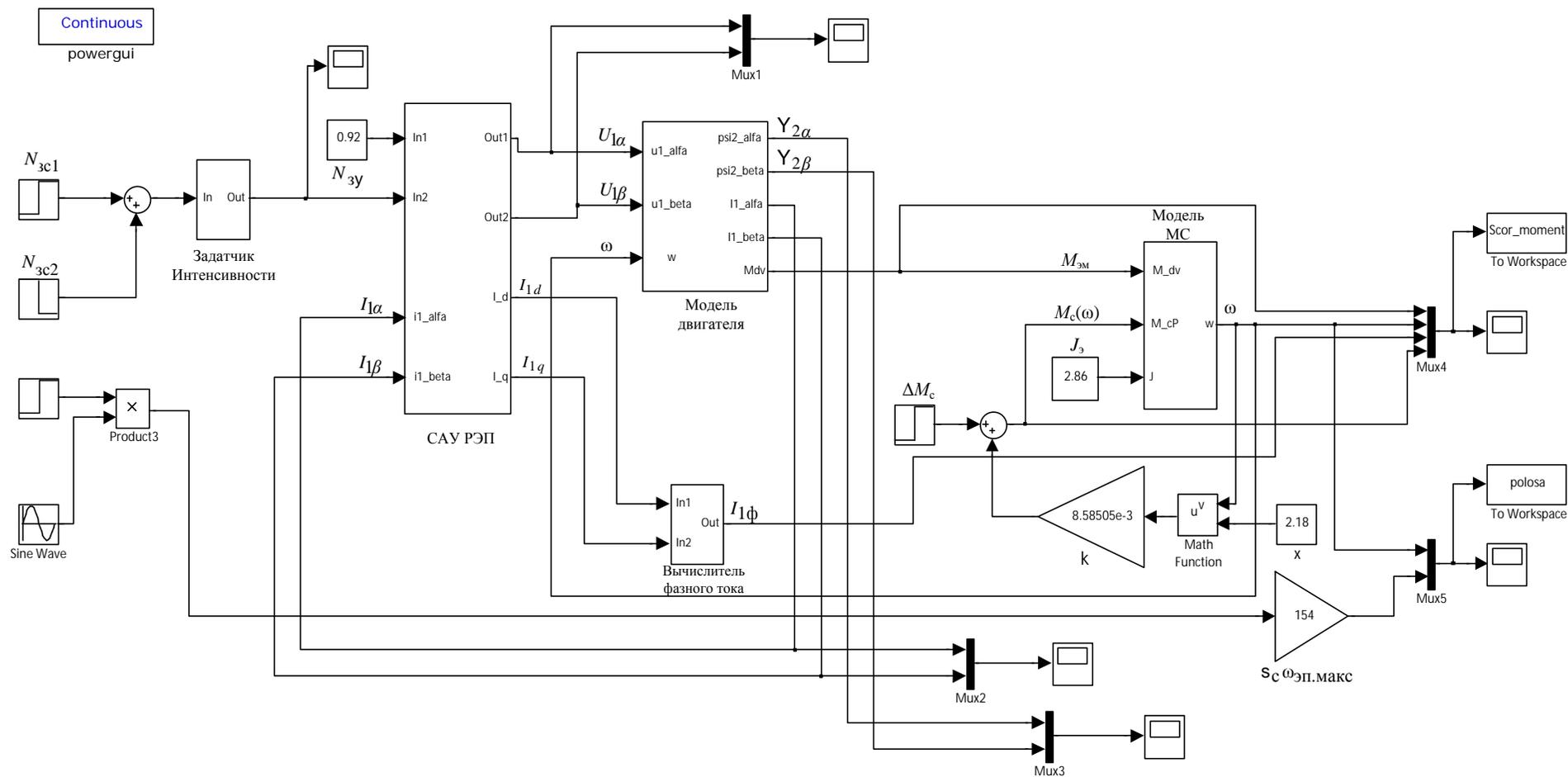


Рисунок 4.4 – Имитационная модель частотно-регулируемого асинхронного электропривода без датчиков потока и скорости

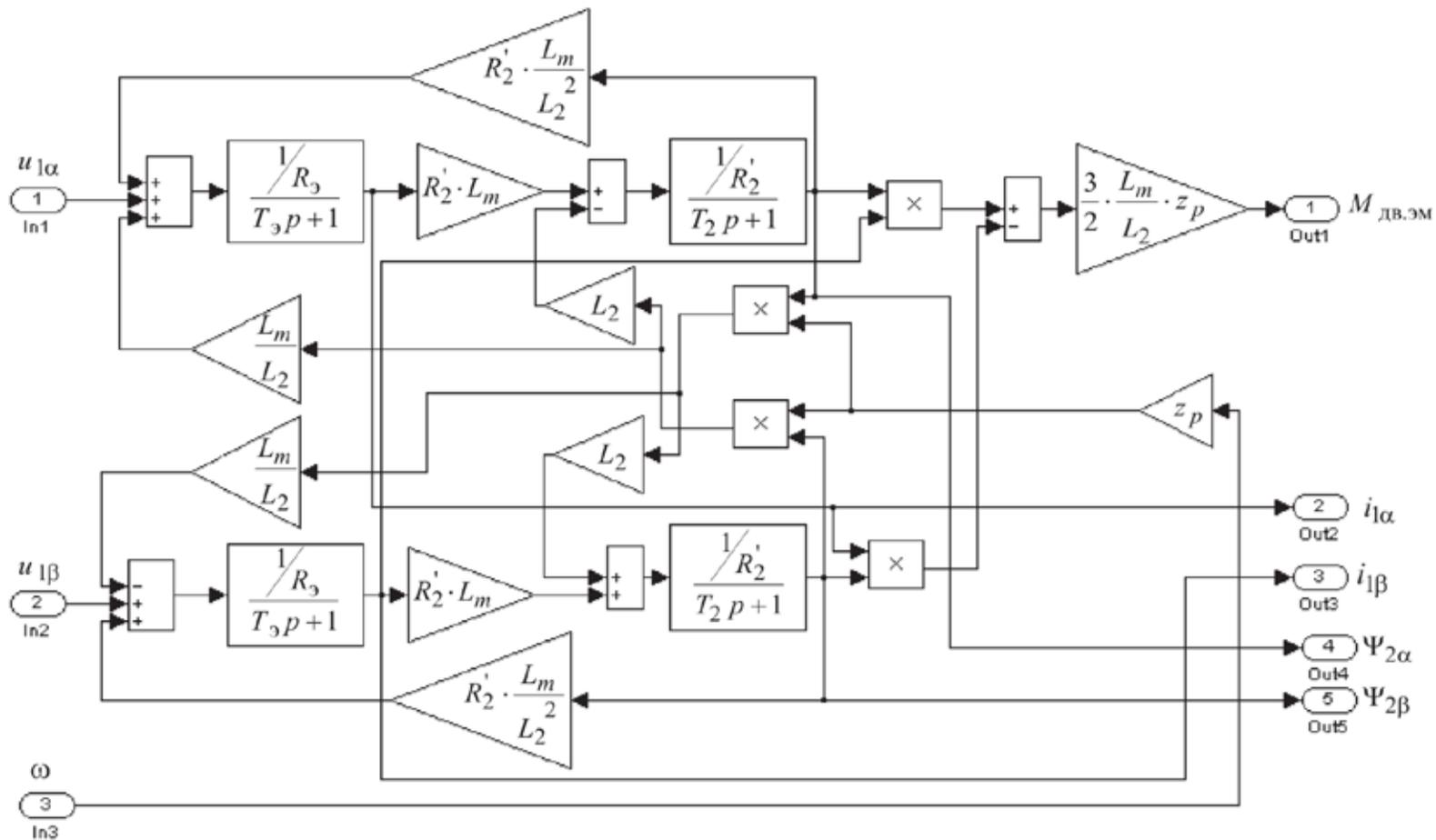


Рисунок 4.5 – Имитационная модель электрической части двухфазного асинхронного электродвигателя в неподвижной системе координат α, β

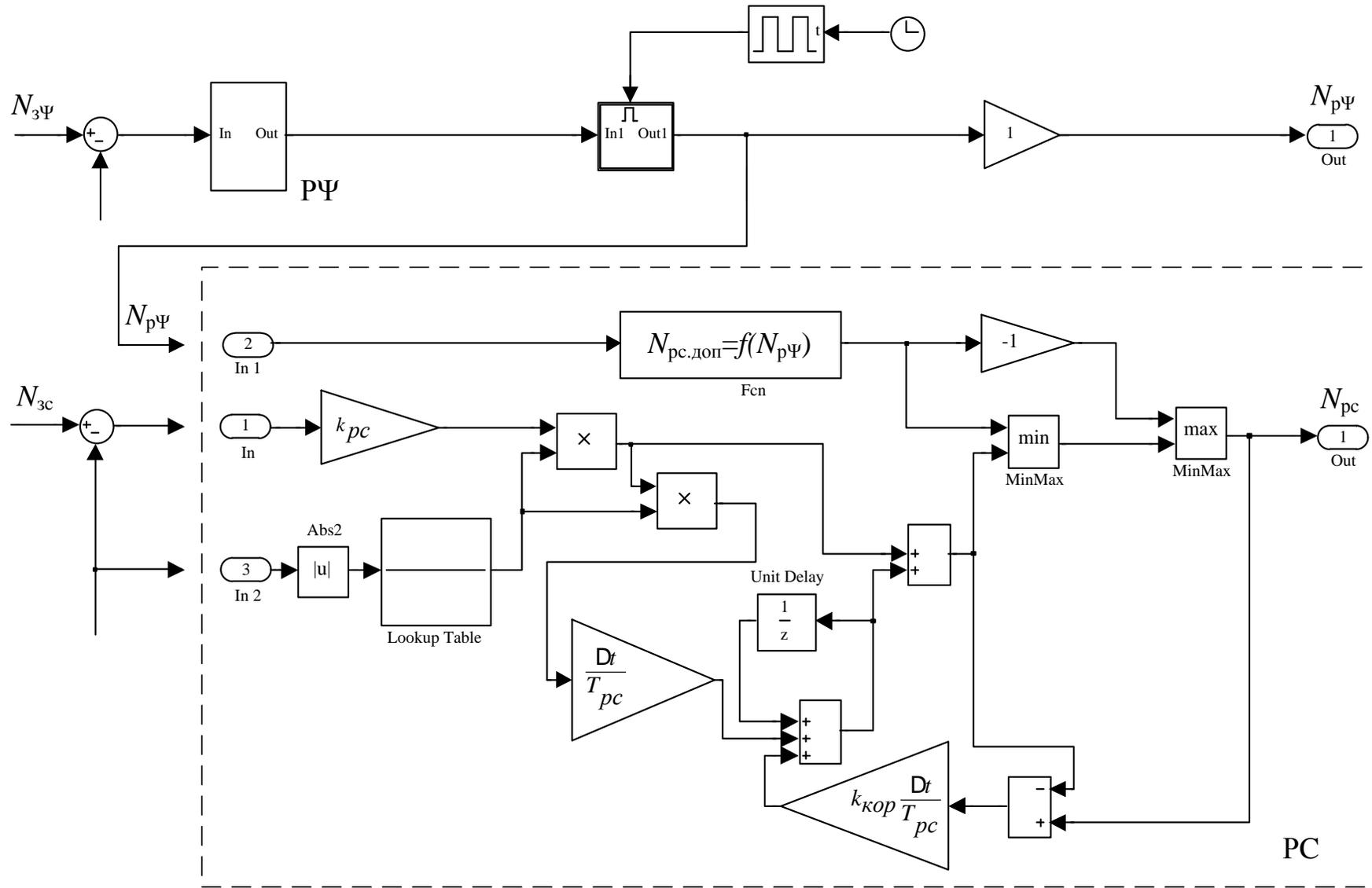


Рисунок 4.6 – Имитационная модель адаптивного ПИ-регулятора скорости с управляемым значением ограничения Выходного сигнала

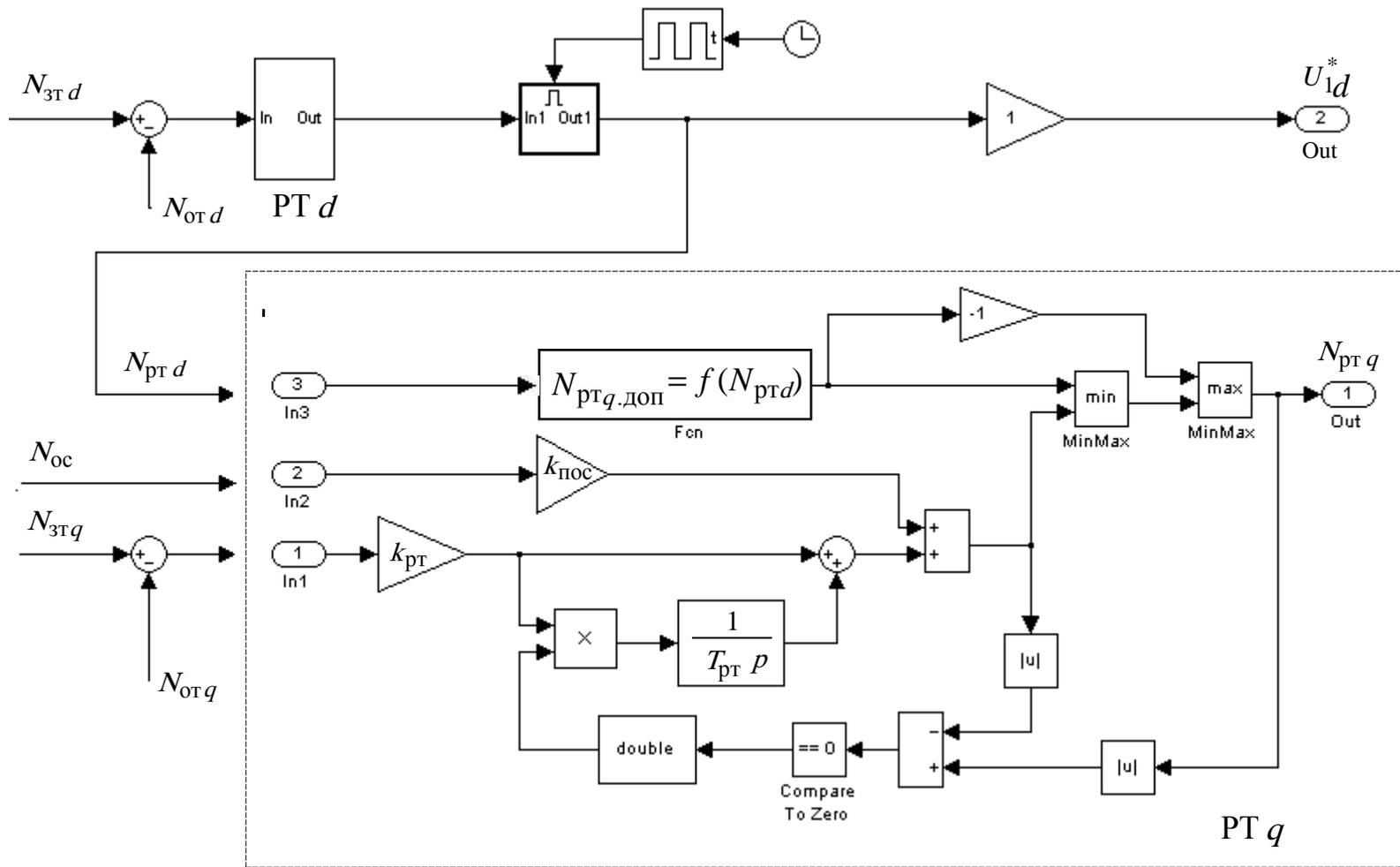


Рисунок 4.7 – Имитационная модель ПИ-регулятора тока I_q с положительной обратной связью по скорости двигателя и управляемым значением ограничения выходного сигнала

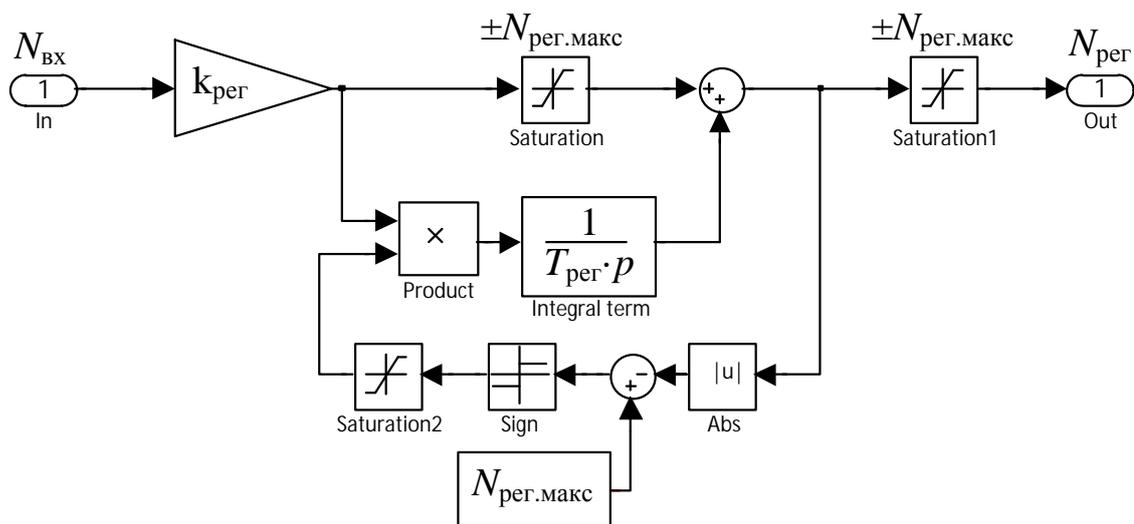


Рисунок 4.8 – Имитационная модель ПИ-регулятора потокосцепления и тока I_d с ограничением интегральной составляющей в режиме насыщения

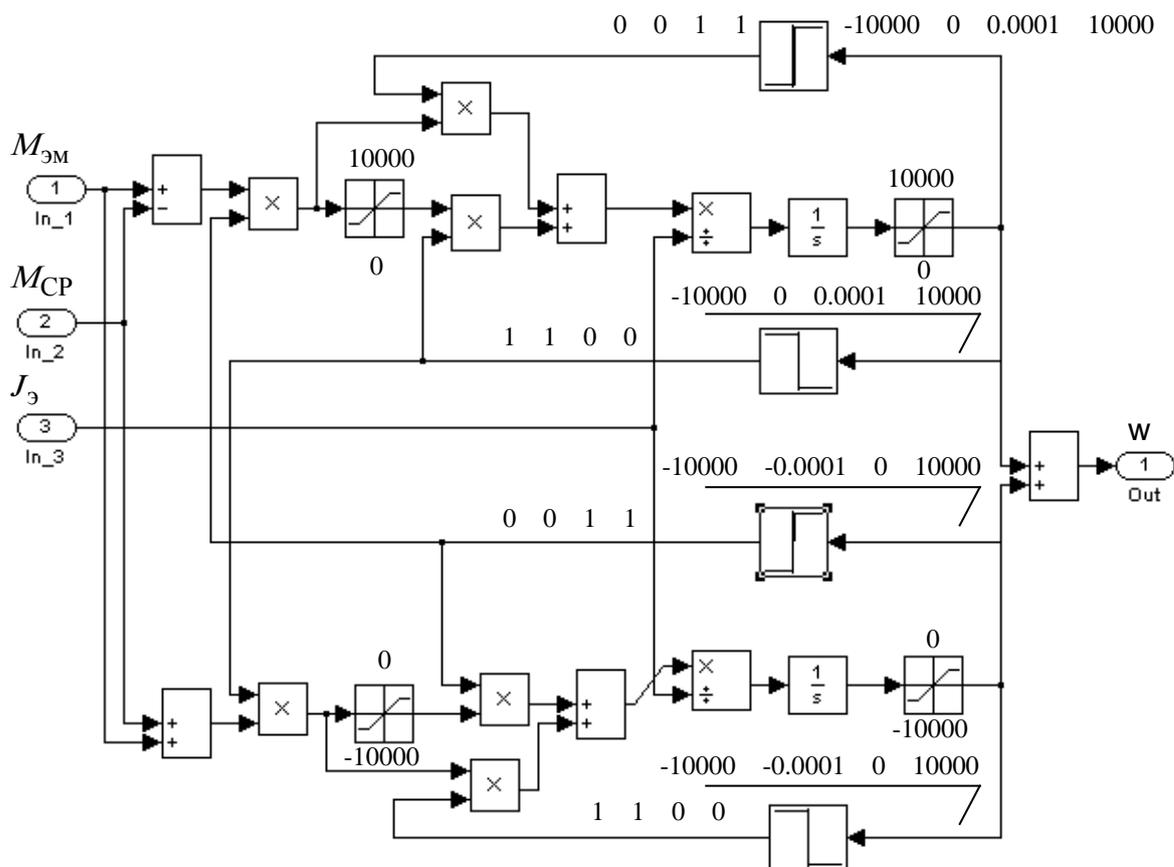


Рисунок 4.9 – Имитационная модель одномассовой механической системы с моментом нагрузки реактивного характера

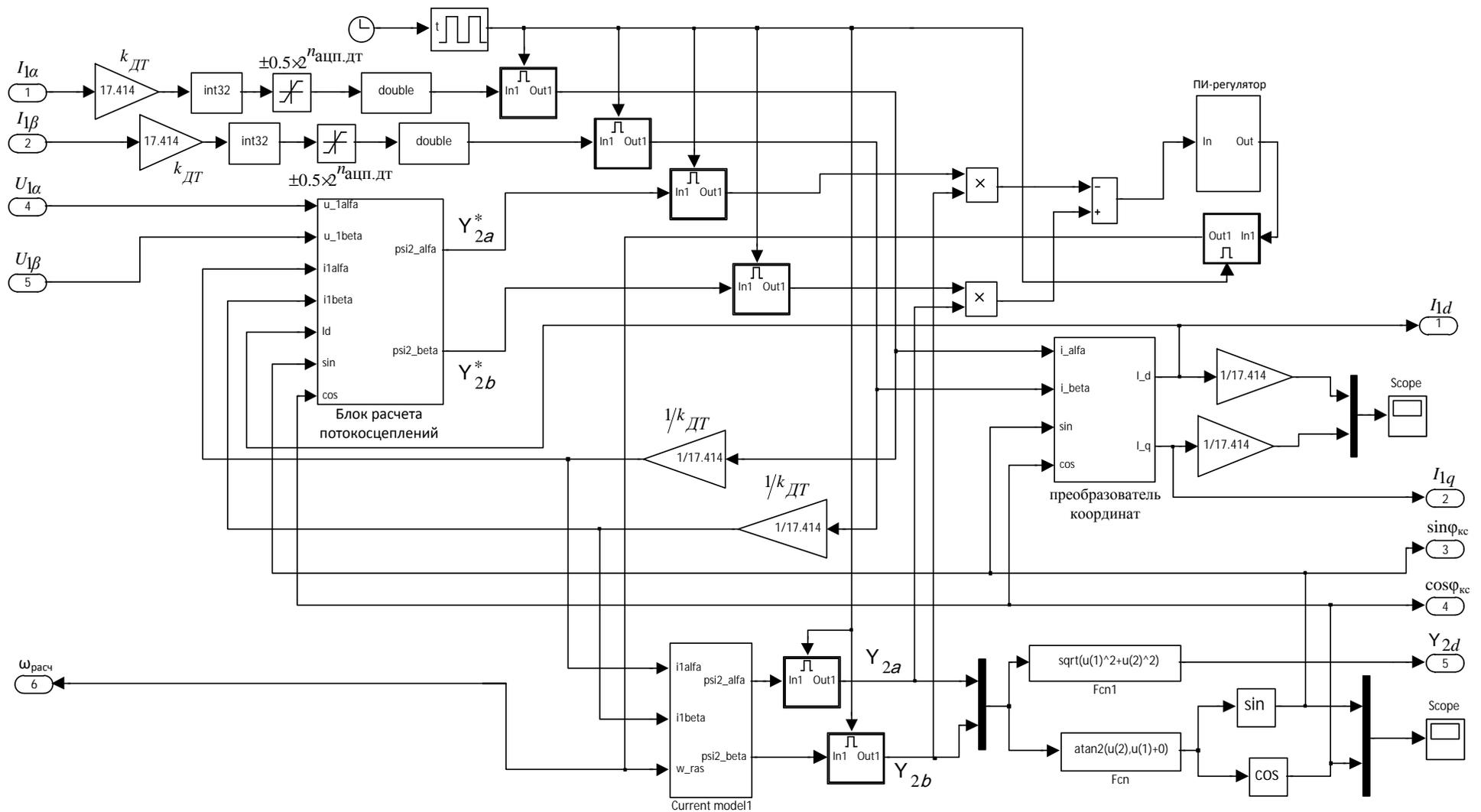


Рисунок 4.10 – Имитационная модель блока расчета координат электропривода

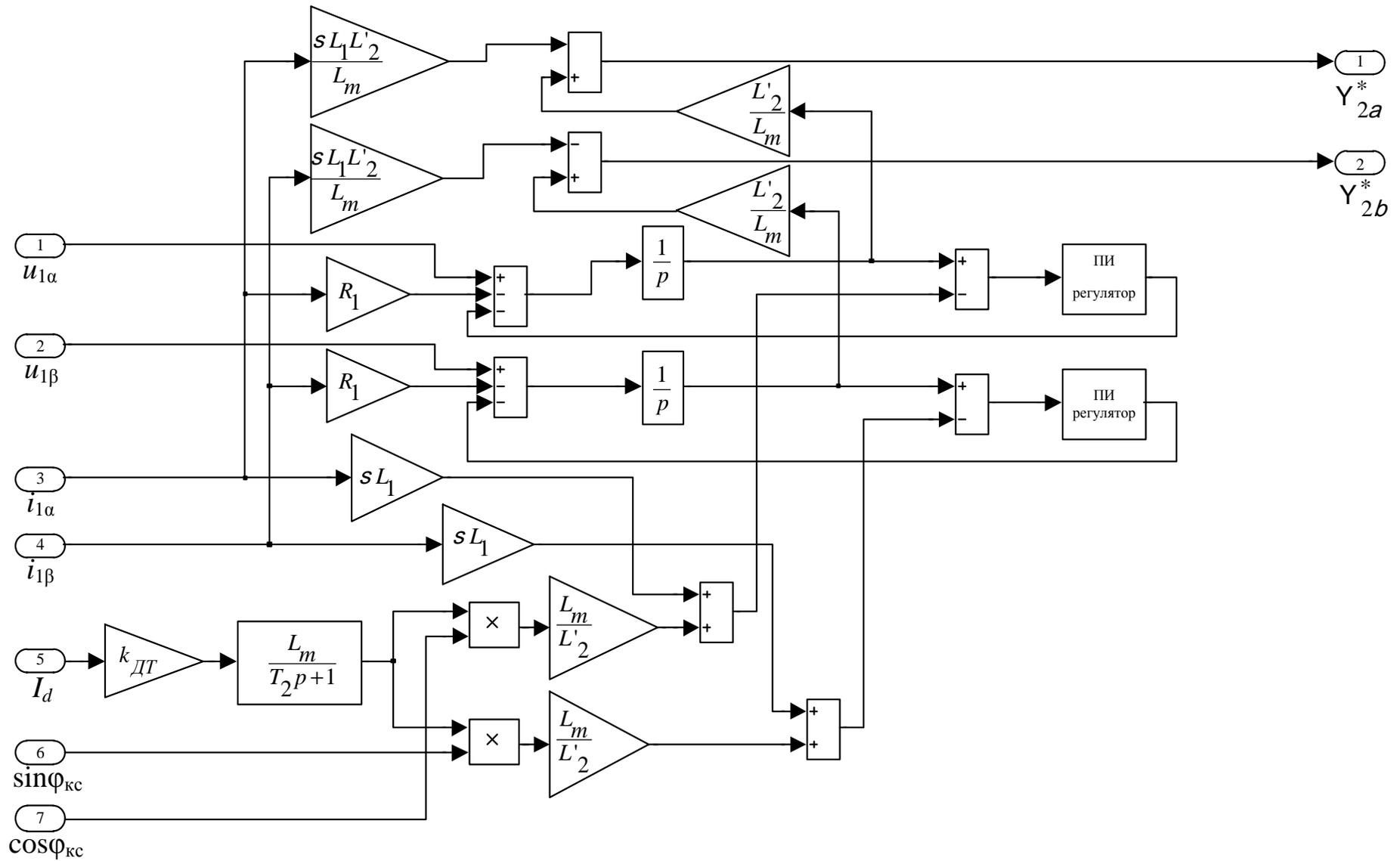


Рисунок 4.11 – Имитационная модель блока расчета потокосцеплений ротора в неподвижной системе координат α, β по измеренным значениям токов i_{1a}, i_{1b} и расчетным значениям напряжений управления u_{1a}, u_{1b}

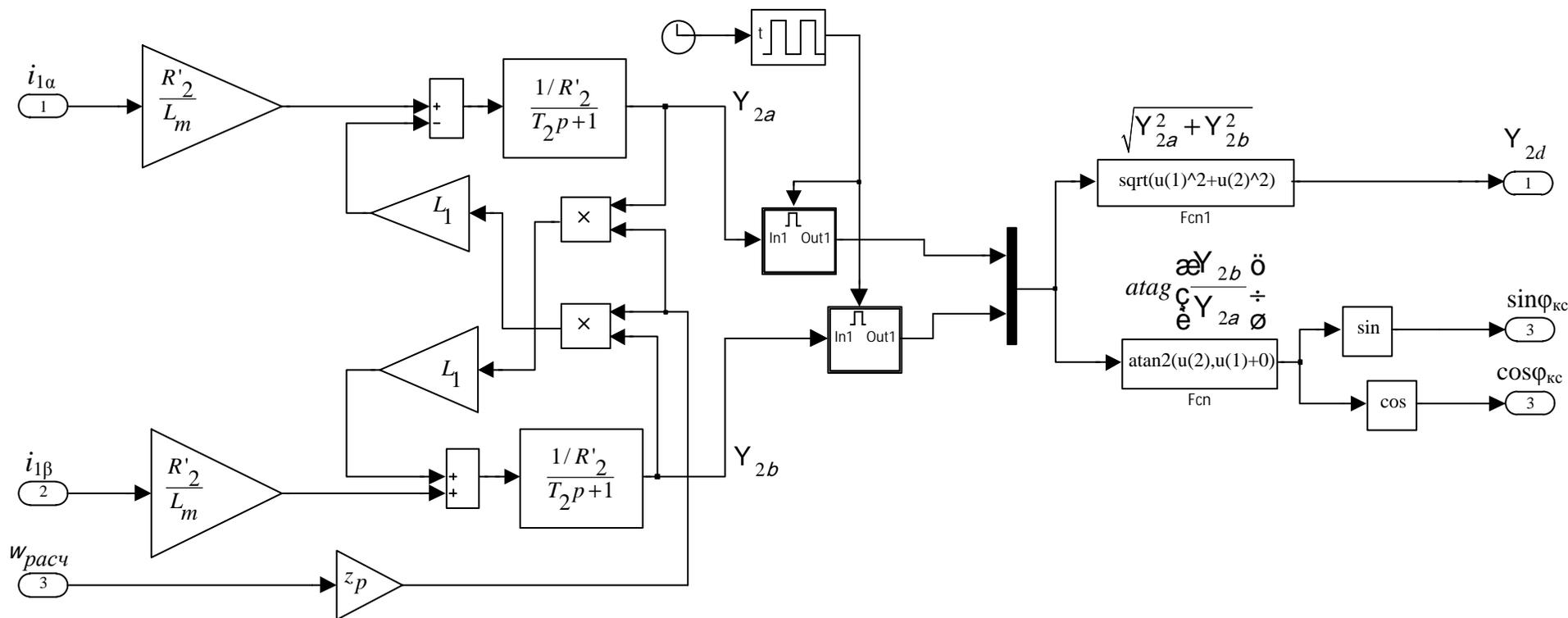


Рисунок 4.12 – Имитационная модель блока расчета потокосцепления ротора Y_{2d} и угла положения координатной системы $j_{кc}$ по измеренным значениям токов i_{1a} , i_{1b} и расчетной скорости вращения двигателя

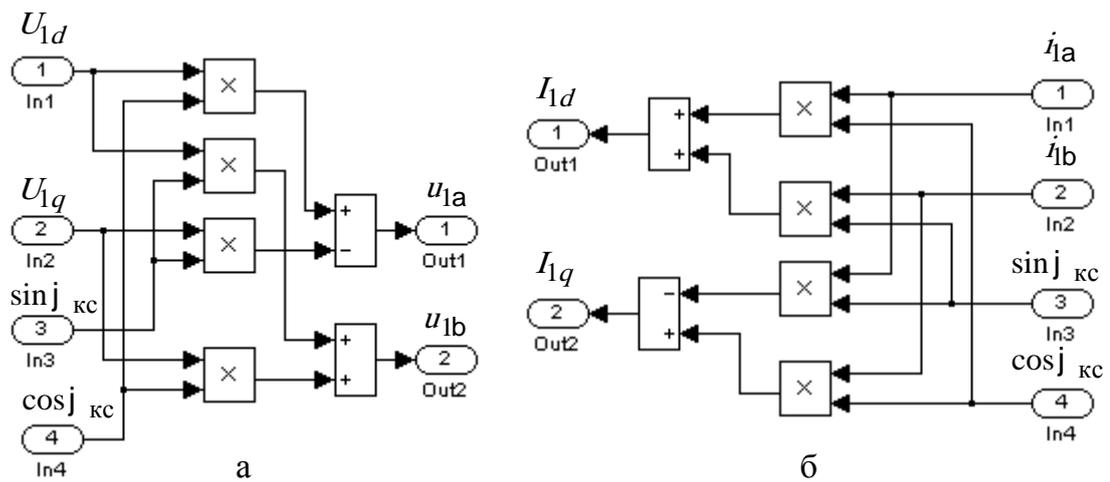


Рисунок 4.13 – Имитационная модель преобразователя координат: *a* – из вращающейся координатной системы *d, q* в неподвижную систему координат *α, β*; *б* – из неподвижной системы координат *α, β* во вращающуюся координатную систему *d, q*

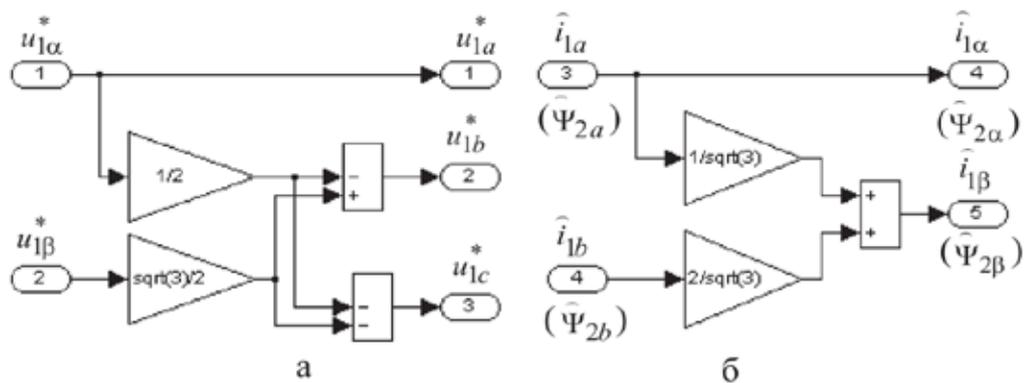


Рисунок 4.14 – Имитационная модель преобразователя координат: *a* – из неподвижной двухфазной координатной системы *α, β* в неподвижную трехфазную систему координат *a, b, c*; *б* – из неподвижной трехфазной системы координат *a, б, с* в неподвижную двухфазную координатную систему *α, β*

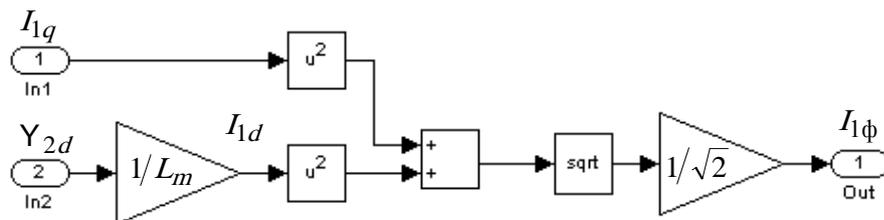


Рисунок 4.15 – Имитационная модель вычислителя действующего значения тока статора трехфазного двигателя

Блок формирования нагрузки (рисунок 4.16) реализован в соответствии с выражением механической характеристики полного момента сопротивления на валу электродвигателя (2.2), соответствующей режиму регулирования производительности с номинальным КПД $\eta_H = 0,83$

$$M_{CI}(w) = DM_c + (1 + b_i) \times M_{полн} \times \frac{C_w \ddot{\omega}^X}{C_w \dot{\omega}} =$$

$$= 36,322 + (1 + 0,102) \times 88,771 \times \frac{C_w \ddot{\omega}^{2,18}}{C_w \dot{\omega}^{2,18}},$$

где $DM_c = DM_{c.дв} + DM_{пост} = 16,99 + 19,332 = 36,322$ Н·м – момент сопротивления от сил трения, приведенный к валу двигателя.

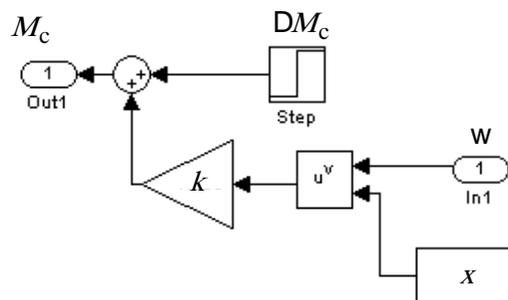


Рисунок 4.16 – Имитационная модель формирователя нагрузки

С целью обеспечения плавных переходных процессов при пуске частотно-регулируемых асинхронных электроприводов производится первоначальный прямой пуск двигателя на минимальную частоту $f_{мин}$, а затем по окончании переходного процесса, когда потокосцепление достигнет установившегося значения, осуществляется дальнейший разгон привода от задатчика интенсивности до значения заданной скорости. Установка линейного задатчика скорости обеспечивает постоянное значение темпа нарастания (спадания при торможении) скорости, т. е.

постоянное ускорение (замедление) привода, что достигается поддержанием постоянного значения динамического момента электропривода.

Был выбран задатчик интенсивности с линейной характеристикой (рисунок 4.17) и параметрами: максимальное значение задания управления на входе задатчика интенсивности $N_{зс.макс} = 0,667$; максимальное значение управления на выходе задатчика $N_{зс.макс} = 0,667$; постоянная времени задатчика $T_{зи} = 4$ с.

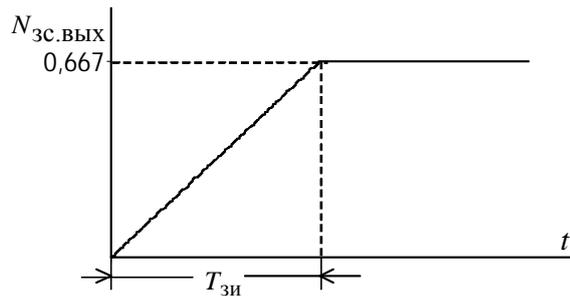


Рисунок 4.17 – Временная характеристика линейного задатчика интенсивности

Схема набора имитационной модели линейного задатчика интенсивности приведена на рис. 4.18 [13].

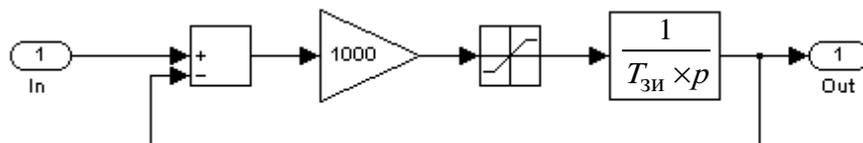


Рисунок 4.18 – Схема набора имитационной модели управляемого линейного задатчика интенсивности.

Результаты имитационных исследований САУ регулируемого электропривода

Программа имитационных исследований регулируемого электропривода включает:

- анализ работы электропривода при перегрузке статическим моментом.
- пуск электропривода на заданную скорость в диапазоне регулирования от $w_{\text{эп.мин}}$ $D=1:10$ до $w_{\text{эп.макс}}$;
- регулирование скорости: переход с меньшей скорости на большую скорость и, наоборот, в заданном диапазоне регулирования;
- останов электропривода с любой начальной скорости в заданном диапазоне регулирования;

Результаты имитационных экспериментов приведены на рисунках 4.19 – 4.25.

Анализ работы электропривода при перегрузке статическим моментом (рисунок 4.19) показал, что статическая ошибка на нижней рабочей скорости электропривода меньше 1 %.

На рисунке 4.21 показан переходный процесс пуска на минимальную скорость диапазона 1:10 и торможения частотно-регулируемого электропривода без задатчика интенсивности, а на рисунке 4.22 показан переходный процесс пуска на максимальную скорость и торможения. Анализ приведенных графиков показывает, что значение тока не превышает максимально допустимого, момент электропривода ограничен на уровне $M_{\text{эп макс}}$.

Процесс торможения характеризуется выделением мощности торможения, что требует специальных мер для ее рассеивания (тормозной резистор) или возврата в сеть (блок рекуперации), поэтому принято решение реализовать управляемые пуско-тормозные режимы с помощью применения задатчика интенсивности скорости.

Принят линейный задатчик интенсивности с постоянной времени $T_{\text{зи}} = 4$ с. В ходе экспериментальных исследований на модели установлено, что пуско-тормозные переходные процессы в электроприводе с линейным задатчиком протекают достаточно плавно, обеспечивая требуемое значение динамического момента (рисунки 4.23 – 4.25). Время разгона и торможения электропривода до заданной скорости определяется постоянной

времени задатчика интенсивности и при выбранной настройке задатчика интенсивности не превышает 4 секунды.

Полученные результаты имитационных исследований подтверждают способность частотно-регулируемого асинхронного электропривода вентилятора обеспечить выполнение технических требований по диапазону регулирования скорости, перегрузочной способности и плавности переходных процессов.

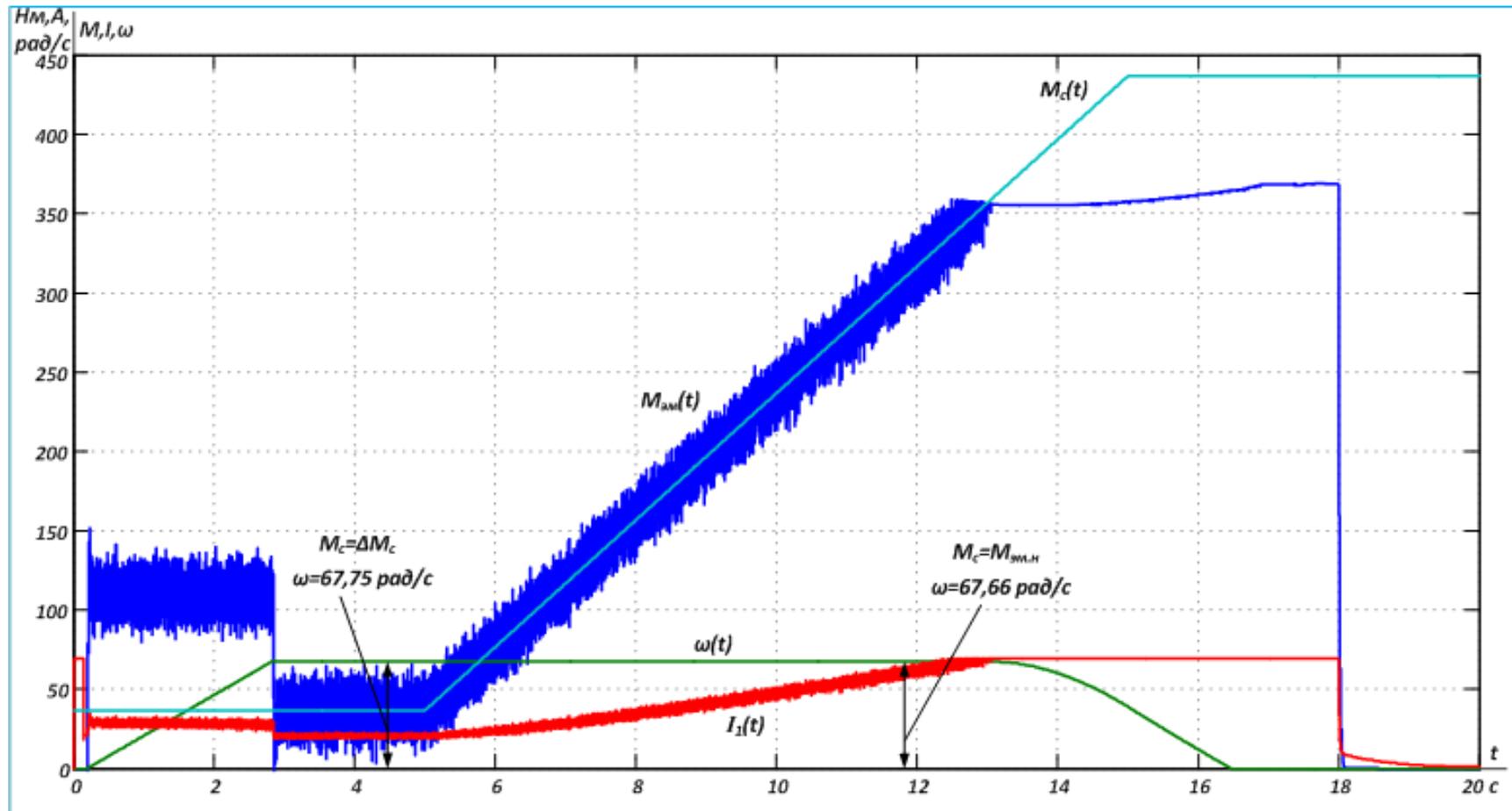


Рисунок 4.19 – Диаграммы работы электропривода при перегрузке статическим моментом на минимальной рабочей скорости

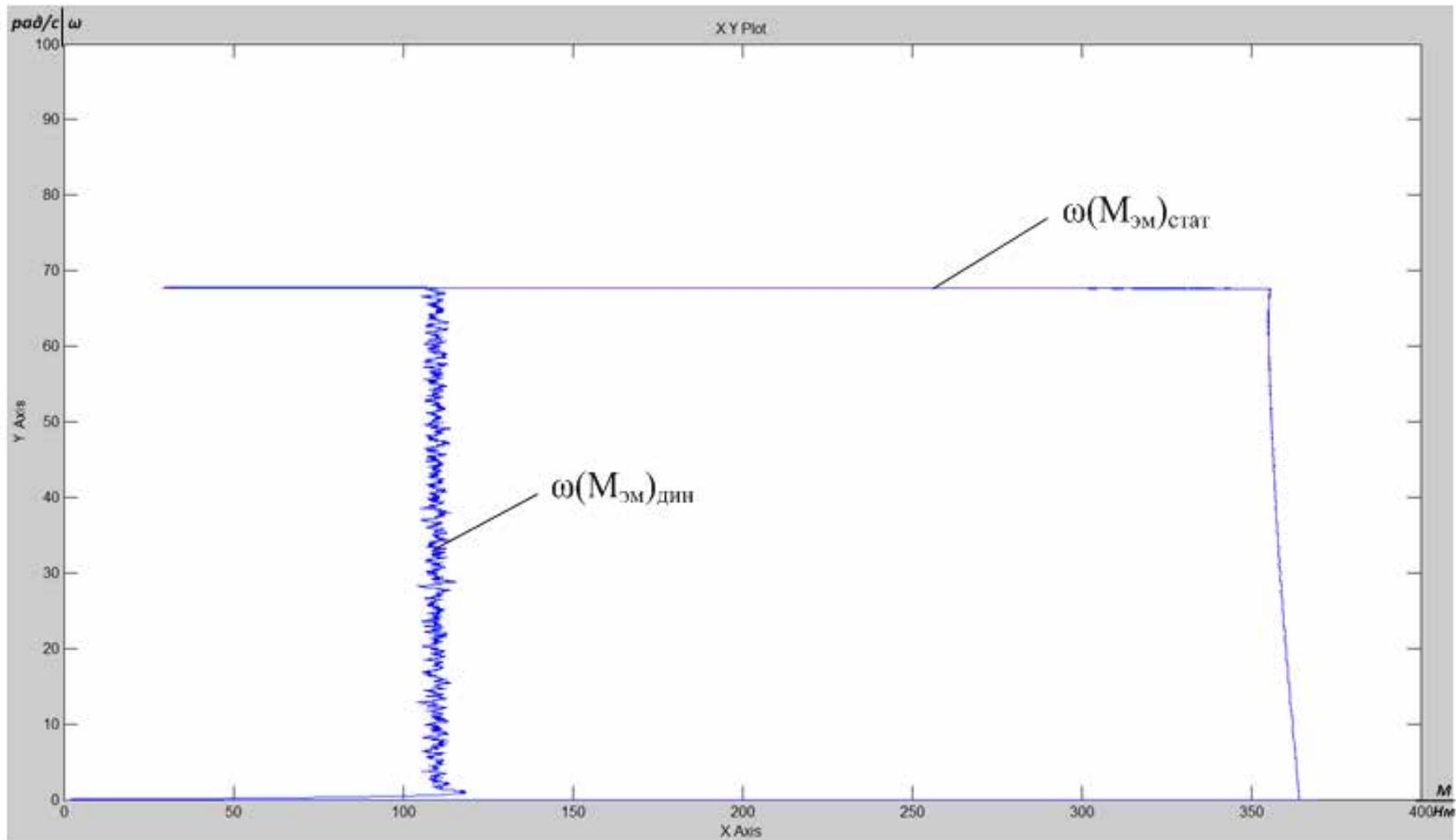


Рисунок 4.20 – Динамическая и статическая характеристики электропривода при $\omega_{зад} = 67,75$ рад/с

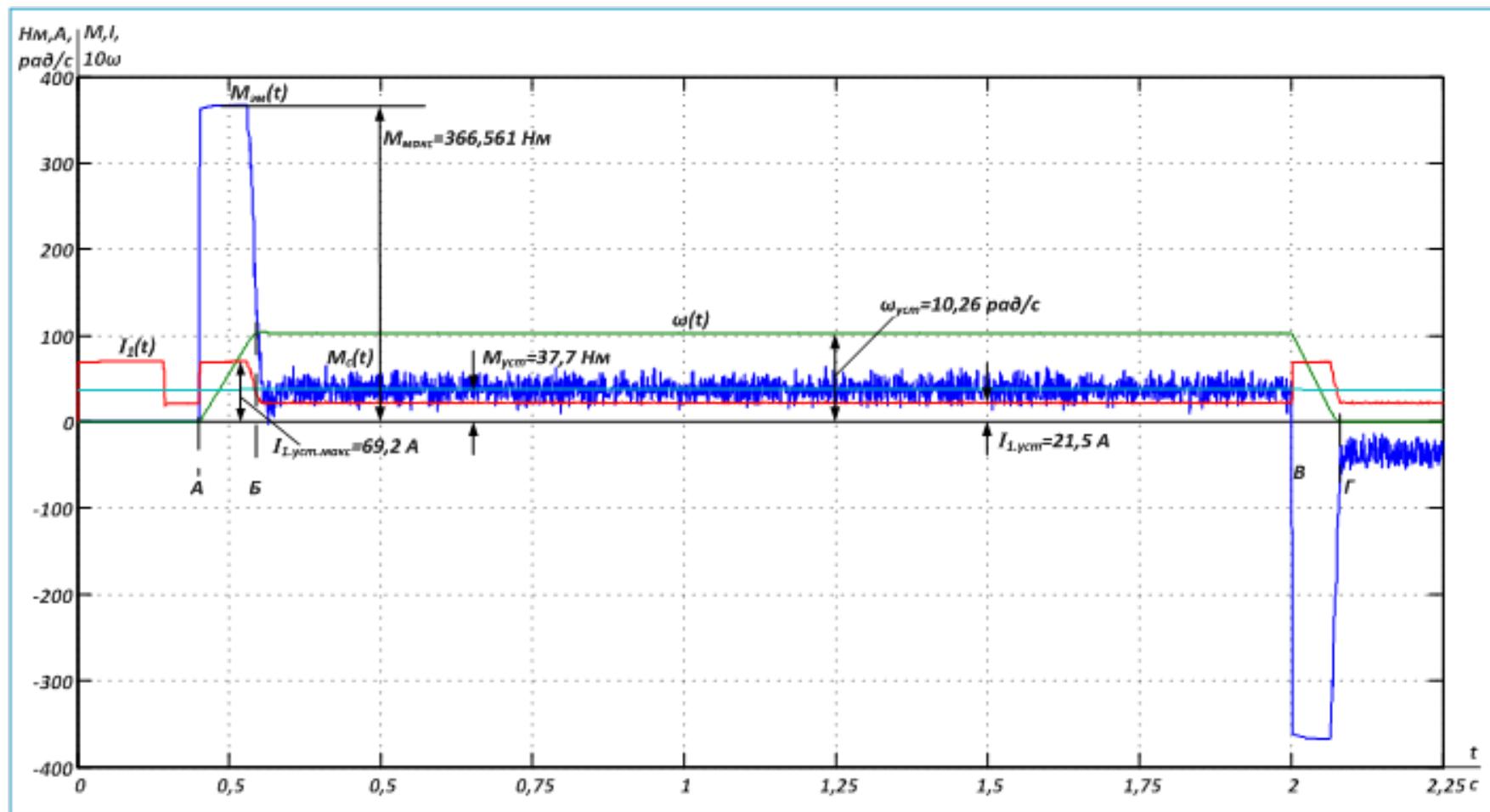


Рисунок 4.21 – Цикл работы электропривода без задатчика интенсивности: А – Б пуск на минимальную скорость диапазона 1:10, Б – В работа на минимальной скорости, В – Г останов

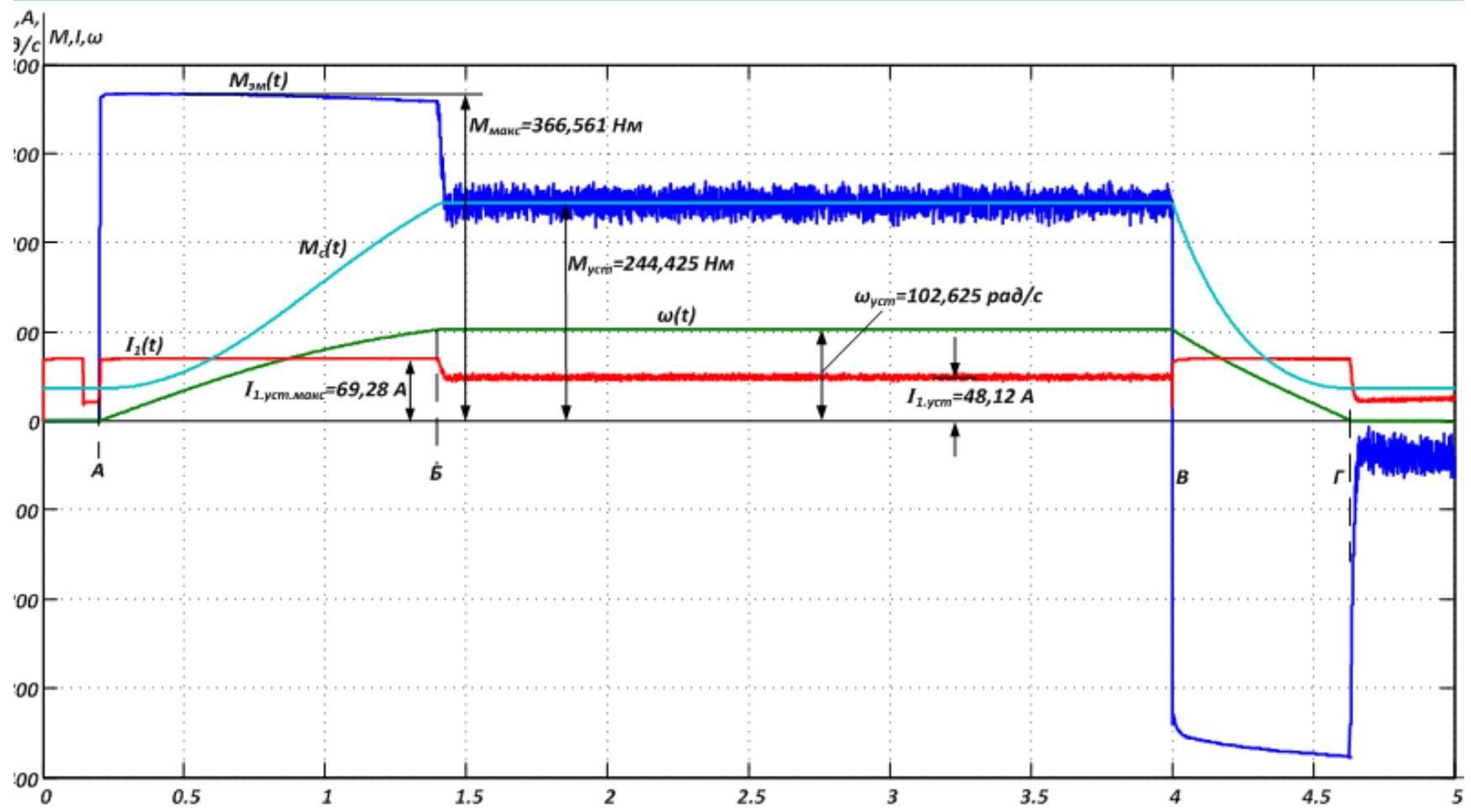


Рисунок 4.22 – Цикл работы электропривода без датчика интенсивности: А – Б пуск на максимальную рабочую скорость, Б – В работа на максимальной рабочей скорости, В – Г останов

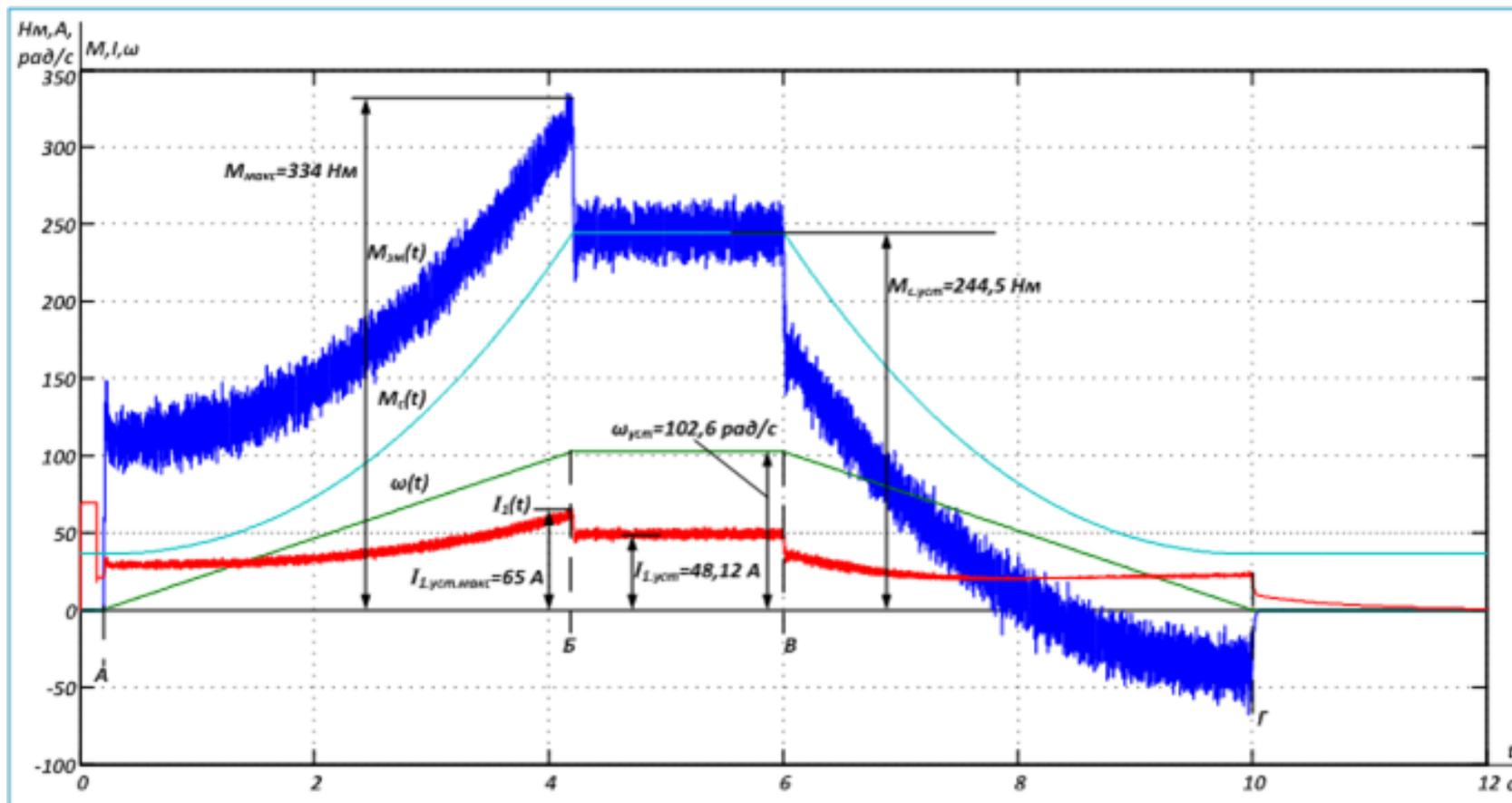


Рисунок 4.23 – Цикл работы электропривода с линейным задатчиком интенсивности: А – Б пуск на максимальную рабочую скорость, Б – В работа на максимальной рабочей скорости, В – Г останов

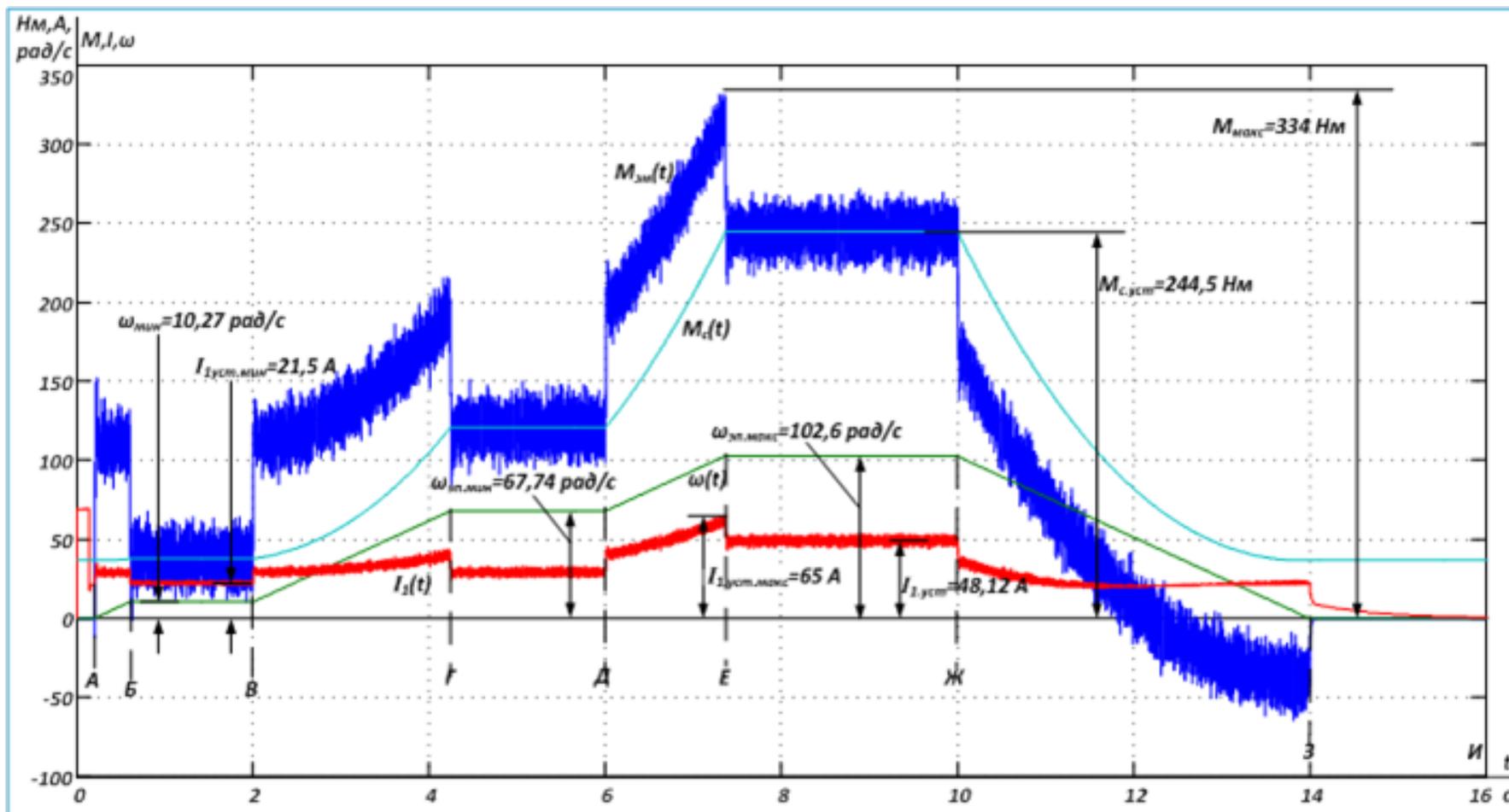


Рисунок 4.24 – Цикл работы электропривода с линейным задатчиком интенсивности: А – Б пуск на минимальную скорость диапазона 1:10, Б – В работа на минимальной скорости диапазона 1:10, В – Г пуск на минимально рабочую скорость, Г – Д работа на минимальной рабочей скорости, Д – Е пуск на максимально рабочую скорость, Е – Ж работа на максимальной рабочей скорости, Ж – З торможение, З – И останов

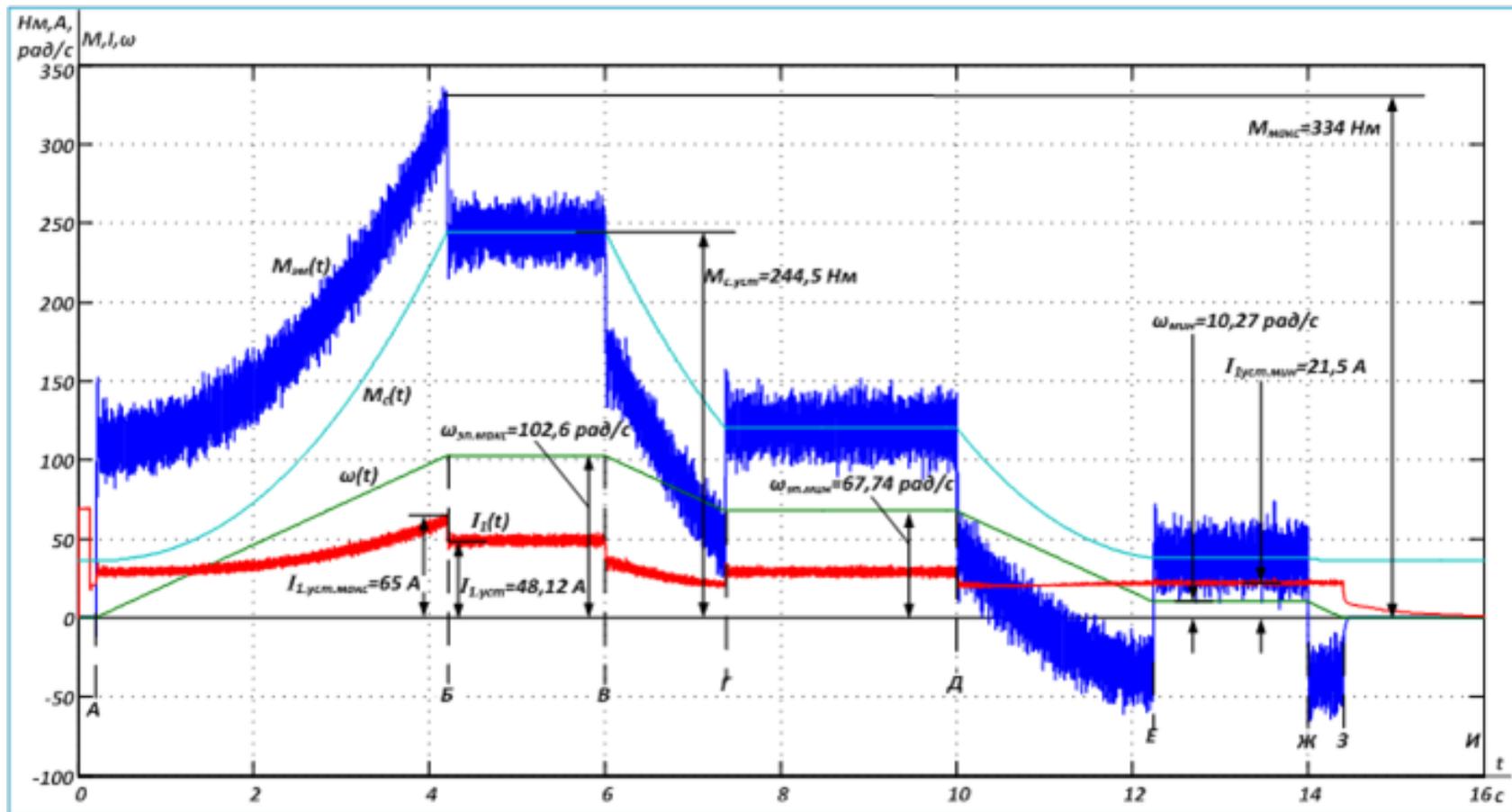


Рисунок 4.25 – Цикл работы электропривода с линейным задатчиком интенсивности: А – Б пуск на максимально рабочую скорость, Б – В работа на максимальной рабочей скорости, В – Г торможение до минимальной рабочей скорости, Г – Д работа на минимальной рабочей скорости, Д – Е торможение до минимальной скорости, Е – Ж работа на минимальной скорости, Ж – З торможение, З – И останов

4.2. Имитационные исследования работы САУ электропривода в составе технологической установки

Структурная схема системы автоматического регулирования давления воздуха перед горелкой приведена на рисунке 4.26.

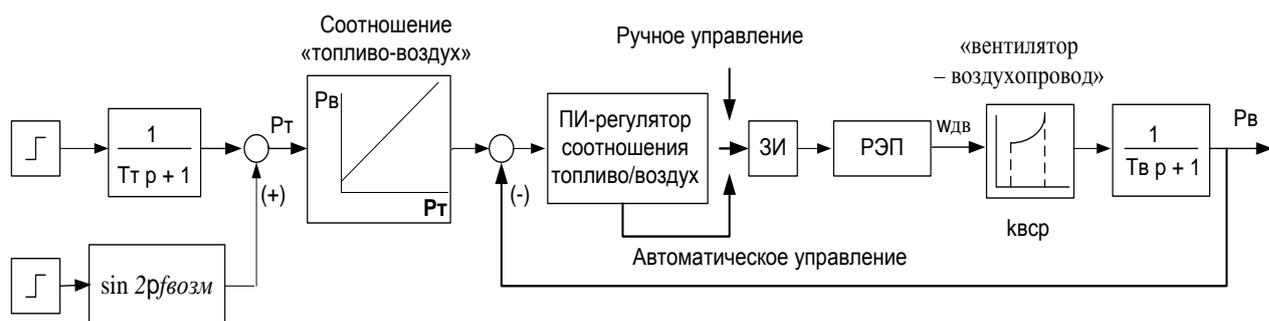


Рисунок 4.26 – Структурная схема системы автоматического регулирования давления воздуха перед горелкой

В состав структурной схемы входит частотно-регулируемый электропривод (РЭП), задатчик интенсивности скорости (ЗИС), регулятор соотношения топливо/воздух (ПИ-регулятор). Структурная схема РЭП приведена на рисунке 4.3.

Характеристика соотношения «топливо – воздух» приведена на рисунке 1.3, а характеристика системы «вентилятор-воздухопровод» показана на рисунке 4.27.

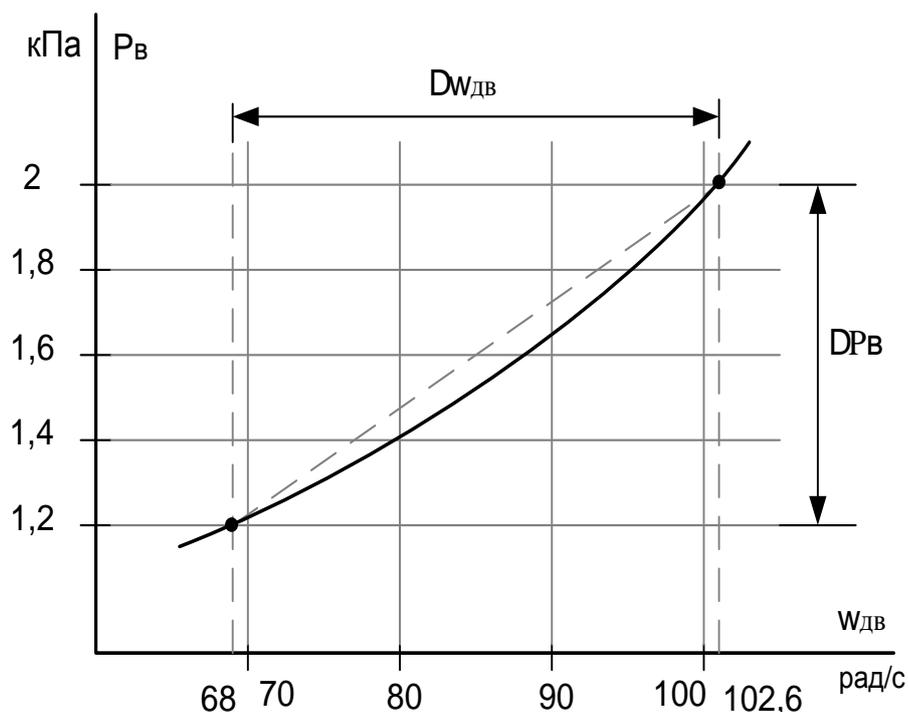


Рисунок 4.27 – Характеристика системы «вентилятор – воздухопровод»

$$P_B(\omega)$$

$$k_{\text{всп}} = \frac{DP_B}{D\omega_{\text{дв}}} = \frac{2 - 1,2}{102,6 - 68} = 0,023 \frac{\text{кПа}}{\text{рад/с}}$$

По структурной схеме рисунка 4.26 в программной среде Simulink в системе MathLab составлена имитационная модель показанная на рисунке 4.29. В состав имитационной модели на рисунке 4.29 входят кроме приведенных выше моделей блоков РЭП дополнительные суперблоки:

- регулятор соотношения топливо/воздух (рисунок 4.30);
- блок формирования задающих воздействий (рисунок 4.31).

Расчетные параметры настройки контура регулирования давления воздуха

Структурная схема контура регулирования давления воздуха приведена на рисунке 4.28.

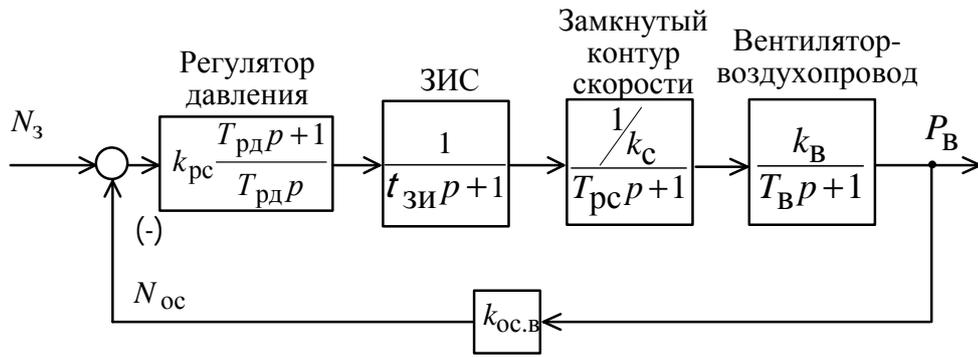


Рисунок 4.28.– Структурная схема контура регулирования давления воздуха

Внутренний оптимизированный замкнутый контур скорости с ПИ-регулятором представлен усеченной передаточной функцией 1-го порядка

$$W(p)_{\text{с.зам}} \approx \frac{1/k_{\text{с}}}{T_{\text{рс}} \times p + 1},$$

Передаточная функция ПИ-регулятора соотношения топливо/воздух:

$$W(p)_{\text{рд}} = k_{\text{рд}} \times \frac{T_{\text{рд}}p + 1}{T_{\text{рд}} \times p},$$

где $T_{\text{рд}} = T_{\text{в}} = 2$ с – постоянная времени регулятора.

Передаточная функция системы «вентилятор – воздухопровод» представлена в виде апериодического звена первого порядка

$$W(p)_{\text{в}} = \frac{k_{\text{в}}}{T_{\text{в}}p + 1},$$

где $k_{\text{в}} = k_{\text{вср}}$ – коэффициент передачи звена.

Передаточная функция разомкнутого контура

$$W(p)_{\text{в.раз}} = \frac{k_{\text{ос.в}} \times (T_{\text{рд}}p + 1) \times k_{\text{в}}}{T_{\text{рд}}p (t_{\text{зи}}p + 1) \times k_{\text{с}} \times T_{\text{в}}p + 1},$$

где $k_{\text{ос.в}} = 1$ – коэффициент обратной связи, $t_{\text{зи}} = \frac{T_{\text{зи}}}{3, 4}$.

Передаточная функция замкнутого контура

$$W(p)_{\text{в.зам}} = \frac{W(p)_{\text{в.раз}}}{1 + W(p)_{\text{в.раз}} \times k_{\text{ос.в}} + 1} = \frac{1}{\frac{k_c}{k_{\text{рд}}} \times T_{\text{в}} p (t_{\text{зи}} p + 1) \times (T_{\text{рс}} p + 1) + 1} =$$

$$= \frac{1}{a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + 1},$$

где $a_3 = \frac{k_c}{k_{\text{рд}}} \times T_{\text{в}} t_{\text{зи}} T_{\text{рс}};$

$$a_2 = \frac{k_c}{k_{\text{рд}}} \times T_{\text{в}} (T_{\text{рс}} + t_{\text{зи}}) = \frac{k_c}{k_{\text{рд}}} T_{\text{в}} (T_{\text{рс}} + t_{\text{зи}});$$

$$a_1 = \frac{k_c}{k_{\text{рд}}} \times T_{\text{в}}.$$

Ограничиваемся 2-м порядком, тогда условие настройки контура на модульный оптимум: $a_1^2 = 2 \times a_2;$

$$\left(\frac{k_c}{k_{\text{рд}}} \times T_{\text{в}} \right)^2 = 2 \times \frac{k_c}{k_{\text{рд}}} T_{\text{в}} (T_{\text{рс}} + t_{\text{зи}});$$

$$\frac{k_c}{k_{\text{рд}}} \times T_{\text{в}} = 2 (T_{\text{рс}} + t_{\text{зи}}),$$

откуда коэффициент передачи регулятора

$$k_{\text{рд}} = \frac{T_{\text{в}} \times k_c}{k_{\text{в}} \times 2 \times T_{\text{м}}} = \frac{2 \times 0,0065}{0,023 \times 2 \times 1} = 0,28,$$

где $T_{\text{м}} = T_{\text{рс}} + t_{\text{зи}} = 1 + 3,2 \times 10^{-3} \gg 1 \text{ с},$

Результаты имитационных исследований САР давления воздуха перед горелкой

Полный имитационный цикл работы показан на рисунке 4.32.

Зона А – Б соответствует пуску двигателя на минимальную рабочую скорость и создание пускового давления перед горелкой не ниже уставки предупредительной сигнализации 0,15кПа. Значение пускового давления воздуха выбирается при наладке.

Зона Б – В соответствует включению регулятора давления воздуха и установлению рабочих значений параметров системы.

Зона В – Г соответствует рабочему режиму регулирования давления воздуха перед горелкой.

Анализ приведенных графиков доказывает работоспособность разработанного частотно-регулируемого электропривода в составе технологического контура регулирования давления воздуха перед горелкой.

На рисунке 4.33 приведены графики переходных процессов давления топлива и давления воздуха.

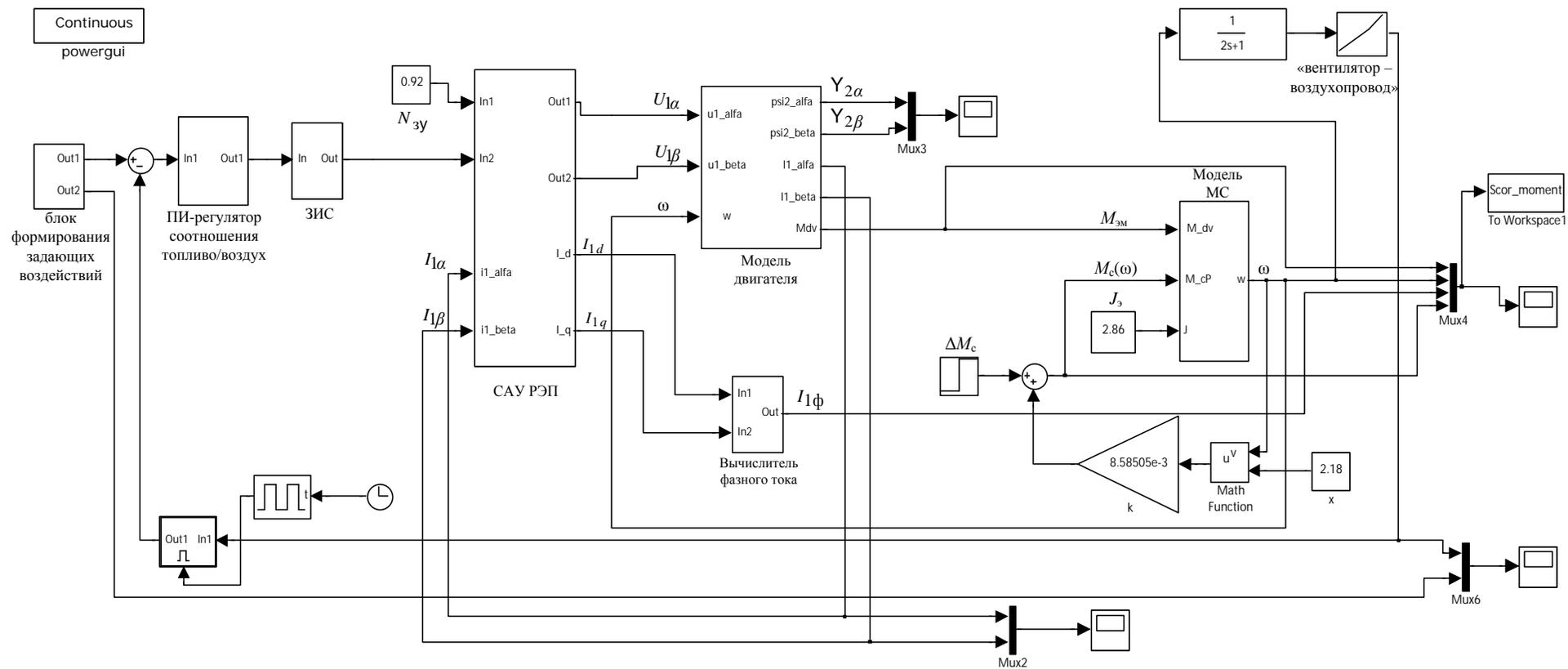


Рисунок 4.29 – Имитационная модель частотно-регулируемого асинхронного электропривода без датчиков потока и скорости в системе автоматического регулирования давления воздуха перед горелкой

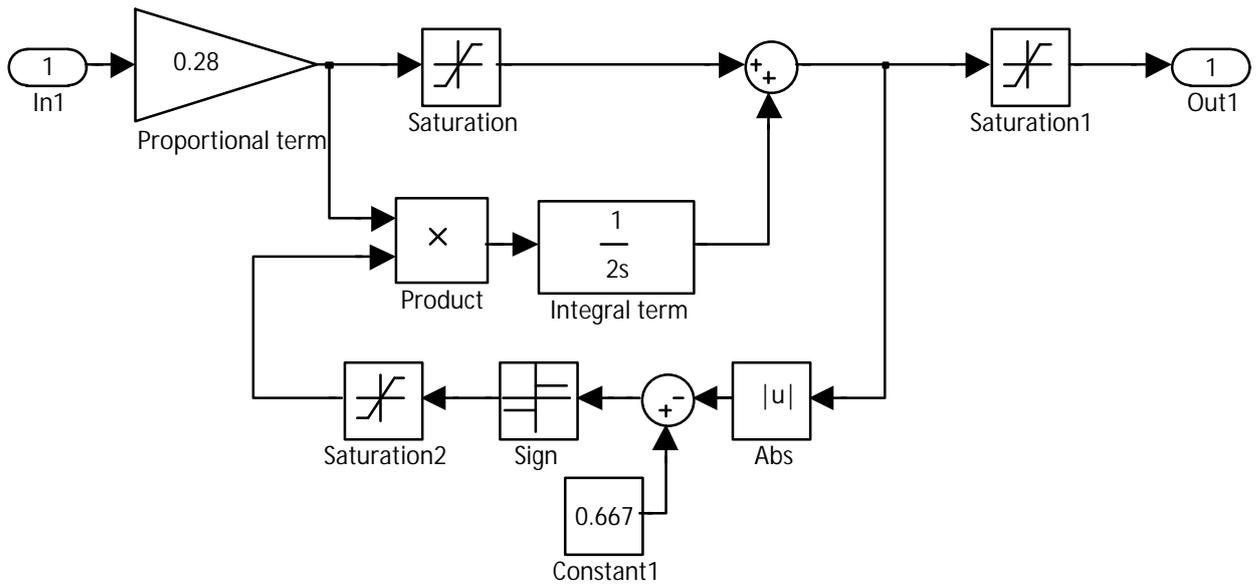


Рисунок 4.30 – Имитационная модель ПИ-регулятора соотношения топливо/воздух

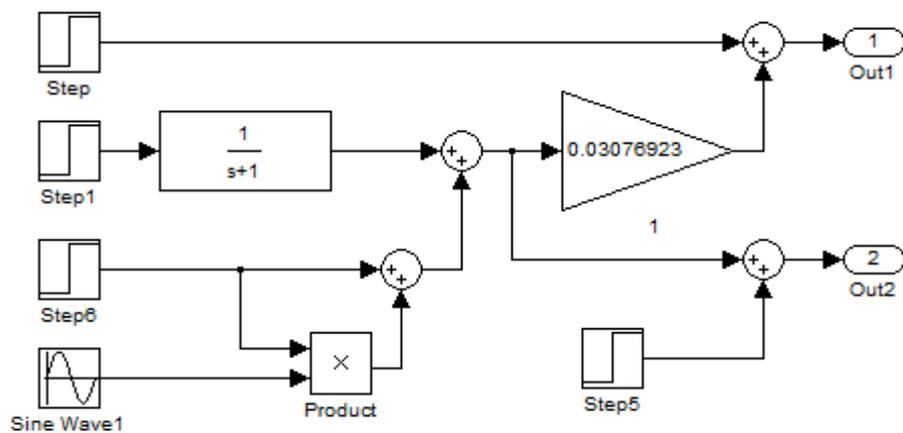


Рисунок 4.31 – Имитационная модель блока формирования задающих воздействий

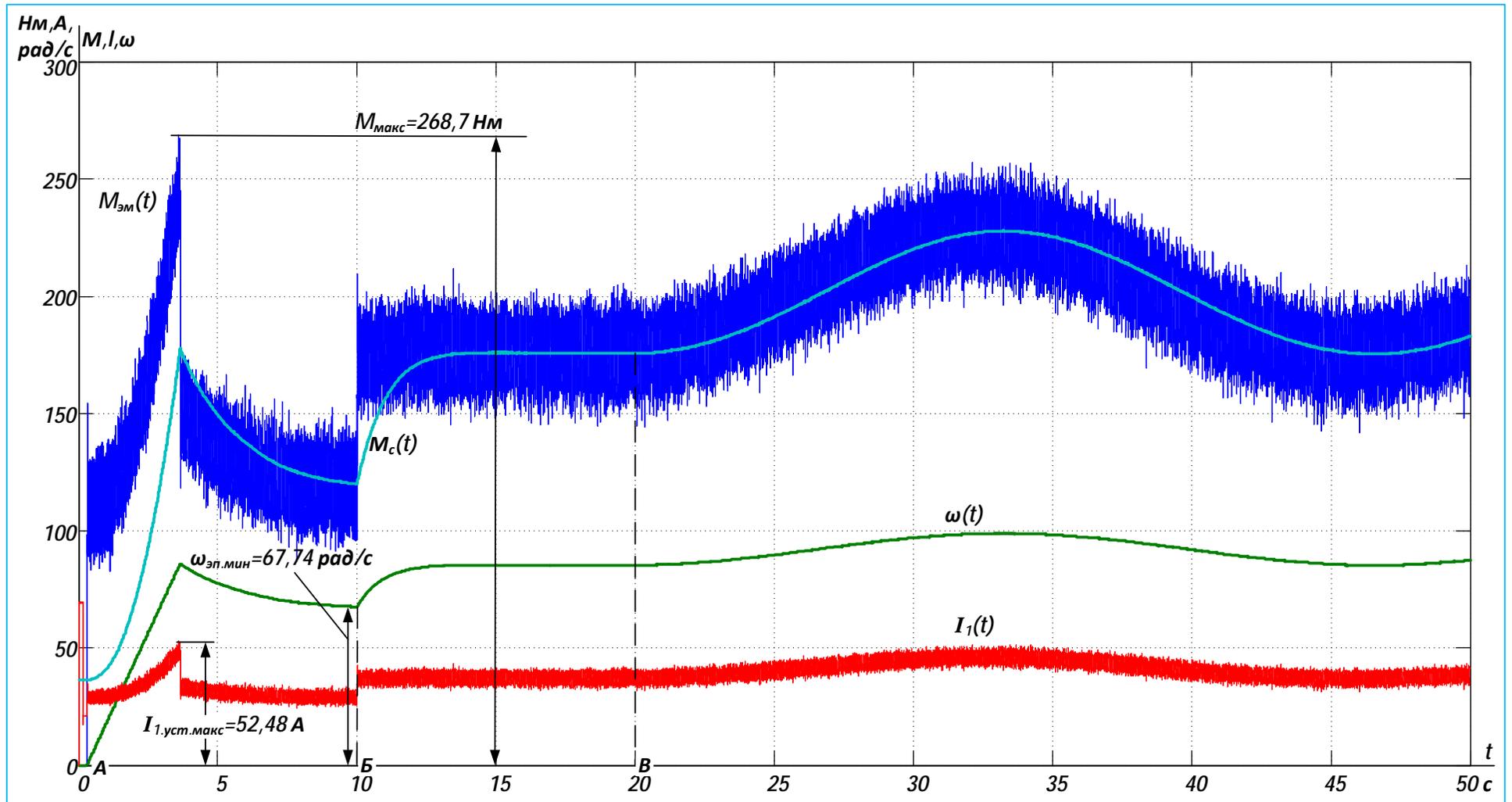


Рисунок 4.32 – Полный цикл работы: А-Б Разгон до минимальной рабочей скорости, Б-В включение регулятора давления воздуха, В-Г процесс регулирование частоты вращения вентилятора

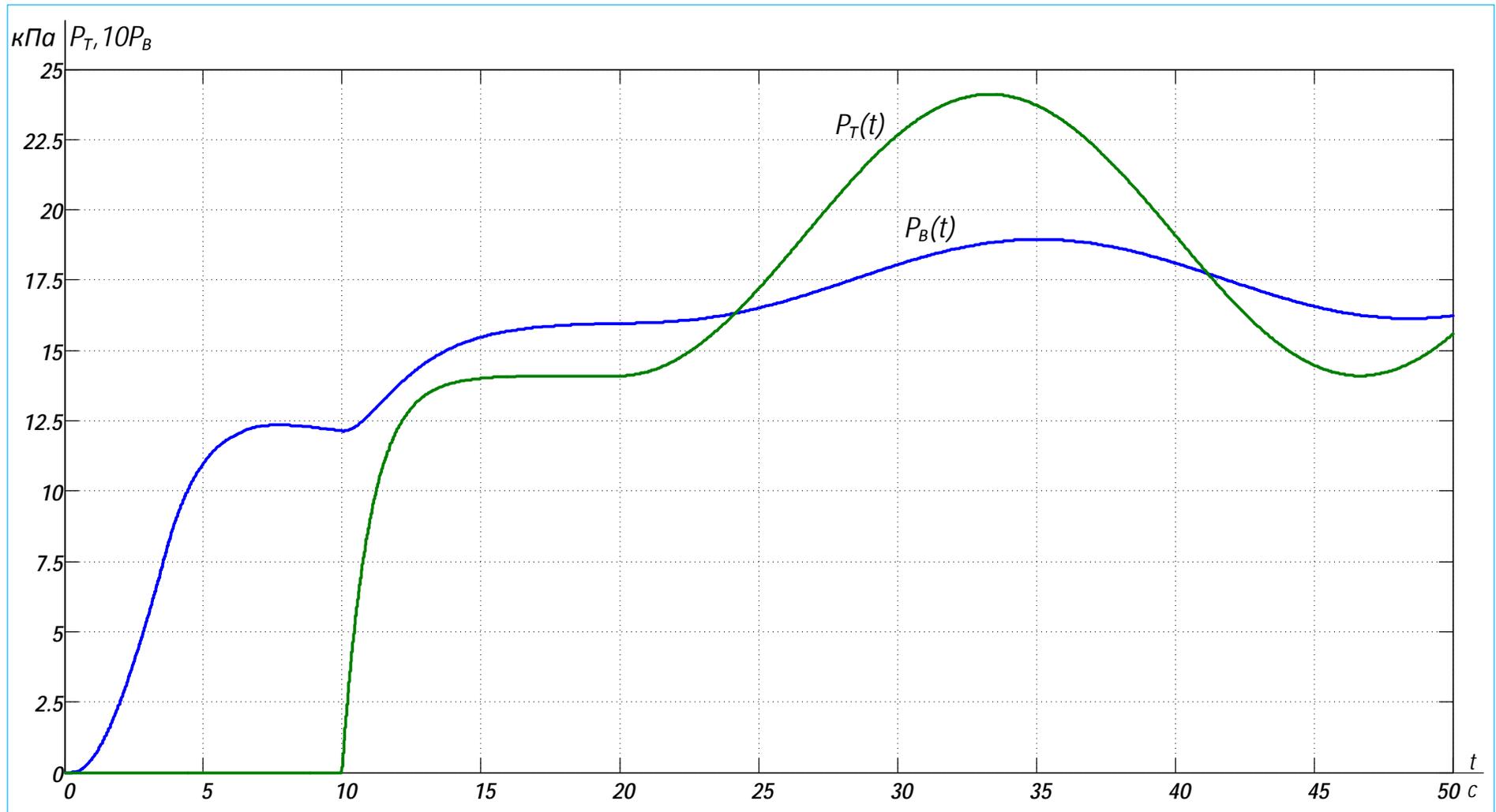


Рисунок 4.33 – Переходные процессы давления топлива и давления воздуха

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:

Группа	ФИО
3-5Г4Б1	Романову Павлу Владимировичу

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

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:	
1. Стоимость затрат технического проекта (ТП)	<i>Затраты на Материальные затраты определяются согласно прейскурантам. Заработная плата определяется исходя из тарифной ставки и коэффициентов, зависящих от различных условий: организация, регион. Страховые отчисления определяются согласно Федеральному закону от 24.07.2009 №212-ФЗ.</i>
2. Продолжительность выполнения ТП	<i>По приблизительной оценке, продолжительность ТП составляет 10рабочих день</i>
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. Оценка потенциала и перспективности реализации технического проекта (ТП) с позиции ресурсоэффективности	<i>Потенциал и перспективность реализации ТП оценивается проведением SWOT-анализа, а ресурсоэффективность ТП с помощью интегральной оценки ресурсоэффективности.</i>
2. Планирование графика работ по реализации ТП	<i>При составлении графика работ по реализации ТП используется оценка трудоемкости работ для каждого исполнителя. По полученным данным составляется ленточная диаграмма Ганта.</i>
3. Составление сметы ТП	<i>При составлении сметы ТП используется следующая группировка затрат по статьям: - затраты на оборудование; - полная заработная плата исполнителей; - отчисления во внебюджетные страховые фонды; - накладные расходы .</i>
Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей);	
<i>Диаграмма Ганта</i>	

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	12.02.2019 г.
---	---------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Мелик-Гайказян Мария Вигеновна	К.Э.Н., доцент		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
3-5Г4Б1	Романов Павел Владимирович		

5 ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ

Целью данного раздела является определение перспективности и успешности технического проекта, выполняемого в рамках выпускной квалификационной работы, при этом рассматриваются планово-временные и материальные показатели процесса проектирования.

Достижение цели обеспечивается решением задач:
оценка технологического проекта при помощи SWOT-анализа;
планирование проектно-конструкторских работ;
расчет затрат на проведение проектной работы;
определение ресурсосберегающей эффективности проекта.

5.1 SWOT-анализ электропривода приемного рольганга

SWOT-анализ применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта[18].

Согласно проекту по разработке электропривода рольганга, SWOT-анализ даст возможность проанализировать сильные и слабые стороны проекта.

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.

При построении интерактивных матриц используются следующие обозначения:

«+» – сильное соответствие;

«-» – слабое соответствие.

Сильные стороны – это факторы, характеризующие конкурентоспособную сторону научно-исследовательского проекта.

Слабые стороны – это недостаток, упущение или ограниченность научно-исследовательского проекта, которые препятствуют достижению его целей.

Возможности – включают в себя любую предпочтительную ситуацию в настоящем или будущем, возникающую в условиях окружающей среды проекта, например тенденцию, изменение или предполагаемую потребность, которая поддерживает спрос на результаты проекта и позволяет руководству проекта улучшить свою конкурентную позицию.

Угроза – представляет собой любую нежелательную ситуацию, тенденцию или изменение в условиях окружающей среды проекта, которые имеют разрушительный или угрожающий характер для его конкурентоспособности в настоящем или будущем.

Матрица SWOT – анализ приведена ниже в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Матрица SWOT-анализ

	<p>Сильные стороны:</p> <p>С1. Высокое быстродействие.</p> <p>С2. Повышенная перегрузочная способность.</p> <p>С3. Электродинамическое торможение.</p> <p>С4. Дистанционное управление электроприводом.</p> <p>С5. Защита оборудования в аварийных режимах.</p>	<p>Слабые стороны:</p> <p>Сл1. Низкая скорость перемещения.</p> <p>Сл2. Высокая себестоимость оборудования.</p> <p>Сл3. Ширина приводных рольгангов ограничена длиной ролика.</p>
<p>Возможности:</p> <p>В1. Экономия мощности энергоблоков</p> <p>В2. Уменьшение себестоимости путем усовершенствование новых технологий.</p> <p>В3. Добавочное питание электропривода.</p> <p>В4. Увеличение стоимости конкурентоспособных систем.</p>	<p>В1С1С2С3С4;</p> <p>В2С1С2С4С5;</p> <p>В3С1С4С5;</p> <p>В4С1С2С5.</p>	<p>В1Сл2;</p> <p>В2Сл1;</p> <p>В3Сл2.</p>
<p>Угрозы:</p> <p>У1. Исчезновение энергии электропривода.</p> <p>У2. Критические изменения в отношениях с поставщиками.</p> <p>У3. Ввод специальных государственных правил к стандартизации и сертификации изделий.</p> <p>У4. Нехватка финансового обеспечения со стороны государства.</p>	<p>У1С1С3;</p> <p>У2С5;</p> <p>У3С1;</p> <p>У4С3.</p>	<p>У1Сл3;</p> <p>У2Сл2;</p> <p>У3Сл2.</p>

Кроме того, нужно выявить соответствие сильных и слабых сторон научно-исследовательского проекта внешним условиям окружающей среды для определения необходимости стратегических изменений. Для этого необходимо построить матрицы проекта, таблица 5.2.

Таблица 5.2 – Интерактивная матрица возможностей

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

Следующий шаг при анализе проекта: выявление сильных/слабых сторон и угроз таблица 5.3.

Таблица 5.3 – Интерактивная матрица угроз

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

Из результатов анализа интерактивных матриц, которые приведены в таблицах 5.2 и 5.3, видно, сильной стороной проекта являются надежность, плавность пуска и торможения механизмов, а также производительность. Кроме того, добавочное питание электропривода представляют перспективность проекта в целом. Угрозы имеют низкие вероятности, что говорит о высокой надежности проекта.

5.2 Планирование и формирование графика работ по реализации технического проекта

Планирование комплекса предполагаемых работ осуществляется в следующем порядке:

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

Одной из важных частей данного проекта является составление графика проведения ТП, который предназначен для распределения обязанностей по выполнению работ.

Для выполнения проектирования формируется рабочая группа, в состав которой входят научный руководитель и дипломник. Каждый вид запланированных работ закреплен за соответствующим исполнителем. Весь комплекс работ разобьем на 10 этапов. Номера этапов соответствуют следующие виды выполняемых работ, представленные в таблице 5.4.

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

№2 – изучение литературы – ознакомление с предметом работы, изучение различных источников, касающихся различных сторон технического проекта;

№3 – сбор исходных данных – сбор параметров для электропривода рольганга, нагрузок, графиков режимов работы оборудования;

№4 – подготовка и ввод данных в спецпрограмму ЭВМ – составление блок-схем, систем управлений для математического моделирования работы электропривода;

№5 – расчет в среде ЭВМ нагрузок электропривода рольганга – использование пакета программ, которые позволяют исследовать различные

подходы и получать решение быстрее, чем с использованием электронных таблиц или традиционных языков программирования;

№6 – выбор оборудования – выбор элементов по основным требованиям технологического процесса;

№7 – расчет элементов электропривода, построение механических и электромеханических характеристик – расчет характеристик электропривода и двигателя, построение графиков режимов работы оборудования;

№8 – проверка правильности выбора оборудования – проверка соответствия расчетных величин электрооборудования с допустимыми значениями;

№9 – оформление пояснительной записки – оформление результатов расчетов в соответствии с требованиями;

№10 – проверка и защита выпускной квалификационной работы - окончательная проверка руководителем, устранение недочетов дипломником, подготовка презентации, размещение пояснительной записки в электронно-библиотечной системе ТПУ, защита выпускной квалификационной работы.

Таблица 5.4– Перечень этапов работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ работы	Содержание работ	Исполнитель
Составление технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель
Выбор направления технического проектирования	2	Подбор и изучение материалов по теме	Дипломник
Теоретические и экспериментальные исследования	3	Сбор исходных данных	Дипломник
	4	Подготовка и ввод данных в ЭВМ	Дипломник
	5	Расчет на ЭВМ нагрузок электропривода	Дипломник
	6	Выбор оборудования	Руководитель, Дипломник
	7	Расчет элементов электропривода, построение характеристик	Руководитель, Дипломник
	8	Проверка правильности выбора оборудования	Руководитель, Дипломник

Оформление отчета по техническому проектированию и защита ВКР	9	Составление пояснительной записки	Дипломник
	10	Проверка выпускной квалификационной работы руководителем. Подготовка к защите ВКР	Руководитель, Дипломник

5.2.1 Определение трудоемкости выполнения ТП

Трудовые затраты в большинстве случаев образуют основную часть стоимости разработки, поэтому важным моментом является определение трудоемкости работ каждого из участников проектирования.

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 [18]:

$$t_{ожі} = \frac{3t_{mini} + 2t_{maxi}}{5},$$

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

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

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

Результаты продолжительности выполнения работ приведены в таблице 5.5.

Таблица 5.5 – Расчет продолжительности работ, раб.-дн.

№	Содержание работы	Исполнители	Минимально возможная трудоемкость выполнения заданной i-ой работы	Максимально возможная трудоемкость выполнения заданной i-ой работы	Ожидаемая трудоемкость выполнения i-ой работы
1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель	1	1	1
2	Подбор и изучение материалов по теме	Дипломник	16	23	18
3	Сбор исходных данных	Дипломник	14	24	17
4	Подготовка и ввод данных в ЭВМ	Дипломник	1	1	1
5	Расчет на ЭВМ нагрузок электропривода	Дипломник	1	1	1
6	Выбор оборудования	Руководитель	1	1	1
		Дипломник	13	20	16
7	Расчет элементов электропривода, построение характеристик	Руководитель	1	1	1
		Дипломник	1	1	1
8	Проверка правильности выбора оборудования	Руководитель	1	1	1
		Дипломник	19	26	22
9	Оформление пояснительной записки	Дипломник	8	12	10
10	Проверка и защита выпускной квалификационной работы	Руководитель	1	1	1
		Дипломник	7	7	7

5.2.2 Разработка графика проведения технического проекта

В рамках планирования технического проекта необходимо построить ленточный график проекта.

Диаграмма Ганта – представляет собой ленточную диаграмму, которая имеет две шкалы: шкала выполняемых задач и временная шкала. В соответствии со сроком, отведенным по проекту каждой задаче, он откладывается на временной шкале.

В результате построения ленточного графика проведения технического проекта в диаграмме Ганта (Рисунок 5.1), был наглядно и детально представлен перечень этапов, работ и распределение обязанностей между исполнителями проекта. Данный ленточный график достаточно удобен в

построении, прост в прочтении и наглядно отражает затраченное время на этапы работы. Исходя из составленной диаграммы, можно сделать вывод, что продолжительность работ занимает 12 декад, начиная со второй декады февраля и заканчивая первой декадой июня. Учитывая вероятностный характер оценки трудоемкости, реальная продолжительность работ может быть как меньше (при благоприятном стечении обстоятельств), так и несколько превысить указанную продолжительность (при неблагоприятном стечении обстоятельств).

Продолжительность выполнения технического проекта составила 99 рабочих дней. Из них: 98 дней – продолжительность выполнения работ дипломником; 5 дней – продолжительность выполнения работ научным руководителем.

5.3 Расчёт затрат на осуществление технического проекта

При планировании сметы технического проекта (ТП) должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов расходов, связанных с его выполнением. В процессе формирования сметы ТП используется группировка затрат по следующим статьям:

- стоимость комплектующих и оборудования;
- стоимость вспомогательных материалов;
- затраты на основную заработную плату;
- затраты на дополнительную заработную плату;
- затраты на отчисления в социальные фонды;
- накладные расходы.

№ этапа работ	Вид работ	Исполнители	T_{pi} раб.дн.	Продолжительность выполнения работ													
				Февр.		Март			Апрель			Май			Июнь		
				2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1		
1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель	1														
2	Подбор и изучение материалов по теме	Дипломник	19	————													
3	Сбор исходных данных	Дипломник	17			————											
4	Подготовка и ввод данных в ЭВМ	Дипломник	1					-									
5	Расчет на ЭВМ нагрузок электропривода	Дипломник	1						-								
6	Выбор оборудования	Руководитель	1							-							
		Дипломник	16					————									
7	Расчет элементов электропривода, построение характеристик	Руководитель	1							-							
		Дипломник	1							-							
8	Проверка правильности выбора оборудования	Руководитель	1										-				
		Дипломник	22					————									
9	Оформление пояснительной записки	Дипломник	10										————				
10	Проверка и защита выпускной квалификационной работы	Руководитель	1													-	
		Дипломник	7												————		

Рисунок 5.1 – Диаграмма Ганта

5.3.1 Расчет материальных затрат

В материальные затраты включаются затраты на канцелярские принадлежности, информационные носители (флеш-карты), картриджи 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”.

Привлечение сторонней организации „Pечат 24” для типографических работ.

Таблица 5.6 – Материальные затраты

Наименование	Количество	Цена за ед., руб.	Затраты на материалы, руб.
Бумага	1	320	320
Ручка	1	12	12
Брошюровка	1	50	50
Калькулятор	1	220	220
Линейка	1	40	40
Печать	200	1.7	340
USB накопитель	1	218	218
Итого			1200

5.3.2 Полная заработная плата исполнителей темы

В этом разделе рассчитывается основная и дополнительная заработная плата всех исполнителей, непосредственно участвующих в выполнении работ по данной теме. Величина расходов по заработной плате определяется исходя из трудоемкости выполняемых работ и действующей системы окладов и тарифных ставок.

Полная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$З_{\text{полн}} = З_{\text{осн}} + З_{\text{доп}},$$

где $З_{\text{осн}}$ – основная заработная плата, руб.;

$З_{\text{доп}}$ – дополнительная заработная плата, руб.

Основная заработная плата исполнителей рассчитывается по формуле:

$$З_{\text{осн}} = З_{\text{дн}} \cdot Т_{\text{р}},$$

где $З_{\text{дн}}$ – среднедневная заработная плата работника, руб.;

$Т_{\text{р}}$ – продолжительность работ, выполняемых работником, раб. дн.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$З_{\text{дн}} = \frac{З_{\text{тс}} + З_{\text{р.к.}}}{F_{\text{д}}},$$

где $З_{\text{тс}}$ – заработная плата по тарифной ставке, руб.;

$З_{\text{р.к.}}$ – доплата с учетом районного коэффициента (30 %), руб.;

$F_{\text{д}}$ – количество рабочих дней в месяце (26 при 6 – дневной рабочей неделе), раб. дн.

Расчет основной заработной платы приведен в таблице 5.7.

Таблица 5.7 – Расчет основной заработной платы

Исполнители	Оклад, руб.	Районная доплата, руб.	Месячная зарплата, руб.	Среднедневная заработная плата, руб.	Кол-во дней	Основная заработная плата руб.
Руководитель	33 664	10 099	43 763	1 683	5	8415
Дипломник	12300	3 690	15 990	615	98	60270

Дополнительная заработная плата составляет 12 – 15% от основной, расчет дополнительной и полной заработной платы приведен в таблице 8.

Расчет дополнительной заработной платы ведется по следующей формуле:

$$З_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} \cdot З_{\text{осн}}$$

Таблица 5.8 – Расчет дополнительной и полной заработной платы

Исполнители	Коэф. доплаты	Основная заработная плата руб	Дополнительная заработная плата руб	Полной заработная плата, руб.
Руководитель	0,15	8415	1262	9700
Дипломник	0,12	60270	7300	67500
Итого		68 685	8 570	77200

5.3.3 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

В данной статье 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:

$$З_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (З_{\text{осн}} + З_{\text{доп}}),$$

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

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

Отчисления во внебюджетные страховые фонды составят:

$$З_{\text{внеб}} = 0,302 \cdot 77,2 = 23,3 \text{ тыс. руб.}$$

5.3.4 Накладные расходы

Накладные расходы учитывают прочие затраты организации, не включенные в предыдущие статьи расходов: печать и ксерокопирование материалов исследования, оплата услуг связи, электроэнергии, почтовые и телеграфные расходы, размножение материалов и т.д.

Величина коэффициента накладных расходов принимается в размере 16%, от общей суммы затрат.

5.3.5 Формирование сметы затрат технического проекта

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

Определение затрат на технический проект приведен в таблице 5.9.

Таблица 5.9 – Стоимость комплектующих и оборудования

Наименование статьи	Сумма, тыс.руб.	Структура затрат %
1. Материальные затраты ТП	1,2	1,0
2. Затраты по полной заработной плате исполнителей темы	77,2	64
3. Отчисления во внебюджетные фонды	23,3	19,4
4. Накладные расходы	18,4	16,0
5. Итого	120,0	100

В ходе выполнения данного параграфа была рассчитана продолжительность выполнения технического проекта, которая составляет 98 рабочих дней для дипломника и 5 для руководителя. Составлен календарный график выполнения работ. Смета затрат на разработку технического проекта составляет 120 тыс.руб, из которых более половины (64%) составляют затраты на оплату труда. Все результаты проекта оказались ожидаемы и могут быть реализованы.

5.3.6. Определение ресурсоэффективности проекта

Определение ресурсоэффективности проекта можно оценить с помощью интегрального критерия ресурсоэффективности [18]:

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i,$$

где I_{pi} – интегральный показатель ресурсоэффективности;

a_i - весовой коэффициент разработки;

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

Для оценки ресурсоэффективности проекта были подобраны критерии эффективности такие как:

- повышение производительности труда пользователя осуществляется путем автоматизации технологического процесса;

- удобство в эксплуатации (соответствует требованиям потребителей) – возможность диспетчеризации позволяет сократить количество осмотров системы за период эксплуатации;

- энергоэкономичность – применение частотно-регулируемого электропривода дает возможность использовать плавный пуск приемного рольганга;

- надежность – отсутствие ударов при переключении на другие скорости;

- уровень шума – применение частотно-регулируемого электропривода значительно снижает уровень шума приемного рольганга;

- безопасность – нет необходимости постоянного присутствия обслуживающего персонала, так как управление и мониторинг за работой приемного рольганга осуществляется дистанционно.

Критерии ресурсоэффективности и их количественные характеристики приведены в таблице 5.10.

Таблица 5.10 – Сравнительная оценка характеристик проекта

Критерии	Весовой коэффициент	Балльная оценка разработки
1. Надежность	0,25	5

2. Энергосбережение	0,20	4
3. Материалоемкость	0,15	5
4. Помехоустойчивость	0,15	5
5. Удобство в эксплуатации (соответствует требованиям потребителей)	0,15	5
6. рост производительности труда пользователя	0,10	5
Итого:	1,00	

Интегральный показатель ресурсоэффективности технического проекта:

$$I_{pi} = 4 \cdot 0.2 + 5 \cdot 0.15 + 5 \cdot 0.15 + 5 \cdot 0.15 + 5 \cdot 0.1 + 5 \cdot 0.25 = 4.8$$

Показатель ресурсоэффективности проекта имеет высокое значение (по 5-балльной шкале). Высокие баллы надежности и энергосбережению позволяют оценивать о надежности системы.

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

- в результате проведения SWOT-анализа, что сильных сторон у проекта гораздо больше, чем слабых, а это показывает о перспективности проекта в целом. Установлено, что технический проект имеет несколько важных преимуществ, обеспечивающих повышение производительности, безопасности и экономичности технического производства.

- при планировании технических работ был разработан график занятости для 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 (4,8 по 5-балльной шкале), что свидетельствует о надежности технического проекта.

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
3-5Г4Б1	Романов Павел Владимирович

Школа	Инженерная школа энергетики	Отделение	Электроэнергетика и электротехника
--------------	--	------------------	---

Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	Электроэнергетика и электротехника
---------------------	-------------	---------------------------	------------------------------------

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»	
:	
1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Частотно регулируемый электропривод вентилятора котла БЭМ-25/4,0-380Г, применяемый для поддержания оптимального давления воздуха в камере сжигание топлива.
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:	Рассмотреть специальные правовые нормы трудового законодательства; организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.
2. Производственная безопасность	Анализ потенциально возможных вредных факторов проектируемой производственной среды. Разработка мероприятий по снижению воздействия вредных и опасных факторов 1. Неудовлетворительный микроклимат 2. Повышенный уровень шума 3. Неудовлетворительное освещение 4. Загазованность 5. Электроопасность 6. Движущиеся машины и механизмы производственного оборудования 7. Падение с высоты
3. Экологическая безопасность	-Анализ воздействия объекта на литосферу(отходы производства) -Решение по обеспечению экологической безопасности
4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:	Анализ возможных ЧС при разработке и эксплуатации проектируемого решения; выбор наиболее типичной ЧС; разработка превентивных мер по предупреждению ЧС; разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий. Пожаровзрывоопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения)

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
--	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Гуляев Милий Всеволодович			

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
3-5Г4Б1	Романов Павел Владимирович		

6 СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ

Безопасность жизнедеятельности представляет собой систему законодательных актов и соответствующих им социально-экономических,

технических, гигиенических, организационных мероприятий, обеспечивающих безопасность, сохранение здоровья и работоспособности человека в процессе труда.

В данной квалификационной работе разработан электропривод вентилятора котла БЭМ-25/4,0-380Г. В экономическом разделе определена экономическая целесообразность от внедрения разработанного электропривода. Целью данного раздела является анализ вредных и опасных факторов труда работников котельной, где будет внедрен электропривод, разработка мер защиты от этих факторов, оценка условий труда и микроклимата рабочей среды. Кроме того, в разделе рассматриваются вопросы техники безопасности, пожарной профилактики и охраны окружающей среды, даются рекомендации по созданию оптимальных условий труда.

6.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

Электроустановки должны находиться в технически исправном состоянии, обеспечивающем безопасные условия труда. Электроустановки должны быть укомплектованы испытанными, готовыми к использованию защитными средствами, а также средствами оказания первой медицинской помощи в соответствии с действующими правилами и нормами. В организациях должен осуществляться контроль за соблюдением настоящих Правил, требований инструкций по охране труда, контроль за проведением инструктажей. Ответственность за состояние охраны труда в организации несет работодатель который имеет право передать свои права и функции по этому вопросу руководящему работнику организации распорядительным документом. Не допускается выполнение распоряжений и заданий, противоречащих требованиям настоящих Правил. Работники, виновные в

нарушении требований настоящих Правил, привлекаются к ответственности в установленном порядке.

Требования к персоналу

Работники, принимаемые для выполнения работ, должны иметь профессиональную подготовку, соответствующую характеру работы. Профессиональная подготовка персонала, повышение его квалификации, проверка знаний и инструктажи проводятся в соответствии с требованиями государственных и отраслевых нормативных правовых актов по организации охраны труда и безопасной работе персонала.

Проверка состояния здоровья работника проводится до приема его на работу, а также периодически, в порядке, предусмотренном Минздравом России.

Электротехнический персонал до допуска к самостоятельной работе должен быть обучен приемам освобождения пострадавшего от действия электрического тока, оказания первой помощи при несчастных случаях.

Электротехнический персонал должен пройти проверку знаний настоящих Правил и других нормативно-технических документов (правил и инструкций по технической эксплуатации, пожарной безопасности, пользованию защитными средствами, устройства электроустановок) в пределах требований, предъявляемых к соответствующей должности или профессии, и иметь соответствующую группу по электробезопасности в соответствии с приложением № 1 к настоящим Правилам. Персонал обязан соблюдать требования настоящих Правил, инструкций по охране труда, указания, полученные при инструктаже.

Работники, обладающие правом проведения специальных работ, должны иметь об этом запись в удостоверении. Под специальными работами, право на проведение которых отражается в удостоверении после проверки знаний работника, следует понимать: верхолазные работы; работы под напряжением на токоведущих частях: чистка, обмыв и замена изоляторов, ремонт проводов, контроль измерительной штангой изоляторов и соединительных зажимов,

смазка тросов; испытания оборудования повышенным напряжением (за исключением работ с мегаомметром). Перечень специальных работ может быть дополнен указанием работодателя с учетом местных условий.

Организационными мероприятиями, обеспечивающими безопасность работ в электроустановках, являются:

- оформление работ нарядом, распоряжением или перечнем работ, выполняемых

- в порядке текущей эксплуатации;

- выдача разрешения на подготовку рабочего места и на допуск к работе с учетом

- требований пункта 5.14 Правил;

- допуск к работе;

- надзор во время работы;

- оформление перерыва в работе, перевода на другое место, окончания работы.

Технические мероприятия, обеспечивающие безопасность работ со снятием напряжения

При подготовке рабочего места со снятием напряжения должны быть в указанном порядке выполнены следующие технические мероприятия:

- произведены необходимые отключения и приняты меры, препятствующие подаче напряжения на место работы вследствие ошибочного или самопроизвольного включения коммутационных аппаратов;

- на приводах ручного и на ключах дистанционного управления коммутационных аппаратов должны быть вывешены запрещающие плакаты;

- проверено отсутствие напряжения на токоведущих частях, которые должны быть заземлены для защиты людей от поражения электрическим током;

- установлено заземление (включены заземляющие ножи, а там, где они отсутствуют, установлены переносные заземления);

- вывешены указательные плакаты "Заземлено", ограждены при необходимости рабочие места и оставшиеся под напряжением токоведущие части, вывешены предупреждающие и предписывающие плакаты.

6.2 Производственная безопасность

Таблица 6.1 - Анализ выявленных потенциально возможных вредных факторов проектируемой производственной среды

Источник фактора, наименование вида работ	Факторы (по ГОСТ 12.0.003-2015)		Нормативные документы
	Вредные	Опасные	
1) Работа электродвигателя в помещении котельной 2) Работа с котлом	1. Повышенный уровень электромагнитных полей [2, 17]; 2. Недостаточная освещенность рабочей зоны; [2,3, 17]; 3. Повышенный уровень шума на рабочем месте; [2, 17]; 4. Неудовлетворительный микроклимат [2, 17]; 5. Повышенный уровень напряженности электростатического поля [2, 17].	1. Поражение электрическим током. Пожаровзрывоопасность.	СанПиН 2.2.1/2.1.1.127 8-03 СанПиН 2.2.2.542-96 СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 СанПиН 2.2.4.1191-03 СП 52.13330.2011 СанПиН 2.2.4.548-96 СН 2.2.4/2.1.8.562-96 ГОСТ 30494-2011

Вредные производственные факторы - факторы, воздействие которых на работающих в определенных условиях людей может привести к заболеванию, снижению работоспособности и отрицательному влиянию на потомстве.

Микроклимат

Метеорологические условия – оптимальная и допустимая температура, относительная влажность и скорость движения воздуха – устанавливаются для рабочей зоны производственных помещений в соответствии с требованиями ,

исходя из категорий тяжести выполняемой работы, величины избытков явного тепла и периода года.

По степени физической тяжести работа персонала относится к категории тяжелых работ. Основные нагрузки на организм – физические, нервно-психологические, а также зрительные. В основном все метрологические параметры цеха удовлетворяют требуемым нормам.

На производительность труда и состояние здоровья человека оказывает влияние состояние воздуха и метеоусловий рабочей зоны, которые характеризуются рядом параметров.

Содержание пыли в воздухе рабочего помещения ниже установленной нормы, по которой предельно-допустимая концентрация составляет более 10мг/м³.

Одновременно в рабочем помещении находится в среднем 3 человека, вентиляция в помещении искусственная: приточка и вытяжка.

Таблица 6.2 – Допустимые и оптимальные параметры микроклимата на рабочих местах котельной

Период года	Категория работ	Температура, С		Относительная влажность, %		Скорость движения воздуха, м/с	
		Оптимальная	Допустимая	Оптимальная	Допустимая	Оптимальная	Допустимая
Холодный	Тяжелая -III	16-18	13-19	40-60	<75	< 0,3	< 0,5
		18-20	15-26		<75 (при 24°С)		
Теплый						< 0,4	0,2-0,6

Вывод: данные соответствуют системе оценки условий труда.

Шум – это беспорядочное сочетание звуков различной частоты и интенсивности. Он может создаваться работающим оборудованием, установками кондиционирования воздуха, преобразователями напряжения, работающими осветительным приборами дневного света, а так же проникает извне. В котельной присутствует постоянный шум от работающих котлоагрегатов.

Шум и вибрация ухудшают условия труда, оказывают вредное воздействие на организм человека. Действие шума различно: затрудняет

разборчивость речи, вызывает снижение работоспособности, повышает утомляемость, вызывает изменения в органах слуха человека, ослабляется внимание, ухудшается память, снижается реакция.

Предельно допустимые значения, характеризующие шум и вибрацию регламентируются. Норма эквивалентного уровня звука в помещении цеха не превышает 80 дБ по шкале А.

Неудовлетворительное освещение

Недостаточное освещение рабочего места и помещения является вредным фактором, вызывающим ухудшение зрения. Неудовлетворительное освещение может, кроме того, являться причиной травматизма. Неправильная эксплуатация, так же как и ошибки, допущенные при проектировании и устройстве осветительных установок, могут привести к пожару, несчастным случаям. При таком освещении снижается производительность труда и увеличивается количество допускаемых ошибок.

Нормы освещенности рабочей зоны указаны в СНиП 23-05-95 в зависимости от разряда зрительной работы, контраста объекта с фоном и характеристикой фона. Рабочее освещение должно создавать равномерную освещенность и яркость рабочей поверхности, исключать возможность образования резких теней, обеспечивать правильную цветопередачу, быть экономным, надежным и удобным в эксплуатации.

В помещении котельной используется комбинированное освещение (общее и местное), искусственное и естественное. Для обеспечения требуемого освещения произведем расчет искусственной освещенности.

Искусственное освещение устраивается во всех основных и вспомогательных помещениях производственных зданий.

Согласно санитарно-гигиеническим требованиям рабочее место должно освещаться естественным и искусственным освещением. Персонал котельной следит за контролируемыми параметрами с местного пульта управления. По отраслевым нормам освещения рекомендуется 300 - 500 лк при общем освещении, что соответствует оценке условий труда.

Загазованность машинного зала котельной

Помещение, где размещены котлы, зольное помещение, а также все вспомогательные и бытовые помещения оборудуют естественной и искусственной вентиляцией, а также, при необходимости, отоплением. Вентиляция котельной должна обеспечивать удаление вредных газов, пыли, подачу приточного воздуха и поддержание следующих температурных условий:

- не ниже 12°C - зимой в зоне постоянного пребывания обслуживающего персонала;
- 18°C - в зоне размещения щитов;
- 15°C - на насосных станциях;
- 5°C - на закрытых разгрузочных устройствах и в помещениях без постоянного обслуживания;
- 10°C - в дробильных отделениях.

При проектировании отопления и вентиляции котельных следует руководствоваться СП 60.13330 и настоящим сводом правил. Соответствует оценке условий труда [24].

Электробезопасность

Опасность поражения током при проведении работ в котельной с электрооборудованием 220/380В заключается в возможности поражения от токоведущих элементов каротажной станции (подъёмника, лаборатории, скважинных приборов) из-за несоблюдения правил эксплуатации приборов, нарушения правил и инструкций, по техническим причинам таким, как ухудшение электроизоляции, дефектов монтажа; поэтому требования безопасности сводятся, в основном, к мерам электробезопасности.

При работе с электрооборудованием нужно соблюдать электробезопасность (ГОСТ 12.1.030-81 , ГОСТ 12.1.019-79 , ГОСТ 12.1.038-82).

Предупреждение электротравматизма на объектах достигается выполнением следующих мероприятий:

- устройством электроустановок таким образом, чтобы обеспечивалась недоступность прикосновения человека к токоведущим частям, находящимся под напряжением;
- устройством защитного заземления;
- защитой от перехода высокого напряжения в сеть низкого напряжения;
- применением защитных средств при обслуживании электроустановок;
- проведением планово-предупредительных ремонтов и профилактических испытаний устройством зануления;
- применением специальных схем защитного отключения;
- электрооборудования, аппаратов, сетей, находящихся в эксплуатации;
- организационными и техническими мероприятиями по обеспечению безопасности при проведении переключений и ремонтных работ;
- специальным обучением лиц, обслуживающих электроустановки.

Во время работы установки и пробного ее пуска запрещается прикасаться к кабелю. Не допускается проведение каких-либо работ на кабеле при спускоподъемных операциях. Защитой от прикосновения к токоведущим частям является изоляция проводов, ограждения, блокировки и защитные средства. Электрзащитные средства предназначены для защиты людей от поражения электрическим током. Средства защиты подразделяются на основные и дополнительные. К основным до 1000 В относятся: изолирующие клещи, указатели напряжения, диэлектрические перчатки и монтерский инструмент с изолированными рукоятками. Дополнительные до 1000 В диэлектрические калоши, коврики и подставки.

Движущиеся машины и механизмы производственного оборудования

Возможность получить различного вида травму, возникает на всех этапах работ с оборудованием, но возрастание риска подвергнуться механическому

воздействию, а в следствии, получить травму можно при погрузочно-разгрузочных, монтажно-демонтажных работах на скважине и др.

Управление оборудованием должно производиться лицами, имеющими на это право, подтвержденное соответствующими документами. Лица, ответственные за исправное состояние и безопасную эксплуатацию оборудования назначаются приказом начальника партии. Оборудование, аппаратура и инструмент должны содержаться в исправности и чистоте, соответствовать техническим условиям завода - изготовителя и эксплуатироваться в соответствии с требованиями эксплуатационной и ремонтной документации. Запрещается применять не по назначению, а также использовать неисправное оборудование, аппаратуру, приспособления и средства индивидуальной защиты (рукавицы, спецобувь, спецодежда). Ремонт оборудования должен производиться в соответствии с положением. Ручной инструмент (кувалды, молотки, ключи, лопаты и т.п.) содержится в исправности. Инструменты с режущими кромками и лезвиями следует переносить и перевозить в защитных чехлах и сумках. Рабочие и инженерно-технические работники, находящиеся на рабочих местах, обязаны предупреждать всех проходящих об опасности и запрещать им подходить к аппаратуре, проводам и заземлениям.

Падение с высоты

Работами на высоте в строительстве котлов считаются трудовые операции, выполняемые на высоте более 1,3 м от поверхности земли, пола, площадок, междуэтажных перекрытий, покрытий, а также работы, выполняемые в опасных зонах, т.е. ближе чем 2 м от границы перепада по высоте 1,3 м при отсутствии страховочных ограждений или ЗУС.

К работам на высоте должны, как правило, допускаться лица, прошедшие специальное теоретическое и практическое обучение в специальных учебных организациях в установленном порядке и имеющие специальное удостоверение.

Работы на высоте следует производить в соответствии с проектом производства работ (ППР), который должен содержать средства и способы безопасного и удобного подъема и спуска работников на высоту, безопасного перехода с одного рабочего места на другое, средства индивидуальной и коллективной защиты, места и способы их закрепления

Для обеспечения безопасности работы на высоте следует применять средства ограждения опасных зон (СООЗ), средства индивидуальной защиты (СИЗ) и средства коллективной защиты (СКЗ), разработанные в установленном порядке.

6.3 Экологическая безопасность

Загрязнение окружающей среды отходящими газами

Проблема защиты окружающей среды – одна из важнейших задач современности.

Защита окружающей среды – это комплексная проблема, требующая усилий всего человечества.

Наиболее активной формой защиты окружающей среды от вредного воздействия выбросов промышленного оборудования является полный переход к безотходным и малоотходным технологиям и производствам. Это потребует решения целого комплекса сложных технологических, конструкторских и организационных задач, основанных на использовании новейших научно-технических достижений.

Одна из самых серьезных проблем – потребление электроэнергии. С увеличением количества различных видов электрооборудования, увеличится и объем потребляемой ими электроэнергии, что влечет за собой увеличение мощностей электростанций и их количества. И то и другое не обходится без нарушения экологической обстановки.

Рост энергопотребления приводит к таким экологическим нарушениям, как: изменение климата – накопление углекислого газа в атмосфере Земли (парниковый эффект); загрязнение водного бассейна Земли; опасность аварий

в ядерных реакторах, проблема обезвреживания и утилизации ядерных отходов; изменение ландшафта Земли.

Из этого можно сделать простой вывод, что необходимо стремиться к снижению энергопотребления, то есть разрабатывать и внедрять электрооборудование с малым энергопотреблением.

Стоит также отметить, что для снижения вреда, наносимого окружающей среде при производстве электроэнергии, необходимо искать принципиально новые виды производства электроэнергии.

Утилизация

Что касается электроприводов, то они рассчитаны на длительный срок службы, по истечении которого должны быть утилизированы.

Утилизируемые электроприводы демонтируются, разбираются и сортируются по различным материалам: отходы электронных деталей, черные и цветные металлы, смазочные материалы.

При утилизации должны соблюдаться следующие правила:

-отсортированные материалы устраняются через упорядоченную систему утилизации, с соблюдением местных правил;

-при утилизации должны быть выдержаны нормы охраны окружающей среды;

-смазочные материалы представляют опасность загрязнения водных ресурсов, поэтому не должны попасть в окружающую среду.

6.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Основы противопожарной защиты предприятий.

Пожар представляет особую опасность, так как он грозит уничтожением аппаратуры, инструментов, документов, которые представляют большую материальную ценность, и возникновением пожара в соседних помещениях. А также может представлять серьезную угрозу жизни и здоровью персонала.

Согласно, в зависимости от характеристики используемых в производстве веществ и их количества [ФЗ-123] производственное помещение по степени пожароопасности относится к категории Г, т.е. к помещениям с газообразными сгораемыми веществами, необходимо предусмотреть ряд профилактических мероприятий технического, эксплуатационного, организационного плана.

Мероприятия по пожарной профилактике разделяются на: организационные, технические, эксплуатационные и режимные.

Организационные мероприятия предусматривают правильную эксплуатацию оборудования, правильное содержание зданий и территорий, противопожарный инструктаж рабочих и служащих, обучение производственного персонала правилам противопожарной безопасности, издание инструкций, плакатов, наличие плана эвакуации.

К техническим мероприятиям относятся: соблюдение противопожарных правил, норм при проектировании зданий, при устройстве электропроводов и оборудования, отопления, вентиляции, освещения, правильное размещение оборудования.

Причиной загорания может быть:

- короткое замыкание в блоке питания или высоковольтном блоке;
- несоблюдение правил пожарной безопасности;
- наличие горючих компонентов: двери, столы, изоляция кабелей и т.п.;
- наличие кислорода, как окислителя процессов горения;
- наличие утечек с подводящих трубопроводов.

Необходимо предусмотреть ряд мер, направленных на обеспечение тушения пожара:

- обеспечить подъезды к зданию;
- обесточивание электрических кабелей;
- наличие пожарных щитов и ящиков с песком в коридорах, асбестовое полотно;
- наличие гидрантов с пожарными рукавами;

- тепловая сигнализация;
- телефонная связь с пожарной охраной;
- огнетушители: углекислотный ОУ-5.
- эвакуация людей согласно схеме эвакуации (рисунок 6.2)

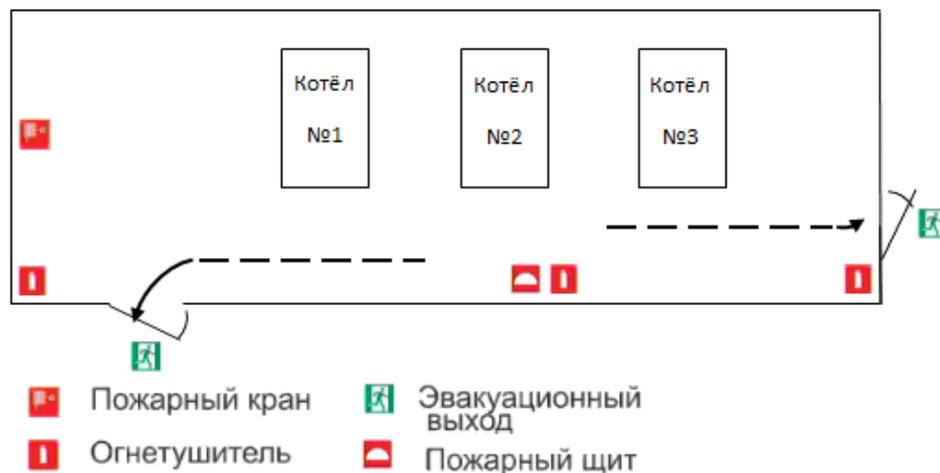


Рисунок 6.2 – План эвакуации персонала при пожаре

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Целью данной выпускной квалификационной работы является модернизация электропривода дутьевого вентилятора котельной

Предложено заменить существующий морально устаревший и выработавший ресурс нерегулируемый электропривод на частотно–регулируемый асинхронный электропривод. По результатам расчета требуемой мощности двигателя выбран электродвигатель серии 5A200L6, а

также преобразователь частоты *ИРБИ 823-30*, НПФ «ИРБИС», г.Новосибирск.

Результаты аналитических расчетов и имитационного моделирования подтверждают правильность выбора силовых элементов – электродвигателя и преобразователя – и реализации системы автоматического частотно-регулируемого электропривода дутьевого вентилятора котла.

Система преобразователь частоты – асинхронный электродвигатель обеспечивает требуемые статические и динамические нагрузки привода дутьевого вентилятора, а система автоматического регулирования с векторным управлением обеспечивает поддержание технологических параметров в режимах пуска и воздействия возмущений с принятыми параметрами. Окончательное решение по выбору типа и настройки технологического регулятора может быть принято по результатам производственных испытаний.

В результате выполнения поставленных задач по разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение», можно сделать следующие выводы:

- в результате проведения SWOT-анализа, что сильных сторон у проекта гораздо больше, чем слабых, а это показывает о перспективности проекта в целом. Установлено, что технический проект имеет несколько важных преимуществ, обеспечивающих повышение производительности, безопасности и экономичности технического производства.

- при планировании технических работ был разработан график занятости для 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 (4,8 по 5-балльной шкале), что свидетельствует о надежности технического проекта.

В разделе «Социальная ответственность» освещены вопросы: промышленной безопасности; техники безопасности; анализ опасных и вредных производственных факторов; пожарная безопасность; рассмотрены мероприятия по охране окружающей среды.

Список используемой литературы

1. Стрельченко В.В. Геофизические исследования скважин. Учебник для вузов. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2008. – 551 с.
2. Ключев В.И. Теория электропривода. Учебник для вузов. –М.: Энергоатомиздат, 1998. – 704 с.
3. Дементьев Ю.Н., Чернышев А.Ю., Чернышев И.А. Электрический привод. Учебное пособие. –Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2010. – 224 с.
4. Удут Л.С., Кояин Н.В., Мальцева О.П. Проектирование и исследование автоматизированных электроприводов. Часть 1. Введение в технику

регулирования линейных систем Часть 2. Оптимизация контура регулирования. –Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2007. – 156 с.

5. Удут Л.С., Кояин Н.В., Мальцева О.П. Проектирование и исследование автоматизированных электроприводов. Часть 6 Механическая система электропривода. –Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2007. – 148 с.

6. Удут Л.С., Кояин Н.В., Мальцева О.П. Проектирование и исследование автоматизированных электроприводов. Часть 7 Теория оптимизации непрерывных многоконтурных систем управления электроприводов.–Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2007. – 164 с.

7. Удут Л.С., Кояин Н.В., Мальцева О.П. Проектирование и исследование автоматизированных электроприводов. Часть 8. Асинхронный частотно-регулируемый электропривод.–Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2009. – 354 с.

8. Королева Н.И., Трофимова М.Н. Техничко-экономические показатели при проектировании электроприводов. Методическое пособие.–Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2001. – 67 с.

9. Бибилуров В.П. и др. Правила безопасности при геологоразведочных работах. – М.: Недра, 1979. – 249 с.

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. Основы функционально-стоимостного анализа: Учебное пособие / Под ред. М.Г. Карпунина и Б.И. Майданчика. - М.: Энергия, 1980. - 175 с.

13. Скворцов Ю.В. Организационно-экономические вопросы в дипломном проектировании: Учебное пособие. – М.: Высшая школа, 2006. – 399 с.

14 Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей. – СПб.: ДЕАН, 1999. – 320 с.

15 Правила устройства электроустановок. 7-е изд. с изм. и дополн. – СПб, 2002. – 123 с.

16 Безопасность жизнедеятельности. Под ред. С.В. Белова. – М.: Высшая школа, 2002. – 357с.

17. Раицкий К.А. Экономика предприятия: учебник для вузов. – М.: Дашков и К, 2002. – 1012 с.

18. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение: учебно-методическое пособие / И.Г. Видяев, Г.Н. Серикова, Н.А. Гаврикова, Н.В. Шаповалова, Л.Р. Тухватулина З.В. Криницына; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 36 с.

19 ГОСТ 12.1.003 – 83. ССБТ. Шум. Общие требования безопасности.

20 СН 2.2.4/2.1.8.562 – 96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории застройки.

21 ГОСТ 12.2.062-81 Система стандартов безопасности труда. Оборудование производственное. Ограждения защитные

22 ГОСТ 12.1.019 (с изм. №1) ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты.

23 ГОСТ 12.1.038 – 82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов.

24 ГОСТ 12.4.125-83 Система стандартов безопасности труда. Средства коллективной защиты работающих от воздействий механических факторов. Классификация.

25 СНиП 3.05.06-85 – 88. Электротехнические устройства.

26 ГОСТ 12.2.003-91 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Оборудование производственное. Общие требования безопасности.

27 СанПиН 2.2.4.548 – 96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений. М.: Минздрав России, 1997.

28 ГОСТ 12.1.019-79 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты

29 ГОСТ 12.1.030-81 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электробезопасность. Защитное заземление. Зануление.

30 "Трудовой кодекс Российской Федерации" от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 05.02.2018)