

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
Электропривод вентилятора главного проветривания

УДК 62-83:622.445

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
3-5Г4Б2	Енин Андрей Евгеньевич		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Глазырин А.С.	д.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. Ивашутенко**

(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
3-5Г4Б2	Енину Андрею Евгеньевичу

Тема работы:

Электропривод вентилятора главного проветривания	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	№ 3483/с от 06.05.2019г

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

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе <i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i>	Материалы преддипломной практики, техническая литература, техническая документация.
--	--

Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов <i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i>	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 <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i>	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	Глазырин А.С.	к.т.н.		05.04.2019г.

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
З-5ГЗБ2	Енин Андрей Евгеньевич		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:	30.05.2019г.
--	--------------

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

СОСТАВИЛ:

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Глазырин 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.		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 144 с., 39 рисунка, 29 таблиц, 23 источников, приложение.

Ключевые слова: электропривод, шахтный вентилятор главного проветривания, регулирование частоты вращения, экономичность, эффективность, векторное управление, асинхронный электродвигатель, система управления

Объектом исследования является регулируемый асинхронный электропривод шахтного вентилятора главного проветривания.

Цель работы: создание энергосберегающей системы регулирования режимов работы вентилятора главного проветривания шахты и решение ряда задач связанных с разработкой системы частотного регулирования электропривода шахтного вентилятора.

Магистерская диссертация выполнена в текстовом редакторе Microsoft Word 2007 на белой бумаге формата А4 с использованием программ MathCAD 14, пакет MATLAB 7.1 Simulink 6.3., Microsoft Visio 2007.

Содержание

ВВЕДЕНИЕ	10
1. ШАХТНЫЕ ВЕНТИЛЯТОРНЫЕ УСТАНОВКИ ГЛАВНОГО ПРОВЕТРИВАНИЯ	12
1.1. Назначение и классификация вентиляторных установок	12
1.2. Устройство вентиляторных установок главного проветривания.....	19
1.3. Основные требования к шахтным вентиляторным установкам главного проветривания	22
1.4. Расчет параметров и выбор вентилятора.....	23
2. ВЫБОР ОБОРУДОВАНИЯ, РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕМЕНТОВ И ХАРАКТЕРИСТИК СИЛОВОЙ ЦЕПИ.....	30
2.1. Выбор двигателя.....	30
2.2. Косвенное определение параметров схемы замещения АД	31
2.3. Построение механических характеристик вентилятора	36
2.4. Построение естественной механической характеристики двигателя.....	40
2.5. Построение естественной электромеханической характеристики двигателя	43
2.6. Выбор преобразователя частоты	45
3. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА.....	46
3.1. Математическое описание процессов в асинхронном двигателе	46
3.2. Стационарная система координат	51
3.3. Система координат с принудительной ориентацией по вектору потокосцепления ротора.....	54
3.4. Инвертор напряжения.....	59
4. РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АСИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ВЕНТИЛЯТОРА.....	63
4.1. Синтез структуры и параметров системы векторного управления асинхронным электроприводом	63

4.2. Оптимизация контуров управления составляющими вектора тока статора	66
4.3. Оптимизация контура управления потокосцеплением ротора.....	76
4.4. Оптимизация контур управления скоростью	82
4.5. Исследование переходных процессов в линеаризованной системе	88
4.6. Исследование переходных процессов в нелинейной системе.....	95
ЗАДАНИЯ ДЛЯ РАЗДЕЛА «ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»	97
5 ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ ИРЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ.....	98
5.1 SWOT-анализ работы осевого вентилятора местного проветривания шахты.....	98
5.2 Организация работ технического проекта.....	101
5.3.1 Структура работ в рамках технического проектирования	101
5.2.2 Разработка графика проведения технического проекта.....	104
5.2 Расчёт затрат на осуществление технического проекта	107
5.3.1 Расчет защита материальных затрат пожары технического проекта ...	107
5.3.2 Полная заработная плата исполнителей темы	108
5.3.3 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)	109
5.3.4 Накладные расходы.....	110
5.3.5 Формирование сметы затрат технического проекта	110
5.4 Определение ресурсоэффективности проекта.....	111
ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»	114
6 Социальная ответственность	116
6.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	116
6.1.1 Специальные (характерные для проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства	116
6.1.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны	117
6.2 Производственная безопасность.....	118

6.2.1 Анализ потенциально возможных и опасных факторов, которые могут возникнуть на рабочем месте при проведении исследований.....	118
6.2.2 Разработка мероприятий по снижению воздействия вредных и опасных факторов	119
6.3 Экологическая безопасность.....	125
6.3.1 Анализ влияния объекта исследования на окружающую среду	125
6.3.2 Анализ влияния процесса исследования на окружающую среду	126
6.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	126
6.4.1 Анализ вероятных ЧС, которые может инициировать объект исследований и обоснование мероприятий по предотвращению ЧС.....	126
6.4.2 Анализ вероятных ЧС, которые могут возникнуть при проведении исследований и обоснование мероприятий по предотвращению ЧС.....	127
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	130
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	132
Приложение А	135

ВВЕДЕНИЕ

Атмосфера подземных горных выработок шахт в силу ограниченного их объема легко насыщается различными вредностями техногенного и (или) природного характера. Превышение допустимых концентраций вредностей опасно для здоровья и жизни работающих в выработках и ограничивает возможности проведения производственных процессов. Основное направление борьбы с вредностями в подземных горных выработках – их разжижение подаваемым в выработки свежим воздухом до допустимых концентраций.

Современное горное предприятие немыслимо без принудительной вентиляции. Прекращение проветривания влечет за собой остановку всего технологического комплекса шахты или рудника, к выводу людей на поверхность, прекращению работы всех машин и механизмов. От надежной, безотказной работы системы проветривания полностью зависит безопасность, а зачастую и жизнь людей, работающих в шахте.

В связи с необходимостью наличия в шахтных условиях надежного, необходимой мощности и управляемого источника сил движения воздуха, в качестве основного источника этих сил используется вентилятор.

Вентилятор представляет собой механическое устройство, предназначенное для перемещения воздуха по воздуховодам систем кондиционирования и вентиляции, а так же для осуществления прямой подачи воздуха в помещения либо отсоса из помещения, и создающее необходимый для этого перепад давлений (на входе и выходе вентилятора).

Вентиляторы широко применяются во всех отраслях промышленности. На их привод расходуется огромное количество электроэнергии. В частности, в горной отрасли на привод вентиляторов, обслуживающих шахту, уходит до $8 \div 10\%$ электроэнергии расходуемой всей шахтой. В связи с этим, создание высокоэкономичных вентиляторов и правильное их использование имеет большое экономическое значение.

В угольных шахтах в процессе эксплуатации постоянно изменяются длина, сечение и число горных выработок, а также утечки воздуха между выработками и естественная тяга. Все это обуславливает изменение сопротивления шахтной сети. Изменяются также производственная мощность шахт, газовыделение из горных пород и температура поступающего в шахту воздуха, количество людей, находящихся в шахте и т.д. То есть имеют место различные требования к потребному количеству воздуха, которые должны подавать вентиляторные установки.

В силу этих причин действительный вентиляционный режим всегда бывает переменным и отличается от проектного. Поэтому шахтные вентиляторные установки главного проветривания должны иметь устройства, позволяющие значительно изменять их аэродинамическую характеристику без существенного уменьшения КПД, т.е. они должны экономично и глубоко регулироваться.

Таким образом, современные тенденции развития электропривода системы проветривания шахт заключаются в разработке энергосберегающих вентиляторных установок, т.е. в отказе от длительной эксплуатации вентилятора в предельных режимах работы и использование для этой цели частотно-регулируемого привода.

Целью выпускной квалификационной работы является создание энергосберегающей системы регулирования режимов работы вентилятора главного проветривания шахты и решение ряда задач связанных с разработкой системы частотного регулирования электропривода шахтного вентилятора.

1. ШАХТНЫЕ ВЕНТИЛЯТОРНЫЕ УСТАНОВКИ ГЛАВНОГО ПРОВЕТРИВАНИЯ

1.1. Назначение и классификация вентиляторных установок

Вентиляторные установки на горных предприятиях служат для проветривания горных выработок и поддержания в них комфортных и безопасных условий труда путем создания атмосферных условий, при которых состав, скорость перемещения и температура воздуха соответствовали бы требованиям отраслевых правил безопасности [4].

Атмосферный воздух, проходя по горным выработкам, изменяет свой состав. Содержание кислорода в нем уменьшается, а углекислого газа увеличивается. Кроме того, в него попадают такие газы, как азот, оксид углерода, сероводород, сернистый газ, оксиды азота, метан, а также пыль, пары воды и другие вещества, выделяющиеся из горных пород и образующиеся при производстве горных работ.

Содержание газов в воздухе характеризуется их концентрацией, представляющей собой отношение объема (объемная концентрация) или массы (массовая концентрация) данного газа ко всему количеству газовой смеси.

Рудничный воздух в основном состоит из следующих компонентов [14]:

- кислорода, минимальное содержание которого согласно ПБ должно быть не менее 20% по объему;
- углекислого газа, максимальное допустимое содержание которого не должно превышать: 0,5% на рабочих местах и в исходящих струях участков; 0,75% в выработках с исходящей струей крыла, горизонта и шахты в целом;
- оксида углерода, объемная концентрация которого в рудничном воздухе действующих и строящихся выработок не должна превышать 0,0016%;

- оксидов азота, образующихся при взрывных работах. Их содержание не должно превышать 0,00025% по объему в пересчете на диоксид азота NO₂;
- сернистого газа, содержание которого не должно превышать 0,00035% по объему.

Особое место в рудничной атмосфере занимает метан. С воздухом метан образует горючие и взрывчатые смеси. Причем при объемной концентрации метана в воздухе до 5 – 6 % метано-воздушная смесь не взрывается; свыше 14 – 15 % - не горит и не взрывается.

Все шахты и рудники, в которых хотя бы в одной выработке был обнаружен метан, относят к опасным по газу, что влечет за собой дополнительные требования к обеспечению безопасности. При этом все опасные по газу шахты разделяются на пять категорий: I (относительная метано-обильность до 5 м³/т добычи), II (от 5 до 10 м³/т), III (от 10 до 15 м³/т), сверхкатегорные (15 м³/т и более) и опасные по внезапным выбросам. По метанообильности рудники разделяют на четыре категории: I (до 7 м³/т), II (от 7 до 14 м³/т), III (от 14 до 21 м³/т) и сверхкатегорные (21 м³/т и более) [17].

С учетом отмеченного выше, процесс проветривания горных выработок должен обеспечить в рудничном воздухе необходимое количество кислорода, а также разбавить выделяющиеся вредные газы и вещества до допустимых концентраций, что и определяет в основном объем воздуха, который необходим для проветривания. Этот процесс осуществляется с помощью специальных вентиляторов, предназначенных для горной промышленности.

По назначению вентиляторные установки подразделяются на главные, вспомогательные и местного проветривания.

Вентиляторные установки главного проветривания предназначены для вентиляции всех выработок горного предприятия (шахты, рудника, карьера) или его части (крыло, блок, панель и т.д.). В соответствии с ПБ на шахтах и

подземных рудниках эти установки располагаются на поверхности у устья герметически закрытых стволов, шурфов, штолен и скважин.

Вспомогательные вентиляторные установки предназначены для проветривания стволов и капитальных выработок при их проходке, а также отдельных участков горного предприятия. Обычно они располагаются, как и главные, на дневной поверхности.

Вентиляторные установки местного проветривания используются для вентиляции тупиковых выработок, забоев и отдельных застойных зон.

Соответственно по назначению разделяются и вентиляторы: вентиляторы главного проветривания, вспомогательные вентиляторы и вентиляторы местного проветривания.

По способу проветривания главные вентиляторные установки подразделяют на всасывающие и нагнетательные. Всасывающий способ проветривания применяют, как правило, на шахтах, опасных по газу, нагнетательный – на шахтах, не опасных по газу. Иногда применяют нагнетательно-всасывающий способ проветривания. В этом случае два вентилятора работают последовательно – один на нагнетание, а другой на всасывание.

В качестве главных и вспомогательных могут применяться одни и те же вентиляторы значительных размеров. Вентиляторные установки местного проветривания составляют отдельную группу вентиляторов, отличающихся небольшими размерами, малой мощностью привода и, как правило, небольшой производительностью.

Все выпускающиеся для горной отрасли вентиляторы относятся по конструкции к так называемым «лопастным нагнетателям». В вентиляторах этого типа энергия вращающегося ротора преобразовывается в потенциальную и кинетическую, в свою очередь сообщаемые перемещаемому воздуху [5].

Лопастные вентиляторы в соответствии с характером движения воздуха в них и формы ротора (рабочего колеса) подразделяются на осевые и радиальные, последние более известны как центробежные.

Осевые вентиляторы. Осевой вентилятор (рисунок 1) состоит из рабочего колеса (РК) 1, на втулке которого закреплены профильные (в форме крыла самолета) лопадки 2; рабочее колесо вращается в цилиндрическом корпусе или, как его часто называют, кожухе 3. За рабочим колесом располагается спрямляющий аппарат (СА) с неподвижными лопатками 4.

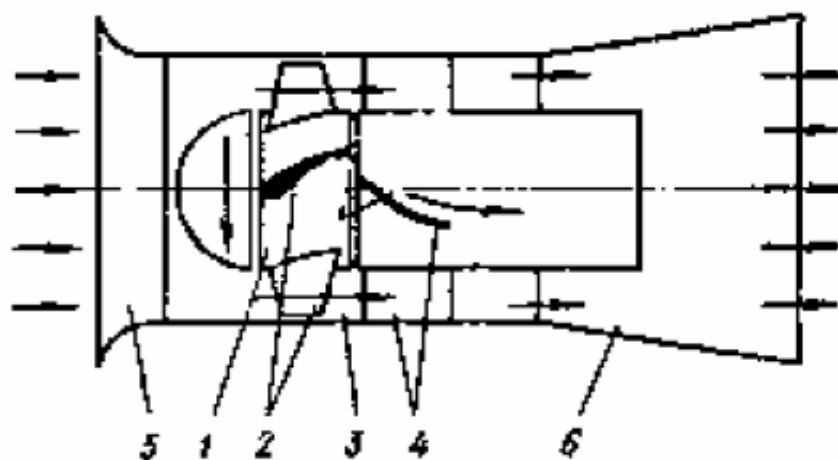


Рисунок 1 – Конструкция осевого вентилятора

Вращающееся рабочее колесо с помощью лопаток передает энергию привода перемещаемому воздуху. Лопатки рабочих колес изготавливаются из стали или пластмасс (для вентиляторов малых размеров).

Лопатки рабочего колеса могут иметь несимметричный или симметричный профиль. Осевые вентиляторы с лопатками рабочих колес симметричного типа являются реверсивными, поскольку их производительность не меняется при изменении направления вращения рабочего колеса на обратное. Вентиляторы с рабочими лопатками несимметричного типа этим качеством не обладают, их производительность при изменении направления вращения рабочего колеса резко снижается, но эти вентиляторы имеют хорошие аэродинамические характеристики и повышенный коэффициент полезного действия. Спрямляющий аппарат

обеспечивает плавный переход воздуха от лопаток рабочего колеса к выходу в диффузор или сеть и частично преобразует динамическое давление в движущемся потоке воздуха в статическое давление.

В конструкцию шахтных вентиляторов вводятся два обтекателя, назначение которых заключается в снижении аэродинамических потерь, связанных с резким изменением скоростей движения воздуха. Передний обтекатель устанавливается во входном коллекторе, перед рабочим колесом или направляющим аппаратом, задний – после спрямляющего аппарата, перед диффузором или входом в вентиляционную сеть.

В осевых вентиляторах направление движения воздушного потока совпадает с осью вращения рабочего колеса. Воздух засасывается в коллектор 5, проходит между лопатками вращающегося рабочего колеса, затем поступает в спрямляющий аппарат, оттуда в диффузор 6 и выбрасывается в атмосферу (при работе вентилятора на всасывание).

Осевые вентиляторы могут быть одноступенчатыми (с одним рабочим колесом) и двухступенчатыми. В последнем случае в кожухе вентилятора находятся две ступени, работающие последовательно и имеющие каждая свое рабочее колесо.

Между рабочими колесами находится промежуточный направляющий аппарат (НА). Конструктивно направляющий аппарат состоит из неподвижных профильных лопаток или профильных лопаток с регулируемым углом установки. Назначение направляющего аппарата – подача воздуха к рабочему колесу, установленному за ним в определенном, более эффективном направлении, и преобразование значительной части кинетической энергии потока (динамического давления) в потенциальную (статическое давление). Спрямляющий аппарат устанавливается за вторым рабочим колесом по ходу струи. Обе ступени могут находиться на одном валу или на отдельных валах (вентилятор ВОД-16). Наличие двух ступеней позволяет вентилятору развивать более высокое давление.

К достоинствам осевых вентиляторов можно отнести следующее [8]:

- относительная простота конструкции;
- простота монтажа, меньшая площадь под установку;
- простота реверса воздушной струи (большинство современных осевых вентиляторов вообще не нуждаются в устройстве реверсивных каналов);
- относительно высокая производительность;
- удобство применения вентиляторов этого типа в качестве передвижных ВМП.

Центробежные вентиляторы. Основу вентилятора (рисунок 2) составляет рабочее колесо 1, между передним и задним дисками которого закреплены профильные крыловидные лопасти таким образом, что их входная кромка располагается на окружности меньшего радиуса, чем выходная хвостовая часть. Рабочее колесо может быть с лопастями, загнутыми вперед по ходу колеса, радиальными и загнутыми назад, назначение рабочего колеса – передавать энергию привода вентилятора перемещаемому воздуху. Рабочее колесо вращается в спиральном кожухе 2, выполненном из листовой стали. Улиткообразный кожух предназначен для подачи воздуха в определенном направлении и частичного преобразования динамического давления в потоке воздуха в статическое давление. Воздух засасывается в вентилятор через входной коллектор 3, в котором установлены не вращающиеся, а только поворачивающиеся каждая относительно своей оси лопасти 4 направляющего аппарата. Направляющий аппарат предназначен для подачи воздуха к рабочему колесу с определенной скоростью и под определенным углом, это позволяет регулировать рабочие режимы вентилятора.

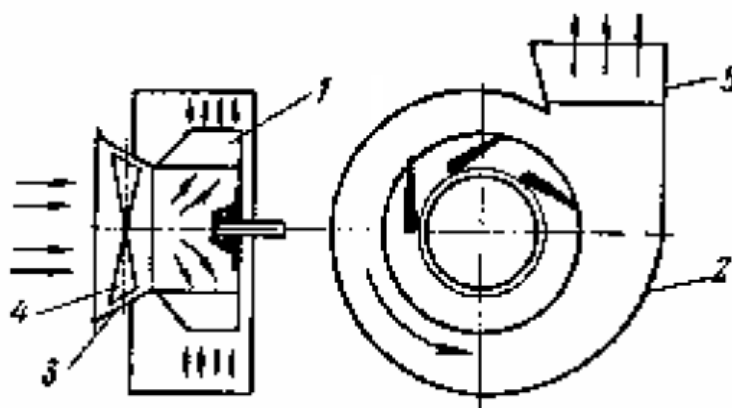


Рисунок 2 – Конструкция центробежного вентилятора

В рабочее колесо воздух входит параллельно оси вала вентилятора, затем под действием тяги, развиваемой лопатками, и центробежной силы поворачивает на 90° , проходит между лопатками, выбрасывается в периферийную часть кожуха и выходит через диффузор 5 в атмосферу (при работе вентилятора на всасывание). Диффузор является дополнительным преобразователем динамического давления в потоке на выходе из кожуха в давление статическое.

Центробежные вентиляторы могут выполняться с односторонним или двусторонним всасом. В последнем случае на валу вентилятора устанавливается спаренное рабочее колесо, соединенное втулками большего диаметра. Воздух поступает на рабочее колесо с двух сторон, из двух направляющих аппаратов. Двустороннее всасывание позволяет разгрузить подшипники вала от осевого давления и уменьшить сопротивление движущемуся воздуху во всасывающей части. Последнее обстоятельство позволяет увеличить производительность центробежного вентилятора.

К достоинствам центробежных вентиляторов можно отнести следующее [8]:

- высокая механическая надежность и большой срок службы, связанные с применением более низких скоростей вращения рабочего колеса;
- высокая устойчивость и надежность рабочих режимов, связанные с видом характеристик этих вентиляторов;

- меньшая шумность при работе;
- относительно высокая депрессия;
- большая глубина регулирования;
- меньшая чувствительность к загрязненному воздуху.

1.2. Устройство вентиляторных установок главного проветривания

Конструкция вентиляторной установки зависит от ее назначения, расположения, типа применяемых вентиляторов и требований, отраслевых Правил безопасности и Правил технической эксплуатации, предъявляемых к установкам различных типов.

В составе вентиляторных установок главного проветривания одинаково широко применяются как центробежные, так и осевые вентиляторы. Центробежные вентиляторы главного проветривания в соответствии с ГОСТ 11004–84 изготавливаются одноступенчатыми с односторонним (ВЦ) и двусторонним (ВЦД) подводом воздуха с диаметрами рабочих колес от 1,6 до 4,75 м, номинальной подачей от 25 до 630 м³/с и номинальным статическим давлением от 2450 до 7000 Па [7].

Основным способом регулирования рабочего режима центробежных вентиляторов главного проветривания является изменение угла установки лопаток входного направляющего аппарата (НА). На отдельных моделях центробежных вентиляторов предусмотрено регулирование режима изменением частоты вращения приводного электродвигателя.

Осевые вентиляторы главного проветривания, выпускаемые серийно, охватывают диапазон подач от 10 до 580 м³/с и статических давлений от 600 до 3900 Па и предназначены для проветривания горных предприятий с относительно небольшим сопротивлением вентиляционной сети. Все они выполнены по двухступенчатой схеме и имеют спрямляюще-направляющий аппарат, расположенный между рабочими колесами 1-й и 2-й ступеней, и спрямляющий аппарат за рабочим колесом 2-й ступени.

Главные вентиляторные установки должны состоять не менее чем из двух вентиляторных агрегатов, один из которых должен быть резервным. Вентиляторы на газовых шахтах должны быть одного типоразмера. На негазовых шахтах главные вентиляторные установки могут состоять из одного агрегата с резервным электроприводом.

Кроме того, главные вентиляторные установки должны быть оборудованы реверсивными устройствами, обеспечивающими изменение направления воздушного потока (вентиляционной струи) на противоположное во всех горных выработках, проветриваемых за счет общешахтной депрессии. Если уровень шума вентиляторных установок выше допустимых норм, то они должны оборудоваться глушителями шума.

Рабочий и резервный вентиляторы соединяются со стволом шахты системой вентиляционных каналов: подводящего, всасывающих, нагнетательных, обводных и диффузора с выходной частью. Каналы выполняются в бетоне в комплексе со зданием, в котором размещаются вентиляторные агрегаты.

Таким образом, в общем случае в состав вентиляторной установки главного проветривания входят: два вентиляторных агрегата, состоящих из вентиляторов с электродвигателями и аппаратуры управления, автоматизации и контроля; вспомогательное оборудование для переключения и реверсирования воздушного потока; система вентиляционных каналов, обеспечивающих прямую и реверсивную работу каждого из вентиляторов; глушители шума.

Вспомогательное оборудование включает в себя: ляды, с помощью которых перекрываются вентиляционные каналы; механизмы для открывания и закрывания ляд; устройства для уплотнения ляд; люки для доступа в каналы. Ляды выполняются по типу падающих или самоходных вертикальных дверей. В качестве привода ляд применяются лебедки с системой канатов (падающие ляды), а также цепной привод с червячным

редуктором и винтовой с мотор-редуктором для самоходных вертикальных ляд.

Компоновка вентиляторной установки определяется типом вентилятора: осевой или центробежный, с одно- или двухсторонним входом, реверсивный или нет.

Центробежные вентиляторы являются нереверсивными. Поэтому вентиляторные установки с центробежными вентиляторами имеют обводные каналы, по которым воздух нагнетается в шахту при реверсивном режиме работы вентилятора. Для компоновки таких установок характерен также общий диффузор для обоих вентиляторов, который на некоторой высоте переходит в сужающуюся надстройку (конфузор).

Конструкция и основные части вентиляторной установки главного проветривания представлены на рисунке 1.

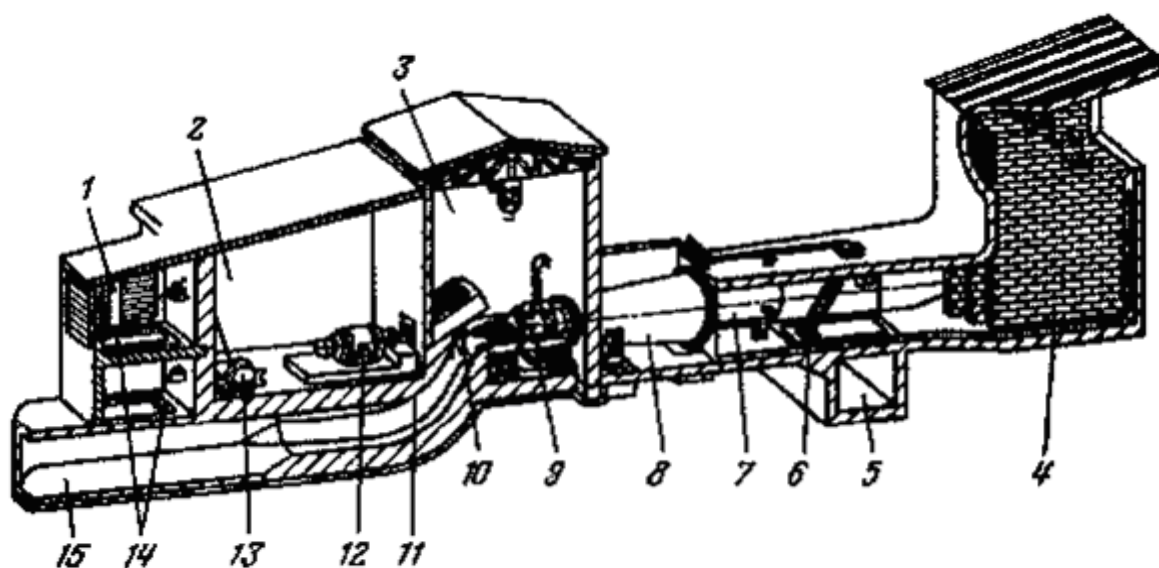


Рисунок 3 – Шахтная вентиляторная установка в разрезе

На рисунке 3 обозначены: 1 – воздухоподающее отделение; 2 – отделение электродвигателей; 3 – вентиляторное отделение с подъемным краном; 4 – глушитель шума; 5 – обводной канал; 6,14 – ляды; 7 – выходной канал; 8 – конический кольцевой диффузор; 9 – вентилятор; 10 –

трансмиссионный вал; 11 – колено; 12 – двигатель вентилятора; 13 – лебедка для ляд; 15 – подводный канал.

1.3. Основные требования к шахтным вентиляторным установкам главного проветривания

Рудничные вентиляторные установки относятся к горному оборудованию первой степени ответственности. От надежности их работы во многом зависит не только эффективность производства горных работ, но и сама возможность этих работ и безопасность. Поэтому к рудничным вентиляторным установкам предъявляются особые требования, главные из которых регламентируются отраслевыми нормативными документами и Правилами безопасности [7].

Вентиляторные установки должны располагаться, как правило, на поверхности шахты у устья герметически закрытых вентиляционных стволов и соединяться с ними специальными вентиляционными каналами. Подземное расположение главных вентиляторных установок запрещается, чтобы исключить выход из строя при взрыве или подземном пожаре в горных выработках шахты.

Оборудование вентиляторных установок должно иметь надежное исполнение, обеспечивающее непрерывно в течение всего срока службы устойчивую и бесперебойную подачу в шахту необходимого количества воздуха.

Надежность подачи воздуха в шахту обеспечивается соответствующим резервом, который необходимо предусматривать при обустройстве вентиляторных установок. Вентиляторы главного проветривания оснащаются двумя одинаковыми вентиляторами, тем самым обеспечивается 100 %-ный поузловой резерв основного оборудования установки. Кроме того, резерв производительности каждого вентилятора должен составлять не менее 20 % от расчетного параметра.

Вентиляторные установки главного проветривания должны обеспечивать реверсирование воздушной струи в течение 5 минут. Это осуществляется за счет обводных каналов и ляд. Расход воздуха вентилятором после реверсирования воздушного потока должен составлять не менее 60 % его производительности при обычном режиме работы.

Вентиляторы главного проветривания должны быть регулируемые, чтобы обеспечивать необходимый расход воздуха при изменяющемся сопротивлении вентиляционной сети. Причем режимы, реализуемые вентилятором при регулировании, должны быть экономичными и соответствовать требуемым значениям статического КПД.

1.4. Расчет параметров и выбор вентилятора

Основой проектирования вентиляторной установки является эксплуатационный расчет вентилятора. Целью и результатом расчета являются выбор вентилятора и определение его регулировочных параметров.

Исходными данными для расчета и выбора вентилятора являются необходимый расход воздуха для проветривания шахты ($Q_{ш}$), и расчетная депрессия вентиляционной сети шахты (H).

Согласно заданию на выполнение магистерской работы исходными данными для расчета вентилятора являются

$Q_{ш}=27\text{ м}^3/\text{сек}$ – требуемый расход воздуха в обеспечиваемой вентилятором шахтной сети;

$H=2000\text{ Па}$ – депрессия шахты.

Необходимая производительность вентилятора

$$Q_p = Q_{ш} \cdot k_{вн\text{ ут}} = 27 \cdot 1,20 = 34,2 \text{ м}^3/\text{сек},$$

где $k_{вн\text{ ут}}$ – коэффициент, учитывающий утечки через шахтный ствол и подводящие каналы вентиляторной установки. При расположении вентиляторной установки у клетьевого ствола $k_{вн\text{ ут}}=1,20$.

Выбор вентилятора для работы на вентиляционную сеть шахты производится на основе расчетных параметров Q_p и H . На диаграммы полей рабочих режимов вентиляторов серий ВОД и ВЦ (ВЦД) наносится точка с координатами Q_p и H . Полученным данным в большей степени соответствует центробежный вентилятор ВШЦ-16 с диаметром рабочего колеса 1,6 м и частотой вращения 1000 об/мин [5].

Вентилятор ВШЦ-16 относится к центробежным вентиляторам с односторонним входом и имеет консольное расположение рабочего колеса на валу роторной группы. Рабочее колесо вентилятора имеет восемь крыловидных лопаток, приваренных к заднему (коренному) и переднему (покрывному) дискам. Жесткость колеса в осевом направлении усиливается обтекателем, закрепленным на коренном диске и насаженном вместе со ступицей на консоль коренного вала при помощи шпонок.

Внешний вид вентилятора приведен на рисунке 4.

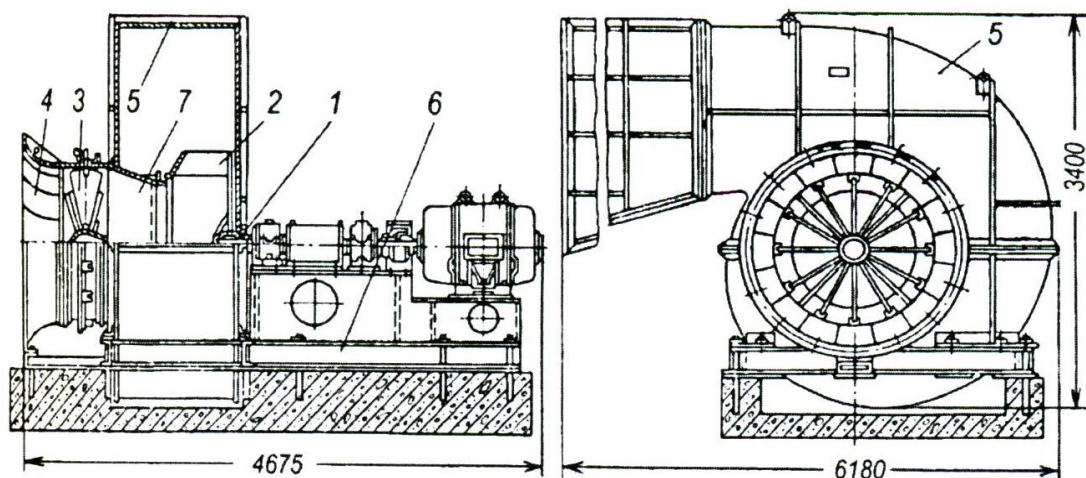


Рисунок 4 – Вентилятор одностороннего входа ВШЦ-16

Основными узлами вентилятора ВШЦ-16 являются: ротор 1 с рабочим колесом 2, входной направляющий лопаточный аппарат 3, конфузорный коллектор 4, всасывающий патрубок 7, кожух спирального отвода 5 и опорная рама 6. Данный вентилятор не имеет жесткой рамы, что характерно для всех вентиляторов с центральным расположением рабочего колеса. Вал ротора вращается в двух отдельных подшипниковых опорах, смонтированных на индивидуальных рамах.

Характеристики вентилятора приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Технические характеристики вентилятора ВШЦ-16

Тип	ВШЦ-16
Диаметр рабочего колеса, мм	1600
Подача номинальная, м ³ /с	21,5
Подача в пределах раб. зоны, м ³ /с	12 ÷ 43
Статическое давление в раб. зоне, Па	1200 ÷ 3700
КПД статический максимальный, не менее	0,85
Мощность электропривода, кВт, не более	160
Частота вращения рабочего колеса, об/мин	980

Область аэродинамических характеристик вентилятора ВШЦ-16 приведена на рисунке 5.

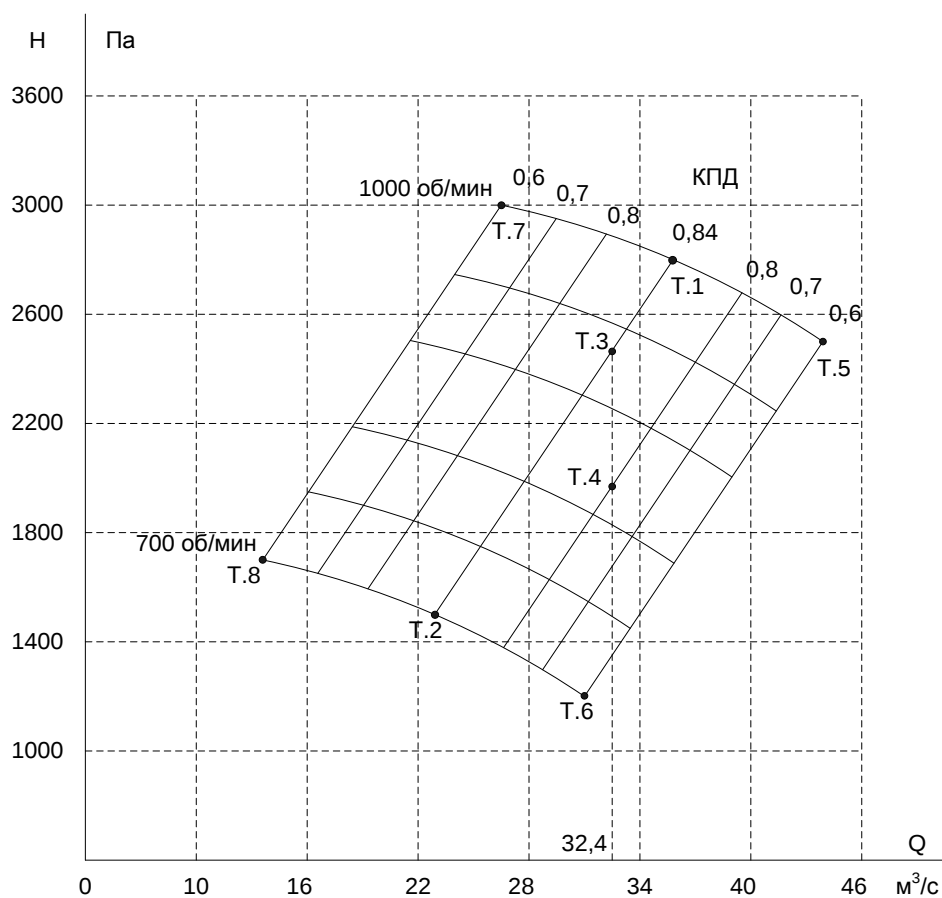


Рисунок 5 – Область аэродинамических характеристик вентилятора ВШЦ-16

Производительность, создаваемое давление и КПД вентилятора определяются по аэродинамическим характеристикам. Полная и полезная мощность и полный и полезный момент на валу вентилятора, а также скорость вращения приводного двигателя определяются расчетным путем.

Расчетные выражения имеют следующий вид [20]:

- Полная мощность на валу вентилятора, кВт:

$$P_{\text{вал.}i} = \frac{Q_i \cdot h_i}{1000 \cdot \eta_i},$$

- Полезная мощность на валу вентилятора, кВт:

$$P_{\text{пол.}i} = N_{\text{вал.}i} \cdot \eta_i,$$

- Скорость вращения приводного двигателя, рад/с:

$$\omega_i = \omega_{\text{баз}} \cdot \frac{Q_i}{Q_{\text{баз}}},$$

- Полный момент нагрузки на валу вентилятора, Н·м:

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

- Полезный момент нагрузки на валу вентилятора, Н·м:

$$M_{\text{пол.}i} = \frac{N_{\text{пол.}i}}{\omega_i}.$$

На аэродинамической характеристике выбираем точки, соответствующие номинальному, расчетному и предельному режимам работы вентилятора.

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

$$Q_1 = 36 \text{ м}^3/\text{с}, \quad h_1 = 2850 \text{ Па}, \quad \eta_1 = 84\%, \\ n_1 = 990 \text{ об/мин}, \quad \omega_1 = 103,6 \text{ рад/с}.$$

Расчетные параметры т.1:

$$P_{\text{вал.1}} = \frac{3 \cdot 2850}{1000 \cdot 0,85} = 122,14 \text{ кВт},$$

$$P_{\text{пол.1}} = 122,14 \cdot 0,84 = 102,6 \text{ кВт},$$

$$M_{\text{вал.1}} = \frac{122,14 \cdot 1000}{103,6} = 1167 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

$$M_{\text{пол.1}} = \frac{102,6 \cdot 1000}{103,6} = 979,9 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Точка 2 – точка работы вентилятора с номинальным КПД и минимальной скоростью вращения. Параметры т.2 в соответствии с аэродинамическими характеристиками вентилятора:

$$Q_2 = 23 \text{ м}^3/\text{с}, \quad h_2 = 1500 \text{ Па}, \quad \eta_2 = 84\%,$$

$$n_2 = 700 \text{ об/мин}, \quad \omega_2 = 73,3 \text{ рад/с}.$$

Расчетные параметры т.2:

$$P_{\text{вал.2}} = \frac{23 \cdot 1500}{1000 \cdot 0,84} = 41,1 \text{ кВт},$$

$$P_{\text{пол.2}} = 41,1 \cdot 0,84 = 34,5 \text{ кВт},$$

$$M_{\text{вал.2}} = \frac{41,1 \cdot 1000}{73,3} = 560,3 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

$$M_{\text{пол.2}} = \frac{34,5 \cdot 1000}{73,3} = 470,7 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Поддержание заданной постоянной производительности вентилятора $Q_p = 32,4 \text{ м}^3/\text{сек}$ необходимо осуществлять при требуемом значении давления $H = 2000 \text{ Па}$. Этому режиму соответствуют следующие предельные точки, ограниченные заданным диапазоном изменения температуры воздуха на стороне всасывания.

Точка 3 – приведенная к нормальным атмосферным условиям точка работы вентилятора с заданными параметрами $Q_p = 32,4 \text{ м}^3/\text{сек}$, $h_p = H = 2000 \text{ Па}$ и фактической температурой воздуха на стороне всасывания $t_{\text{факт}} = -40^\circ \text{С}$. Расчетное значение давления вентилятора с учетом температуры воздуха:

$$h_3 = h_p \cdot \frac{273+t_{\text{п}}}{273+t_{\text{факт}}} = 2000 \cdot \frac{273+20}{273-40} = 2515 \text{ Па.}$$

Параметры т.3 в соответствии с аэродинамическими характеристиками вентилятора:

$$Q_3 = 32,4 \text{ м}^3/\text{с}, \quad h_3 = 2515 \text{ Па}, \quad \eta_3 = 84\%.$$

Параметры базовой точки для расчета скорости вращения в т.3:

$$\eta_{\text{баз}} = 84\%, \quad \omega_{\text{баз}} = 103,6 \text{ рад/с}, \quad Q_{\text{баз}} = 36 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Расчетные параметры т.3:

$$P_{\text{вал.3}} = \frac{32,4 \cdot 2515}{1000 \cdot 0,83} = 97 \text{ кВт},$$

$$\omega_3 = 103,6 \cdot \frac{32,4}{36} = 94,23 \text{ рад/с},$$

$$M_{\text{вал.3}} = \frac{97 \cdot 1000}{94,23} = 1029 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Точка 4 – приведенная к нормальным атмосферным условиям точка работы вентилятора с заданными параметрами $Q_p = 32,4 \text{ м}^3/\text{сек}$, $h_p = H = 2000 \text{ Па}$ и фактической температурой воздуха на стороне всасывания $t_{\text{факт}} = +30^\circ \text{C}$. Расчетное значение давления вентилятора с учетом температуры воздуха:

$$h_4 = h_p \cdot \frac{273+t_{\text{п}}}{273+t_{\text{факт}}} = 2000 \cdot \frac{273+20}{273+30} = 1934 \text{ Па.}$$

Параметры т.4 в соответствии с аэродинамическими характеристиками вентилятора:

$$Q_4 = 32,4 \text{ м}^3/\text{с}, \quad h_4 = 1934 \text{ Па}, \quad \eta_4 = 80\%.$$

Параметры базовой точки для расчета скорости вращения в т.3:

$$\eta_{\text{баз}} = 80\%, \quad \omega_{\text{баз}} = 103,6 \text{ рад/с}, \quad Q_{\text{баз}} = 40 \text{ м}^3/\text{сек}.$$

Расчетные параметры т.4:

$$P_{\text{вал.4}} = \frac{32,4 \cdot 1934}{1000 \cdot 0,8} = 78,33 \text{ кВт},$$

$$\omega_4 = 104,7 \cdot \frac{32,4}{40} = 84,8 \text{ рад/с},$$

$$M_{\text{вал.4}} = \frac{78,33 \cdot 1000}{84,8} = 1069 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Наибольшая нагрузка двигателя будет иметь место при работе вентилятора в точках на линии минимального значения КПД при наибольшей производительности (точки 5 и 7), наименьшая – при работе с наименьшей производительностью (точки 6 и 8). Определим параметры граничных точек области аэродинамических характеристик вентилятора ВШЦ-16 и оценим степень изменения нагрузки электродвигателя при изменении параметров вентилятора в допустимых пределах.

Точка 5. Параметры т.5 в соответствии с аэродинамическими характеристиками вентилятора:

$$Q_5 = 44 \text{ м}^3/\text{с}, \quad h_5 = 2500 \text{ Па}, \quad \eta_5 = 70\%, \quad \omega_5 = 103,6 \text{ рад/с}.$$

Полный момент нагрузки на валу вентилятора при работе в т.5:

$$P_{\text{вал.5}} = \frac{44 \cdot 2500}{1000 \cdot 0,7} = 157,1 \text{ кВт},$$

$$P_{\text{пол.5}} = 157,1 \cdot 0,7 = 110 \text{ кВт},$$

$$M_{\text{вал.5}} = \frac{157,1 \cdot 1000}{103,6} = 1501 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

$$M_{\text{пол.5}} = \frac{110 \cdot 1000}{103,6} = 1051 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Точка 6. Параметры т.6 в соответствии с аэродинамическими характеристиками вентилятора:

$$Q_6 = 31 \text{ м}^3/\text{с}, \quad h_6 = 1200 \text{ Па}, \quad \eta_6 = 70\%, \quad \omega_6 = 73,3 \text{ рад/с}.$$

Полный момент нагрузки на валу вентилятора при работе в т.6:

$$P_{\text{вал.6}} = \frac{31 \cdot 1200}{1000 \cdot 0,7} = 53,1 \text{ кВт},$$

$$M_{\text{вал.6}} = \frac{53,1 \cdot 1000}{73,3} = 725 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Точка 7. Параметры т.7 в соответствии с аэродинамическими характеристиками вентилятора:

$$Q_7 = 26 \text{ м}^3/\text{с}, \quad h_7 = 3000 \text{ Па}, \quad \eta_7 = 70\%, \quad \omega_7 = 103,6 \text{ рад/с}.$$

Расчетные параметры т.7:

$$P_{\text{вал.7}} = \frac{26 \cdot 3000}{1000 \cdot 0,7} = 111,4 \text{ кВт},$$

$$P_{\text{пол.7}} = 111,4 \cdot 0,7 = 78 \text{ кВт},$$

$$M_{\text{вал.7}} = \frac{111,4 \cdot 1000}{103,6} = 1064 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

$$M_{\text{пол.7}} = \frac{78 \cdot 1000}{103,6} = 744,9 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Точка 8. Параметры т.8 в соответствии с аэродинамическими характеристиками вентилятора:

$$Q_8 = 14 \text{ м}^3/\text{с}, \quad h_8 = 1700 \text{ Па}, \quad \eta_8 = 70\%, \quad \omega_8 = 73,3 \text{ рад/с}.$$

Расчетные параметры т.8:

$$P_{\text{вал.8}} = \frac{14 \cdot 1700}{1000 \cdot 0,7} = 34 \text{ кВт},$$

$$M_{\text{вал.8}} = \frac{34 \cdot 1000}{73,3} = 463,8 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

2. ВЫБОР ОБОРУДОВАНИЯ, РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕМЕНТОВ И ХАРАКТЕРИСТИК СИЛОВОЙ ЦЕПИ

2.1. Выбор 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 точке 5, где $P_{\text{вал.5}} = 157,1 \text{ кВт}$, а в режиме поддержания производительности – в точке 3 при отрицательной температуре воздуха, где $P_{\text{вал.3}} = 97 \text{ кВт}$.

В качестве приводного двигателя выбираем ближайший больший по мощности асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором - АИР355S6, номинальная мощность которого равна 160 кВт. Данный двигатель удовлетворяет работе вентилятора во всей области

аэродинамических характеристик при нормальных атмосферных условиях. Технические данные электродвигателя сведены в таблицу 2.

Таблица 2 – Технические данные электродвигателя АИР355S6

n_0 , об/мин	U_{1H} , В	$P_{дв.н}$, кВт	При номинальной нагрузке			$J_{дв}$, кг·м ²
			s_H , %	$\cos\varphi_H$	η_H , %	
1000	380	160	2,2	0,9	94	7,3

Таблица 2 – Продолжение

$m_{II} = \frac{M_{пуск}}{M_H}$	$m_K = \frac{M_{макс}}{M_H}$	$m_M = \frac{M_{мин}}{M_H}$	$k_{идв} = \frac{I_{пуск}}{I_H}$	Степень защиты
1,6	2	1	7	IP23

2.2. Косвенное определение параметров схемы замещения АД

Для математического моделирования асинхронного двигателя необходимо определить параметры его схемы замещения. Наряду с различными экспериментальными способами существует возможность косвенного расчета параметров АД исходя из справочных данных. Т-образная схема замещения асинхронного двигателя для одной фазы представлена на рисунке 6.

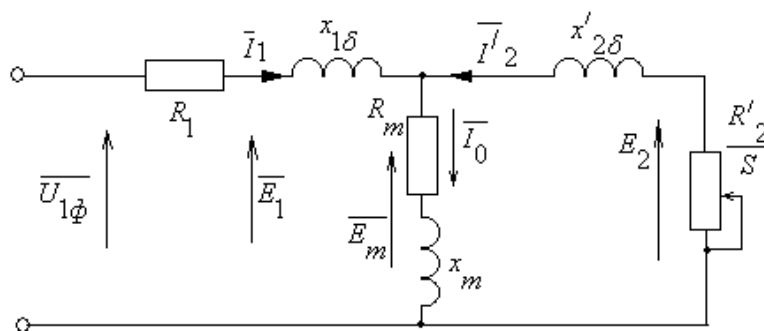


Рисунок 6 – Схема замещения асинхронного двигателя

Основные уравнения асинхронного двигателя, соответствующие принятой схеме замещения:

$$\bar{U}_{1\Phi} - \bar{E}_m - j \cdot X_1 \cdot \bar{I}_1 - R_1 \cdot \bar{I}_1 = 0,$$

$$\bar{E}_m + j \cdot X_2' \cdot \bar{I}_2' + R_2' \cdot \bar{I}_2' / s = 0,$$

$$\bar{I}_1 + \bar{I}_2' - \bar{I}_0 = 0.$$

Векторная диаграмма токов, ЭДС и напряжений, удовлетворяющих вышеприведенным уравнениям изображена на рисунке 7.

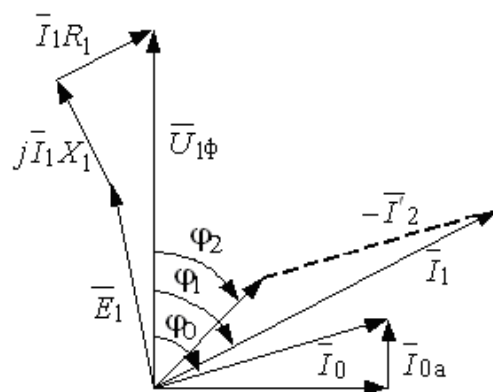


Рисунок 7 – Векторная диаграмма асинхронной машины

Определим параметры Т-образной схемы замещения асинхронного двигателя по его каталожным данным.

Синхронная угловая частота вращения двигателя

$$\omega_0 = \frac{\pi \cdot n_0}{30} = \frac{3,14 \cdot 1000}{30} = 104,7 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

Номинальная скорость вращения двигателя

$$n_{\text{дв.н}} = (1 - s_{\text{н}}) \cdot n_0 = (1 - 0,022) \cdot 1000 = 978 \frac{\text{об}}{\text{мин}}.$$

Номинальная угловая скорость вращения двигателя

$$\omega_{\text{дв.н}} = (1 - s_{\text{н}}) \cdot \omega_0 = (1 - 0,022) \cdot 104,7 = 102,4 \frac{\text{об}}{\text{мин}}.$$

Номинальный момент двигателя

$$M_{\text{дв.н}} = \frac{P_{\text{дв.н}}}{\omega_{\text{дв.н}}} = \frac{160000}{102,4} = 1562 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Номинальный фазный и линейный ток статора

$$I_{1\Phi H} = I_{1\Phi H} = \frac{P_{\text{ДВ.Н}}}{3 \cdot U_{1\Phi H} \cdot \cos \varphi_H \cdot \eta_H} = \frac{160000}{3 \cdot 220 \cdot 0,9 \cdot 0,94} = 286,55 \text{ А.}$$

Ток холостого хода асинхронного двигателя:

$$I_0 = \sqrt{\frac{I_{11}^2 - (p_* \cdot I_{1H} \cdot (1-s_H) / (1-p_* \cdot s_H))^2}{1 - (p_* \cdot (1-s_H) / (1-p_* \cdot s_H))^2}} =$$

$$= \sqrt{\frac{217,07^2 - (0,75 \cdot 286,55 \cdot (1-0,022) / (1-0,75 \cdot 0,022))^2}{1 - (0,75 \cdot (1-0,022) / (1-0,75 \cdot 0,022))^2}} = 57,22 \text{ А,}$$

$$I_{11} = \frac{p_* \cdot P_H}{3 \cdot U_{1\Phi} \cdot \cos \varphi_{p_*} \cdot \eta_{p_*}} = \frac{0,75 \cdot 160000}{3 \cdot 220 \cdot 0,891 \cdot 0,94} = 217,07 \text{ А – ток статора двигателя}$$

при частичной нагрузке;

$\eta_{p_*} = \eta_H = 0,94$ – КПД при частичной нагрузке;

$\cos \varphi_{p_*} = 0,98 \cdot \cos \varphi_H = 0,98 \cdot 0,9 = 0,891$ – коэффициент мощности при частичной нагрузке;

$p_* = P / P_H = 0,75$ – коэффициент загрузки двигателя;

Коэффициент мощности при частичной нагрузке $p_* = 0,75$ значительно отличается от коэффициента мощности при номинальной нагрузке, причем это отличие в значительной степени зависит от мощности двигателя и для известных серий асинхронных двигателей с достаточной для практики точностью подчиняется зависимости, приведенной на рисунке 8.

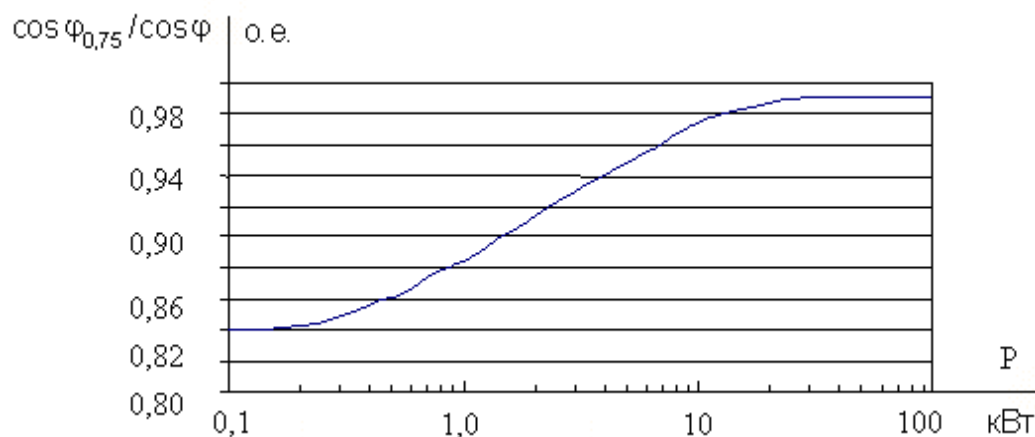


Рисунок 8 – Зависимость $\cos \varphi_{0,75} / \cos \varphi_H$ от мощности асинхронного двигателя

Из формулы Клосса определим соотношение для расчета критического скольжения

$$s_{\kappa} = s_{\text{н}} \cdot \frac{k_{\text{max}} + \sqrt{k_{\text{max}}^2 - (1 - 2 \cdot s_{\text{н}} \cdot \beta \cdot (k_{\text{max}} - 1))}}{1 - 2 \cdot s_{\text{н}} \cdot \beta \cdot (k_{\text{max}} - 1)} =$$

$$= 0,022 \cdot \frac{2 + \sqrt{2^2 - (1 - 2 \cdot 0,022 \cdot 1 \cdot (2 - 1))}}{1 - 2 \cdot 0,022 \cdot 1 \cdot (2 - 1)} = 0,086 \text{ о.е.}$$

В первом приближении принимаем $\beta = 1$.

Определяем значения ряда промежуточных коэффициентов

$$C_1 = 1 + \frac{I_0}{2 \cdot k_i \cdot I_{\text{н}}} = 1 + \frac{57,22}{2 \cdot 7 \cdot 286,55} = 1,014,$$

$$A_1 = \frac{m \cdot U_{1\phi}^2 \cdot (1 - s_{\text{н}})}{2 \cdot C_1 \cdot k_{\text{max}} \cdot P_{\text{н}}} = \frac{3 \cdot 220^2 \cdot (1 - 0,022)}{2 \cdot 1,014 \cdot 2 \cdot 160000} = 0,219.$$

Активное сопротивление ротора, приведенное к обмотке статора

$$R'_2 = \frac{A_1}{\left(\beta + \frac{1}{s_{\kappa}}\right) \cdot C_1} = \frac{0,229}{\left(1 + \frac{1}{0,086}\right) \cdot 1,014} = 0,017 \text{ Ом.}$$

Активное сопротивление статорной обмотки

$$R_1 = C_1 \cdot R'_2 \cdot \beta = 1,014 \cdot 0,017 \cdot 1 = 0,017 \text{ Ом.}$$

Определим параметр γ , который позволяет найти индуктивное сопротивление короткого замыкания

$$\gamma = \sqrt{\frac{1}{s_{\kappa}^2} - \beta^2} = \sqrt{\frac{1}{0,086^2} - 1^2} = 11,561.$$

Тогда сопротивление короткого замыкания

$$X_{\text{кн}} = \gamma \cdot C_1 \cdot R'_2 = 11,561 \cdot 1,014 \cdot 0,017 = 0,201 \text{ Ом.}$$

Индуктивное сопротивление рассеяния роторной обмотки, приведенное к статорной

$$X'_{2\sigma} = \frac{0,58 \cdot X_{\text{кн}}}{C_1} = \frac{0,58 \cdot 0,201}{1,014} = 0,115 \text{ Ом.}$$

Индуктивное сопротивление рассеяния статорной обмотки

$$X_{1\sigma} = 0,42 \cdot X_{\text{кн}} = 0,42 \cdot 0,201 = 0,084 \text{ Ом.}$$

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

$$E_m = \sqrt{(U_{1\phi} \cdot \cos\varphi_n - R_1 \cdot I_{1n})^2 + (U_{1\phi} \cdot \sin\varphi_n - X_{1\sigma} \cdot I_{1n})^2} = \\ = \sqrt{(220 \cdot 0,9 - 0,017 \cdot 286,55)^2 + (220 \cdot 0,436 - 0,084 \cdot 286,55)^2} = 205,93 \text{ В.}$$

Тогда индуктивное сопротивление намагничивания определится как

$$X_{\mu n} = \frac{E_m}{I_0} = \frac{205,93}{57,22} = 3,599 \text{ Ом.}$$

По найденным значениям C_1 , R' и $X_{\text{кн}}$ определим критическое скольжение

$$s_{\text{к1}} = \frac{C_1 \cdot R'_2}{\sqrt{R_1^2 + X_{\text{кн}}^2}} = \frac{1,014 \cdot 0,017}{\sqrt{0,017^2 + 0,201^2}} = 0,086 \text{ о.е.}$$

Индуктивность рассеяния статорной обмотки

$$L_{\sigma 1} = \frac{X_{1\sigma}}{2 \cdot \pi \cdot f_1} = \frac{0,084}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,00027 \text{ Гн.}$$

Индуктивность рассеяния роторной обмотки, приведенная к статорной

$$L'_{\sigma 2} = \frac{X'_{2\sigma}}{2 \cdot p \cdot f_1} = \frac{0,115}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,00037 \text{ Гн.}$$

Индуктивность ветви намагничивания

$$L_{\mu} = \frac{X_{\mu n}}{2 \cdot \pi \cdot f_1} = \frac{3,599}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,011 \text{ Гн.}$$

Эквивалентная индуктивность обмотки статора

$$L_1 = L_{\sigma 1} + L_{\mu} = 0,00027 + 0,011 = 0,01127 \text{ Гн.}$$

Эквивалентная индуктивность обмотки ротора

$$L_2 = L'_{\sigma 2} + L_{\mu} = 0,00037 + 0,011 = 0,01137 \text{ Гн.}$$

Коэффициент рассеяния

$$\sigma = 1 - \frac{L_{\mu}^2}{L_1 \cdot L_2'} = 1 - \frac{0,011^2}{0,01127 \cdot 0,01137} = 0,056.$$

Параметры схемы замещения сведены в таблицу 3.

Таблица 3 – Параметры схемы замещения электродвигателя

$R_1, \text{Ом}$	$X_{1\sigma}, \text{Ом}$	$L_{1\sigma}, \text{Гн}$	$X_{\mu n}, \text{Ом}$	$L_{\mu}, \text{Гн}$	$R_2', \text{Ом}$	$X_{2\sigma}', \text{Ом}$	$L_{2\sigma}', \text{Гн}$	$X_{\mu n}, \text{Ом}$
0,017	0,084	$0,27 \cdot 10^{-3}$	3,599	0,011	0,017	0,115	$0,37 \cdot 10^{-3}$	0,201

2.3. Построение механических характеристик вентилятора

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

- Номинальный КПД $\eta_n = 84\%$;
- Номинальная скорость вращения $n_n = 990 \text{ об/мин}$, $\omega_n = 102,4 \text{ рад/с}$;
- Номинальная производительность $Q_n = 32,4 \text{ м}^3/\text{с}$;
- Номинальное давление $h_n = 2850 \text{ Па}$.

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

$$M_{\text{с.вент}i}(\omega) = a_i \cdot M_{\text{пол}i} + (1 + b_i) \cdot M_{\text{пол}i} \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^x,$$

где a_i и b_i - коэффициенты постоянных и переменных потерь вентилятора в режиме работы с постоянным значением КПД.

Момент постоянных потерь на валу вентилятора

$$a_i \cdot M_{\text{пол}i} = \Delta M_{\text{пост}} = \text{const}.$$

Механическая характеристика вентилятора в режиме работы с номинальным КПД $\eta_n = 84\%$ (точки 1 и 2)

Из условия равенства постоянных и переменных потерь вентилятора в номинальном режиме работы (т.1) определим значения коэффициентов потерь при работе вентилятора с $\eta_n=84\%$:

$$a_n = b_n = \frac{1-\eta_n}{2 \cdot \eta_n} = \frac{1-0,84}{2 \cdot 0,84} = 0,095.$$

Тогда момент постоянных потерь на валу вентилятора

$$\Delta M_{\text{пост}} = a_n \cdot M_{\text{полн}} = 0,095 \cdot 979,9 = 93,33 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Из условия

$$M_{\text{вал.2}} = \Delta M_{\text{пост}} + (1 + b_n) \cdot M_{\text{полн}} \cdot \left(\frac{\omega_2}{\omega_n} \right)^x$$

после подстановки численных значений

$$560,3 = 93,33 + (1 + 0,095) \cdot 979,9 \cdot \left(\frac{73,3}{102,4} \right)^x$$

и решения уравнения относительно x определим значение показателя степени механической характеристики вентилятора при регулировании производительности с номинальным значением КПД $\eta_n=84\%$:

$$x=2,33.$$

В результате получаем общее выражение для механической характеристики вентилятора в режиме регулирования производительности с номинальным КПД $\eta_n=84\%$

$$M_{\text{с вент}}(\omega) = 93,33 + (1 + 0,095) \cdot 979,9 \cdot \left(\frac{\omega}{102,4} \right)^{2,33}. \quad (1)$$

Механическая характеристика вентилятора в режиме работы с максимальной производительностью и КПД $\eta = 70\%$ (точки 5 и 6)

Значение коэффициента постоянных потерь

$$a_5 = \frac{\Delta M_{\text{пост}}}{M_{\text{пол.5}}} = \frac{93,33}{1051} = 0,089.$$

Значение коэффициента переменных потерь

$$b_5 = \frac{1-\eta_5}{\eta_5} - a_5 = \frac{1-0,7}{0,7} - 0,089 = 0,34.$$

Из условия

$$M_{\text{вал.6}} = \Delta M_{\text{пост}} + (1 + b_5) \cdot M_{\text{пол.5}} \cdot \left(\frac{\omega_6}{\omega_5} \right)^x$$

после подстановки численных значений

$$725 = 93,33 + (1 + 0,34) \cdot 1051 \cdot \left(\frac{73,3}{102,4} \right)^x$$

и решения уравнения относительно x определим значение показателя степени механической характеристики вентилятора при регулировании производительности с номинальным значением КПД $\eta=70\%$:

$$x=2,25.$$

В результате получаем общее выражение для механической характеристики вентилятора в режиме регулирования производительности с номинальным КПД $\eta=70\%$

$$M_{\text{с вент}}(\omega) = 93,33 + (1 + 0,34) \cdot 1051 \cdot \left(\frac{\omega}{102,4} \right)^{2,25}. \quad (2)$$

Механическая характеристика вентилятора в режиме работы с максимальным давлением и КПД $\eta = 70\%$ (точки 7 и 8)

Значение коэффициента постоянных потерь

$$a_7 = \frac{\Delta M_{\text{пост}}}{M_{\text{пол.7}}} = \frac{93,33}{744,9} = 0,125.$$

Значение коэффициента переменных потерь

$$b_7 = \frac{1-\eta_7}{\eta_7} - a_7 = \frac{1-0,7}{0,7} - 0,125 = 0,3.$$

Из условия

$$M_{\text{вал.8}} = \Delta M_{\text{пост}} + (1 + b_7) \cdot M_{\text{пол.7}} \cdot \left(\frac{\omega_8}{\omega_7} \right)^x.$$

после подстановки численных значений

$$463,8 = 93,33 + (1 + 0,3) \cdot 744,9 \cdot \left(\frac{73,3}{102,4} \right)^x$$

и решения уравнения относительно x определим значение показателя степени механической характеристики вентилятора при регулировании производительности с номинальным значением КПД $\eta=70\%$:

$$x=2,7.$$

В результате получаем общее выражение для механической характеристики вентилятора в режиме регулирования производительности с номинальным КПД $\eta=70\%$

$$M_{\text{с вент}}(\omega) = 93,33 + (1 + 0,3) \cdot 744,9 \cdot \left(\frac{\omega}{102,4} \right)^{2,7}. \quad (3)$$

Механические характеристики вентилятора, рассчитанные по выражениям (1) – (3), приведены на рисунке 9.

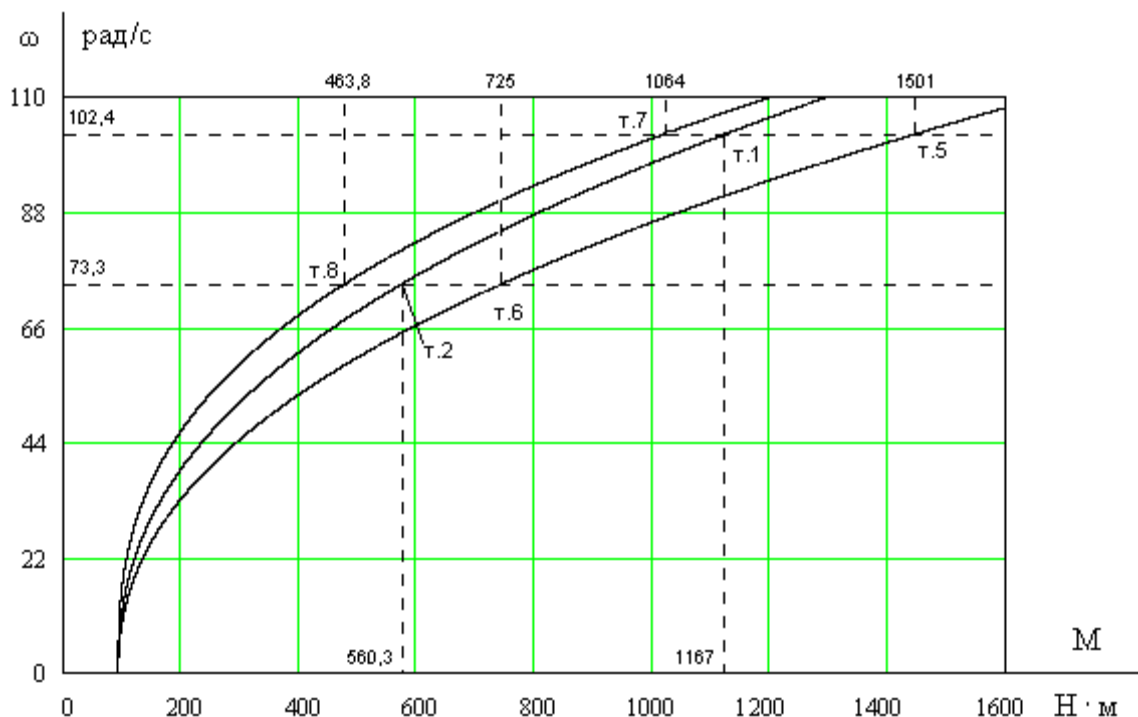


Рисунок 9 – Механические характеристики вентилятора $M_{\text{с вент}} = f(\omega)$

2.4. Построение естественной механической характеристики

двигателя

Задаваясь диапазоном скольжения от 1 до 0, построим естественную механическую характеристику асинхронного двигателя по выражению:

$$M = \frac{m_1 \cdot U_{1\Phi H}^2 \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot s \cdot \left[\left(R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + X_{\text{кн}}^2 \right]} = \frac{3 \cdot 220^2 \cdot 0,017}{104,7 \cdot s \cdot \left[\left(0,017 + \frac{0,017}{s} \right)^2 + 0,201^2 \right]}.$$

Естественная механическая характеристика $M(\omega)$ электродвигателя АИР355S6 двигателя приведена на рисунке 10.

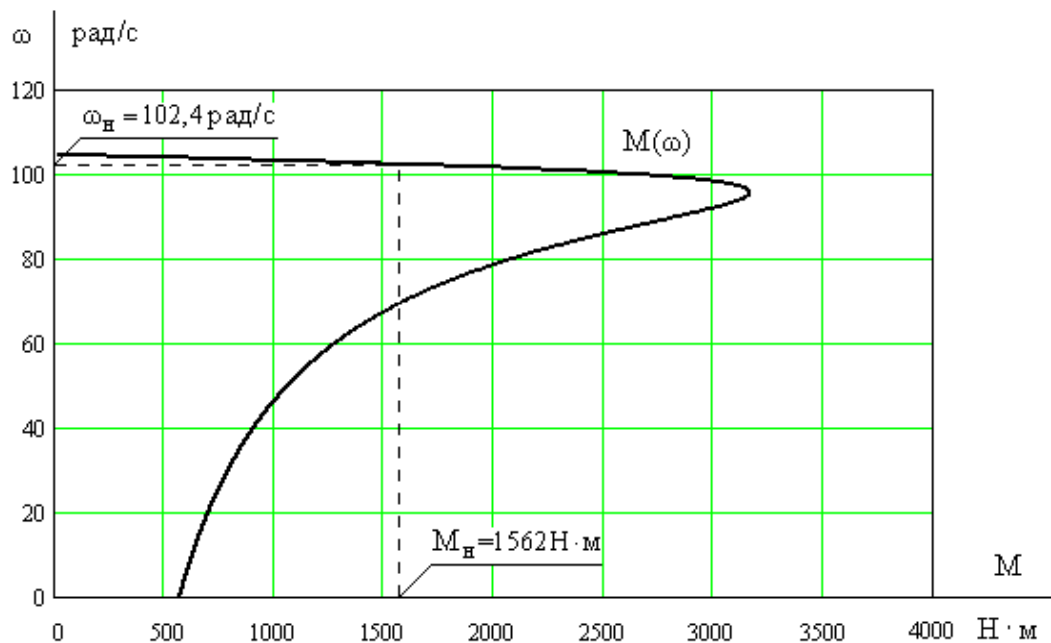


Рисунок 10 – Механическая характеристика двигателя АИР355S6

По построенной механической характеристике проведем анализ основных данных, а также сравним их с паспортными.

Номинальная скорость двигателя:

$$\omega_H = \frac{\pi \cdot n_H}{30} = \frac{3,14 \cdot 978}{30} = 102,4 \text{ рад/с.}$$

Номинальный момент по паспортным данным:

$$M_{H(\text{паспорт})} = \frac{P_H}{\omega_H} = \frac{160000}{102,4} = 1562 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

Критический момент по паспортным данным:

$$M_{\text{к(паспорт)}} = k_{\text{max}} \cdot M_{\text{Н(паспорт)}} = 2 \cdot 1562 = 3124 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Пусковой момент по паспортным данным:

$$M_{\text{п(паспорт)}} = k_{\text{п}} \cdot M_{\text{Н(паспорт)}} = 1,6 \cdot 1562 = 2499 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Критический момент по формуле Клосса:

$$M_{\text{к}} = \frac{m \cdot U_{1\phi}^2}{2 \cdot \omega_0 \cdot C_1 \cdot \left[R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_{\text{кн}}^2} \right]} = \frac{3 \cdot 220^2}{2 \cdot 104,7 \cdot 1,014 \cdot \left[0,017 + \sqrt{0,017^2 + 0,201^2} \right]} = 3169 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Номинальный момент по формуле Клосса:

$$M_{\text{Н}} = \frac{2 \cdot M_{\text{к}} \cdot (1 + a \cdot s_{\text{к}})}{\frac{s_{\text{к}}}{s} + \frac{s}{s_{\text{к}}} + 2 \cdot a \cdot s_{\text{к}}} = \frac{2 \cdot 3169 \cdot (1 + 1 \cdot 0,085)}{\frac{0,085}{0,022} + \frac{0,022}{0,085} + 2 \cdot 1 \cdot 0,085} = 1585 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

где $a = \frac{R_1}{R_2'} = \frac{0,017}{0,017} = 1.$

Пусковой момент по формуле Клосса:

$$M_{\text{п}} = \frac{2 \cdot 3169 \cdot (1 + 1 \cdot 0,085)}{\frac{0,085}{1} + \frac{1}{0,085} + 2 \cdot 1 \cdot 0,085} = 580,8 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Из полученных данных следует, что построенная механическая характеристика справедлива только на рабочем участке, т.к. значения критического и номинального моментов практически совпадают с рассчитанными по паспортным данным, что говорит о верном определении параметров схемы замещения асинхронного двигателя. Однако, значение пускового момента, рассчитанное по паспортным данным, намного больше величины расчетного пускового момента. Это объясняется тем, что при расчетах не был учтен эффект вытеснения тока в обмотке ротора.

Механическая характеристика полной нагрузки на валу двигателя

Номинальный электромагнитный момент двигателя

$$M_{\text{эм.н}} = \frac{3 \cdot U_{1\text{фн}}^2 \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot s_H \cdot \left[(X_{\text{кн}})^2 + \left(R_1 + \frac{R_2'}{s_H} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{s_H \cdot X_{\mu}} \right)^2 \right]} =$$

$$= \frac{3 \cdot 220^2 \cdot 0,017}{104,7 \cdot 0,022 \cdot \left[0,201^2 + \left(0,017 + \frac{0,017}{0,022} \right)^2 + \left(\frac{0,017 \cdot 0,017}{0,022 \cdot 3,599} \right)^2 \right]} = 1603 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Момент трения на валу двигателя

$$M_{\text{с.дв}} = M_{\text{эм.н}} - M_{\text{дв.н}} = 1603 - 1562 = 41,2 \text{ Нм}.$$

Тогда выражение для механической характеристики полного момента сопротивления на валу электродвигателя имеет вид:

$$M_{\text{сi}}(\omega) = \Delta M_{\text{с}} + (1 + b_i) \cdot M_{\text{полi}} \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_{\text{н}}} \right)^{x_i},$$

где $\Delta M_{\text{с}} = M_{\text{с.дв}} + \Delta M_{\text{пост}} = 41,2 + 93,33 = 154,53 \text{ Н} \cdot \text{м}$ – момент сопротивления от сил трения, приведенный к валу двигателя.

На рисунке 11 приведена механическая характеристика вентилятора, соответствующая режиму регулирования производительности с номинальным значением КПД $\eta_{\text{н}} = 84\%$. Все дальнейшие расчеты будем вести только для данной механической характеристики вентилятора.

$$M_{\text{с}}(\omega) = 154,53 + (1 + 0,095) \cdot 979,9 \cdot \left(\frac{\omega}{104,7} \right)^{2,33}.$$

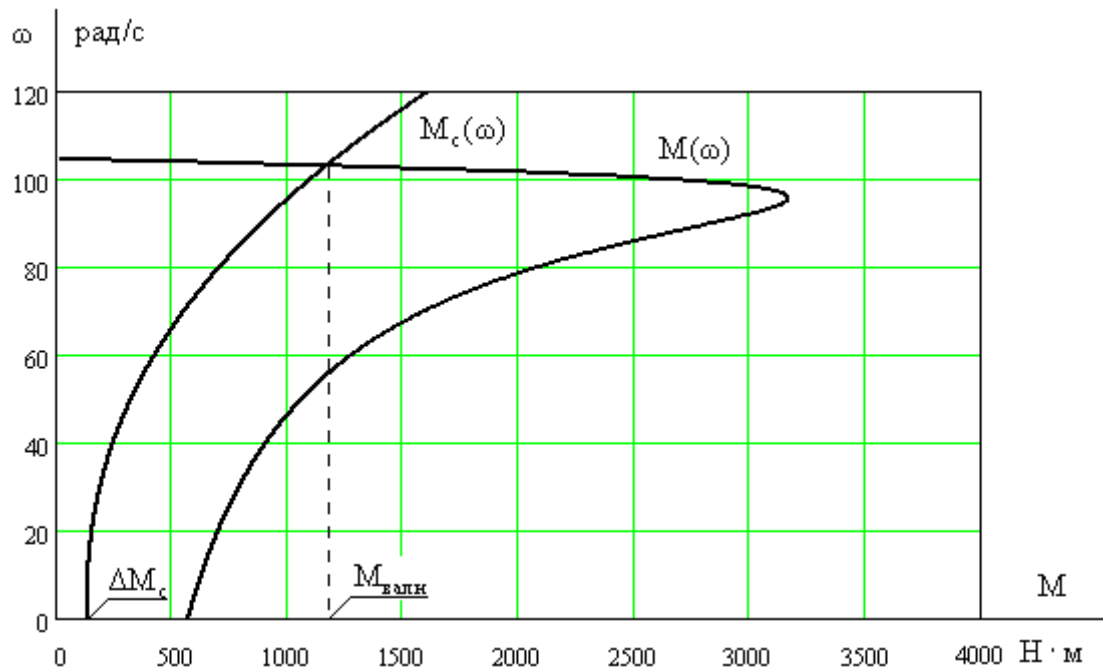


Рисунок 11 – Естественная характеристика двигателя $M(\omega)$ и характеристика полного момента сопротивления на валу двигателя $M_c(\omega)$

2.5. Построение естественной электромеханической характеристики двигателя

Естественную электромеханическую характеристику $\omega(I_1)$ рассчитаем по выражению:

$$I_1 = \sqrt{I_0^2 + I_2'(s) + 2 \cdot I_0 \cdot I_2'(s) \cdot \sin \varphi_2(s)},$$

где

$$I_2'(s) = \frac{U_{1\text{фн}}}{\sqrt{(X_{\text{кн}})^2 + \left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2}} = \frac{220}{\sqrt{\left(0,017 + \frac{0,017}{s}\right)^2 + 0,201^2}},$$

$$\sin \varphi_2(s) = \frac{X_{\text{кн}}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + X_{\text{кн}}^2}} = \frac{0,201}{\sqrt{\left(0,017 + \frac{0,017}{s}\right)^2 + 0,201^2}}.$$

Задаваясь диапазоном скольжения от 1 до 0, строим электромеханическую характеристику асинхронного двигателя по формулам для токов обмоток статора и ротора.

Электромеханическая характеристика асинхронного двигателя АИР355S6, рассчитанная в математической системе MathCAD, представлена на рисунке 12.

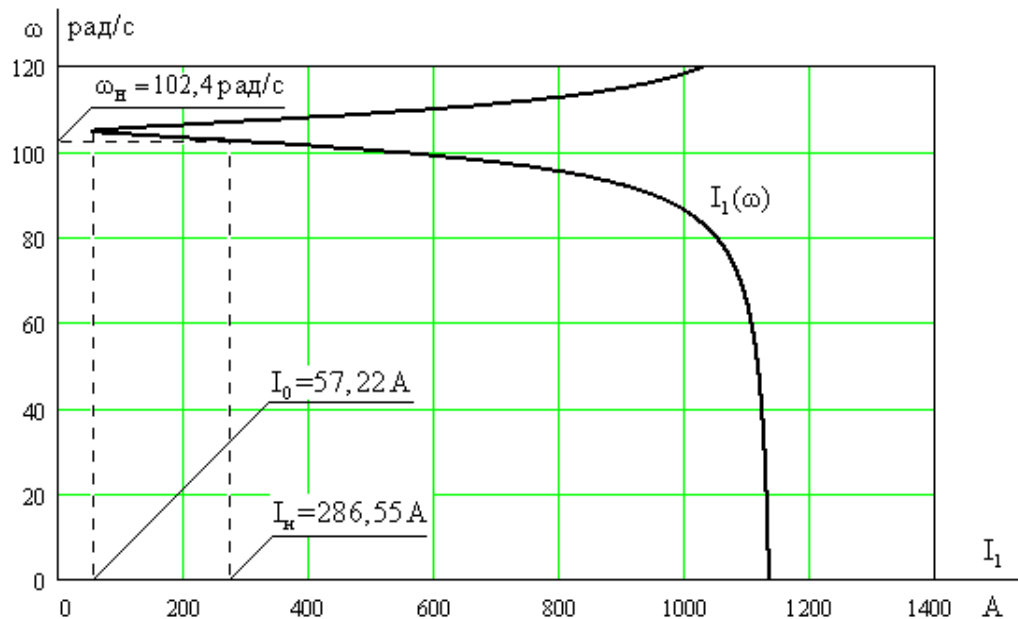


Рисунок 12 – Электромеханическая характеристика двигателя АИР355S6

Определим номинальный ток статора асинхронного двигателя I_{1H} при номинальной скорости вращения $\omega = 102,4$ рад/с.

Номинальный ток ротора двигателя при номинальной угловой скорости:

$$I'_{2H} = \frac{U_{1\Phi H}}{\pm \sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{\frac{\omega_0 - \omega_H}{\omega_0}} \right)^2 + X_{KH}^2}} =$$

$$= \frac{220}{\pm \sqrt{\left(0,017 + \frac{0,017}{\frac{104,7 - 102,4}{104,7}} \right)^2 + 0,21^2}} = 268,29 \text{ A}$$

Синус угла между вектором фазного напряжения $\overline{U_{1j}}$ и сопряженным вектором тока ротора $-\overline{I_2'}$:

$$\sin\varphi_{2H} = \frac{X_{KH}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{\omega_0 - \omega_H}\right)^2 + X_{KH}^2}} = \frac{0,21}{\sqrt{0,017^2 + \frac{0,017}{104,7 - 102,4}^2 + 0,21^2}} = 0,256.$$

Номинальный ток статора двигателя:

$$I_{1H} = \sqrt{I_0^2 + I_{2H}^2 + 2 \cdot I_0 \cdot I_{2H}' \cdot \sin\varphi_{2H}} = \sqrt{57,22^2 + 268,29^2 + 2 \cdot 57,22 \cdot 268,29 \cdot 0,256} = 288,29 \text{ А.}$$

2.6. Выбор преобразователя частоты

Преобразователи частоты для электроприводов преобразуют переменное напряжение питающей сети в переменное трехфазное напряжение с регулируемой частотой, напряжением и током. В настоящее время преобразователи частоты в большинстве случаев выполняются на базе полностью управляемых силовых полупроводниковых ключей — силовых транзисторов и запираемых тиристоров.

Выбор преобразователя частоты производим по следующим рекомендациям:

1. Параметры питающей сети: 3-х фазная сеть 380, 50 Гц.
2. Выходные параметры преобразователя частоты:
 - 3 фазы;
 - максимальное выходное (линейное) напряжение 380В;
3. Преобразователь выбирается по номинальному (длительно допустимому) току $I_{ин}$ по следующим условиям

$$I_{ин} \geq I_{лн} \cdot \frac{M_{с.макс}}{M_{дв.ном}} = 286,55 \cdot \frac{1562}{1562} = 286,55 \text{ А.}$$

Выбираем преобразователь частоты фирмы Danfoss. Основные параметры преобразователя приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Параметры преобразователя частоты

Тип	Параметры питающей сети		Выходное напряжение $U_{и}$, В	Выходная частота $f_{и}$, Гц	Выходной ток	Мощность P_2 , кВт
	$U_{лн}$, В	f_c , Гц			$I_{ин}$, А	
FC202 «Danfoss»	3x380	50	380	1000	315	160

3. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

3.1. Математическое описание процессов в асинхронном двигателе

Математическое описание АД должно отражать особенности эксплуатационных режимов работы ЭП вентилятора. Кроме того, в дальнейшем данная имитационная модель рассматривается как объект оптимального управления, на основании которого выполняется структурно-параметрический синтез системы векторного управления АД.

При составлении уравнений электрического равновесия в обмотках АД возьмём за основу систему уравнений для трёхфазной электрической машины и ряд допущений, общепринятых в теории электрических машин переменного тока:

- параметры обмоток всех фаз имеют одинаковые значения, т.е. имеет место симметричный режим работы;
- магнитное поле электрической машины имеет синусоидальное распределение вдоль воздушного зазора;
- принимаем напряжения на выходе ПЧ синусоидальной формы, заведомо не учитывая взаимного влияния между АД и ПЧ по силовому каналу;
- не учитываются потери в стали, вызываемые протеканием вихревых токов в магнитопроводе двигателя и его перемагничиванием;
- насыщение магнитной цепи АД не учитывается благодаря наложению ограничений на статорные токи;
- эффект вытеснения токов в проводниках ротора пренебрежимо мал ввиду того, что частота токов ротора при питании от ПЧ ограничена рабочим участком механической характеристики.

На основании второго закона Кирхгофа уравнения для ЭДС в обмотках статора и ротора АД можно представим в следующем виде

- для цепей статора

$$\begin{cases} U_{SA} = R_{SA} I_{SA} + \frac{d\Psi_{SA}}{dt} \\ U_{SB} = R_{SB} I_{SB} + \frac{d\Psi_{SB}}{dt} \\ U_{SC} = R_{SC} I_{SC} + \frac{d\Psi_{SC}}{dt} \end{cases} \quad (4)$$

- для цепей ротора:

$$\begin{cases} U_{RA} = R_{RA} I_{RA} + \frac{d\Psi_{RA}}{dt} \\ U_{RB} = R_{RB} I_{RB} + \frac{d\Psi_{RB}}{dt} \\ U_{RC} = R_{RC} I_{RC} + \frac{d\Psi_{RC}}{dt} \end{cases} \quad (5)$$

В данных уравнениях приняты следующие обозначения:

$U_{SA}, U_{SB}, U_{SC}, U_{RA}, U_{RB}, U_{RC}$ – мгновенные фазные напряжения статора и ротора;

$I_{SA}, I_{SB}, I_{SC}, I_{RA}, I_{RB}, I_{RC}$ – мгновенные фазные токи в обмотках статора и ротора;

$R_{SA} = R_{SB} = R_{SC} = R_S$ – активные сопротивления фаз статора;

$R_{RA} = R_{RB} = R_{RC} = R_R$ – активные сопротивления фаз ротора;

$\Psi_{SA}, \Psi_{SB}, \Psi_{SC}, \Psi_{RA}, \Psi_{RB}, \Psi_{RC}$ – потокосцепления обмоток статора и ротора.

Для связи между потокосцеплениями и токами в обмотках воспользуемся законом Ампера, тогда:

- для цепей статора:

$$\begin{cases} \Psi_{SA} = L_{SA} I_{SA} + L_{SASB} I_{SB} + L_{SASC} I_{SC} + L_{SARA} I_{RA} + L_{SARB} I_{RB} + L_{SARC} I_{RC} \\ \Psi_{SB} = L_{SBSA} I_{SA} + L_{SB} I_{SB} + L_{SBSC} I_{SC} + L_{SBRA} I_{RA} + L_{SBRB} I_{RB} + L_{SBRC} I_{RC} \\ \Psi_{SC} = L_{SCSA} I_{SA} + L_{SCSB} I_{SB} + L_{SC} I_{SC} + L_{SCRA} I_{RA} + L_{SCRB} I_{RB} + L_{SCRC} I_{RC} \end{cases} \quad (6)$$

- для цепей ротора:

$$\begin{cases} \Psi_{RA} = L_{RASA} I_{SA} + L_{RASB} I_{SB} + L_{RASC} I_{SC} + L_{RA} I_{RA} + L_{RARB} I_{RB} + L_{RARC} I_{RC} \\ \Psi_{RB} = L_{RBSA} I_{SA} + L_{RBSB} I_{SB} + L_{RBSC} I_{SC} + L_{RBRA} I_{RA} + L_{RB} I_{RB} + L_{RBRC} I_{RC} \\ \Psi_{RC} = L_{RCSA} I_{SA} + L_{RCSB} I_{SB} + L_{RCSC} I_{SC} + L_{RCRA} I_{RA} + L_{RCRB} I_{RB} + L_{RC} I_{RC} \end{cases} \quad (7)$$

Уравнения потокосцеплений показывают зависимость от токов в каждой обмотке через взаимную индукцию. В уравнениях (6 и 7) коэффициенты $L_{SA}, L_{SB}, L_{SC}, L_{RA}, L_{RB}, L_{RC}$ являются собственными индуктивностями соответствующих обмоток, все остальные – индуктивности между соответствующими обмотками.

Не забывая о том, что системы уравнений (4– 7) связывают исключительно скалярные величины, выражение для электромагнитного момента представим в следующем виде [60]:

$$M = \frac{z_p}{\sqrt{3}} [I_{RA} (\Psi_{RB} - \Psi_{RC}) + I_{RB} (\Psi_{RC} - \Psi_{RA}) + I_{RC} (\Psi_{RA} - \Psi_{RB})], \quad (8)$$

где z_p - это число пар полюсов АД.

На основании второго закона Ньютона представим уравнение для движения и равновесия моментов на валу АД:

$$J \frac{d\omega_r}{dt} = M - M_C, \quad (9)$$

где J – момент инерции на валу АД, ω_r – угловая частота вращения ротора, M – момент развиваемый АД и M_C – момент приложенный к валу двигателя со стороны нагрузки.

Изначально АД является трёхфазной электрической машиной с неявнополюсным ротором. Анализируя режимы работы АД в составе нагрузочного моментного ЭП и совокупность принятых выше допущений можно предположить правомерность использования для математического описания эквивалентной двухфазной модели.

На пути упрощения математического описания АД оказался подходящим метод пространственного вектора [1, 11], позволяющий существенно упростить и сократить вышеприведённую систему уравнений; метод позволяет связать уравнения (4 – 9) в единую систему с векторными переменными состояния. Суть метода состоит в том, что мгновенные значения симметричных трёхфазных переменных состояния (напряжение, токи, потокосцепления) можно математически преобразовать так, чтобы они были представлены одним пространственным вектором.

Представим систему уравнений с векторными переменными состояния для случая с произвольной ориентацией системы координат [19]:

$$\begin{cases} U_s = R_s I_s + \frac{d\Psi_s}{dt} + j\omega_k \Psi_s \\ U_r = R_r I_r + \frac{d\Psi_r}{dt} + j(\omega_k - \omega_r z_p) \Psi_r \\ \Psi_s = L_s I_s + L_m I_r \\ \Psi_r = L_r I_r + L_m I_s \\ M = \frac{3}{2} z_p (\Psi_{sx} I_{sy} - \Psi_{sy} I_{sx}) \\ J \frac{d\omega_r}{dt} = M - M_C \end{cases} \quad (10)$$

Здесь U_s , U_r , I_s , I_r , Ψ_s и Ψ_r - двухэлементные векторы напряжений, токов и потокосцеплений, представленные в произвольно ориентированной ортогональной (двухфазной) системе координат в виде составляющих по

координатным осям. Переменная ω_k служит для задания произвольной частоты вращения координатной системы. Вспомогательная матричная константа j служит для «переворота» компонентов векторных переменных и позволяет упростить форму записи системы уравнений.

После математических преобразований и ввода вспомогательных коэффициентов:

$$K_r = \frac{L_m}{L_r}, \quad L_3 = L_s - \frac{L_m^2}{L_r}, \quad R_3 = R_s + R_r K_r^2, \quad A_r = \frac{R_r}{L_r},$$

система уравнений имеет вид:

$$\begin{cases} U_s = R_3 I_s + j\omega_k L_3 I_s + K_r (j\omega_r z_p - A_r) \Psi_r + L_3 \frac{dI_s}{dt} \\ 0 = \frac{d\Psi_r}{dt} - K_r R_r I_s + A_r \Psi_r + \omega_k j \Psi_r - \omega_r z_p \Psi_r \\ M = \frac{3}{2} z_p K_r (\Psi_{rx} I_{sy} - \Psi_{ry} I_{sx}) \\ \frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J} (M - M_C) \end{cases} \quad (11)$$

Систему (11) перепишем, выразив производные векторов тока и потокосцепления:

$$\begin{cases} \frac{dI_s}{dt} = \frac{1}{L_e} (U_s - R_e I_s + K_r A_r \Psi_r - K_r \omega_r z_p j \Psi_r) - \omega_k j I_s \\ \frac{d\Psi_r}{dt} = R_r K_r I_s - A_r \Psi_r - \omega_k j \Psi_r + \omega_r z_p j \Psi_r \\ M = \frac{3}{2} z_p K_r (\Psi_{rx} I_{sy} - \Psi_{ry} I_{sx}) \\ \frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J} (M - M_C) \end{cases} \quad (12)$$

Представим систему уравнений (12) в скалярном виде, для чего подставим вместо векторов Ψ_r и I_s их составляющие по координатам.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dI_{sx}}{dt} = \frac{1}{L_e} (U_{sx} - R_e I_{sx} + K_r A_r \Psi_{rx} + K_r \omega_r z_p \Psi_{ry}) + \omega_k I_{sy} \\ \frac{dI_{sy}}{dt} = \frac{1}{L_e} (U_{sy} - R_e I_{sy} + K_r A_r \Psi_{ry} - K_r \omega_r z_p \Psi_{rx}) - \omega_k I_{sx} \\ \frac{d\Psi_{rx}}{dt} = R_r K_r I_{sx} - A_r \Psi_{rx} + \omega_k \Psi_{ry} - \omega_r z_p \Psi_{ry} \\ \frac{d\Psi_{ry}}{dt} = R_r K_r I_{sy} - A_r \Psi_{ry} - \omega_k \Psi_{rx} + \omega_r z_p \Psi_{rx} \\ M = \frac{3}{2} z_p K_r (\Psi_{rx} I_{sy} - \Psi_{ry} I_{sx}) \\ \frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J} (M - M_c) \end{array} \right. \quad (13)$$

Переход к эквивалентной двухфазной имитационной модели с векторными переменными состояния значительно упрощает математическое описание АД и позволяет получить имитационную модель в более компактном виде. В дальнейшем система уравнений (13) будет выступать в качестве основы для создания имитационных моделей АД с различными вариантами организации систем координат.

3.2. Стационарная система координат

При исследовании систем асинхронного ЭП модель АД в стационарной системе координат позволяет получить математическое описание, наиболее близко имитирующее процессы, происходящие в реальном двигателе. Отсутствие координатных преобразователей и определённая простота организации данного варианта имитационной модели АД позволяют рассмотреть его в качестве основы для проведения исследований асинхронного ЭП.

Система уравнений, описывающих работу асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором в неподвижной системе координат, полученная на основе системы уравнений (13) с учётом особенностей относительной системы единиц и $\omega_k = 0$, имеет следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{di_{sa}}{dt} = \frac{1}{l_e} (u_{sa} - r_e i_{sa} + k_r a_r \psi_{ra} + k_r \omega_r \psi_{r\beta}) \\ \frac{di_{s\beta}}{dt} = \frac{1}{l_e} (u_{s\beta} - r_e i_{s\beta} + k_r a_r \psi_{r\beta} - k_r \omega_r \psi_{ra}) \\ \frac{d\psi_{ra}}{dt} = r_r k_r i_{sa} - a_r \psi_{ra} - \omega_r \psi_{r\beta} \\ \frac{d\psi_{r\beta}}{dt} = r_r k_r i_{s\beta} - a_r \psi_{r\beta} + \omega_r \psi_{ra} \\ m = k_m (\psi_{ra} i_{s\beta} - \psi_{r\beta} i_{sa}) \\ \frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J} (m - m_c) \end{array} \right. \quad (14)$$

В системе уравнений (14) переменные с индексами «α» и «β» соответствуют компонентам пространственного вектора в неподвижной координатной системе. Представим систему уравнений (14) в виде структурной схемы. На рисунке 13 представлена структурная схема, созданная на базе системы уравнений (14) для имитационной модели АД в стационарной системе координат.

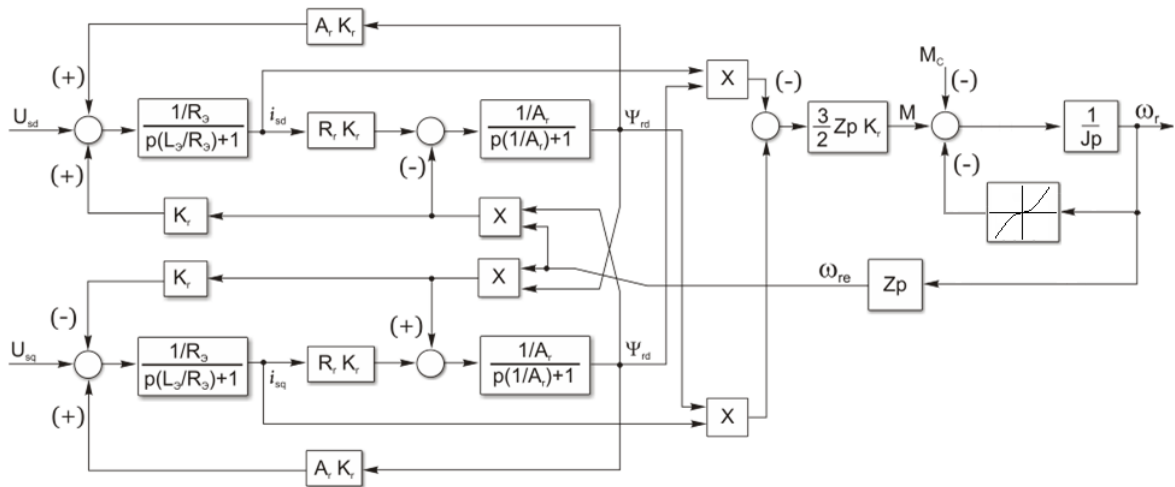


Рисунок 13 – Структурная схема АД в стационарной системе координат

Для построения имитационной модели в программной среде Simulink-Matlab рассчитаем недостающие величины и коэффициенты.

Амплитудное значение номинального фазового напряжения

$$U_{амп} = \sqrt{2} \cdot U_{1\Phi H} = \sqrt{2} \cdot 220 = 311,127 \text{ В.}$$

Амплитудное значение номинального фазного тока

$$I_{амп} = \sqrt{2} \cdot I_{1\Phi H} = \sqrt{2} \cdot 286,55 = 405,24 \text{ А.}$$

Определим безразмерные коэффициенты

$$L_e = L_1 - \frac{L_\mu^2}{L_2} = 0,01127 - \frac{0,011^2}{0,01137} = 0,00063.$$

$$K_r = \frac{L_\mu}{L_2} = \frac{0,011}{0,01137} = 0,967.$$

$$R_e = R_1 + K_r^2 \cdot R_2' = 0,017 + 0,967^2 \cdot 0,017 = 0,033.$$

$$A_r = \frac{L_2}{R_2'} = \frac{0,01137}{0,017} = 0,669.$$

$$T_e = \frac{L_e}{R_e} = \frac{0,00063}{0,033} = 0,019.$$

Постоянная времени инвертора

$$T_{\text{инв}} = \frac{1}{f_{\text{нес}}} = \frac{1}{5000} = 0,0002 \text{ с.}$$

Для исследования и проверки адекватности созданной модели АД выполним её реализацию в программной среде Simulink-Matlab. В приложении А на рисунке А.1 представлен внешний вид имитационной модели в среде Simulink-Matlab для расчёта переходных процессов АД при прямом пуске.

Исследования проводились при прямом пуске АД. Результаты расчёта переходных процессов применительно к асинхронной машине АИР355S6 мощностью 160 кВт, представлены на рисунке 14.

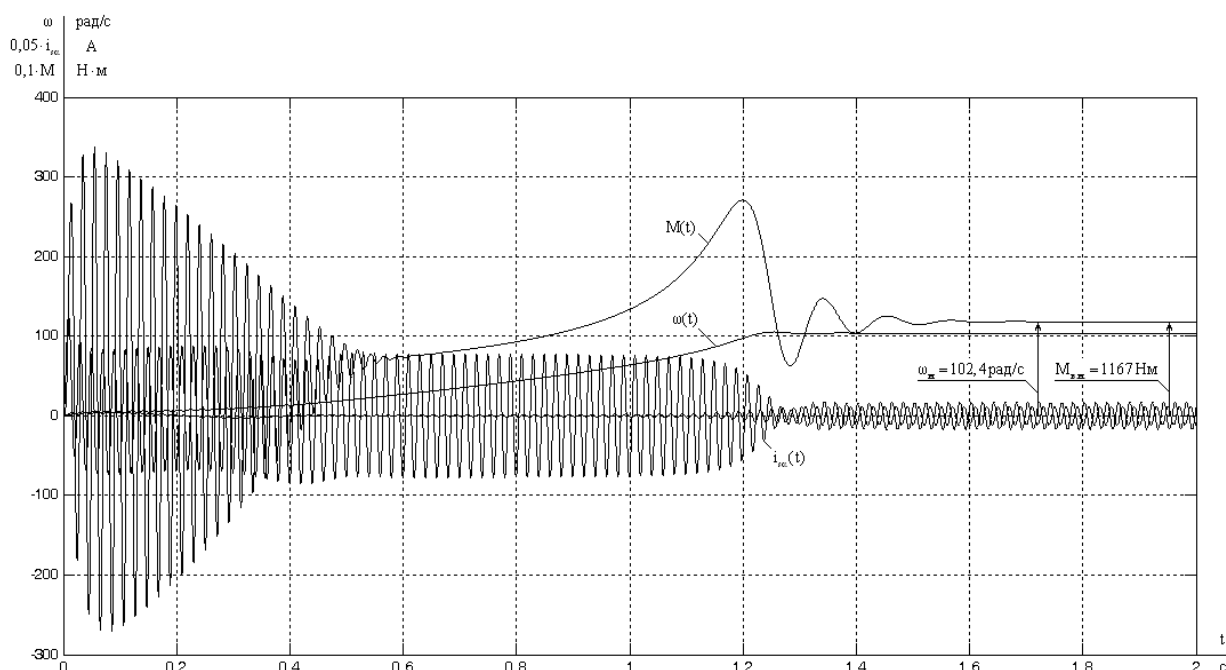


Рисунок 14 – Графики переходных процессов пуска АД в неуправляемом режиме при расчёте на имитационной модели АД в стационарной системе координат

По итогам расчёта переходных процессов можно сделать вывод о правильности проведённой разработки и об адекватности режимов работы созданной имитационной модели реальному АД.

3.3. Система координат с принудительной ориентацией по вектору потокосцепления ротора

При решении задач разработки систем управления для АД необходимо рассматривать его имитационную модель с позиций объекта оптимального управления. В теории систем управления асинхронными электроприводами при моделировании АД нашел место уникальный принцип ориентации системы координат по вектору потокосцепления ротора. В данном случае имитационная модель АД приобретает определенное сходство со структурной схемой машины постоянного тока, где возможно раздельное управление магнитным состоянием и моментом на валу двигателя.

Математически условие ориентации применительно к системе уравнений (13) выражается следующим образом

$$\psi_{ry}=0; \quad \frac{d\psi_{ry}}{dt}=0; \quad \psi_{rx}=\psi_r. \quad (15)$$

Уравнения, описывающие АД в системе координат с принудительной ориентацией получаем из (13) с учётом особенностей относительной системы единиц и специального условия ориентации координатной системы (15).

$$\begin{cases} \frac{di_{sx}}{dt} = \frac{1}{l_e} (u_{sx} - r_e i_{sx} + k_r a_r \psi_r + l_e \omega_k i_{sy}) \\ \frac{di_{sy}}{dt} = \frac{1}{l_e} (u_{sy} - r_e i_{sy} - k_r \omega_r \psi_r - l_e \omega_k i_{sx}) \\ \frac{d\psi_r}{dt} = r_r k_r i_{sx} - a_r \psi_r \\ 0 = r_r k_r i_{sy} - \beta_k \psi_r \\ m = k_m \psi_r i_{sy} \\ \frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J} (m - m_{нагр}) \end{cases} \quad (16)$$

В системе (16) β_k представляет собой скольжение системы координат, а ω_k соответственно скорость её вращения. Данные параметры определяются в соответствии со следующими выражениями:

$$\beta_k = \frac{r_r k_r i_{sy}}{\psi_r}; \quad \omega_k = \omega_r + \beta_k. \quad (17)$$

В системе уравнений (16) переменные с индексами «х» и «у» соответствуют компонентам пространственного вектора в координатной системе с ориентацией по вектору потокосцеплений ротора ψ_r . С помощью правил создания и преобразования структурных схем, принятых в теории автоматического управления [19], представим систему уравнений (16) в виде структурной схемы. На рисунке 15 представлена структурная схема, имитационной модели АД в системе координат с ориентацией по вектору потокосцепления ротора ψ_r .

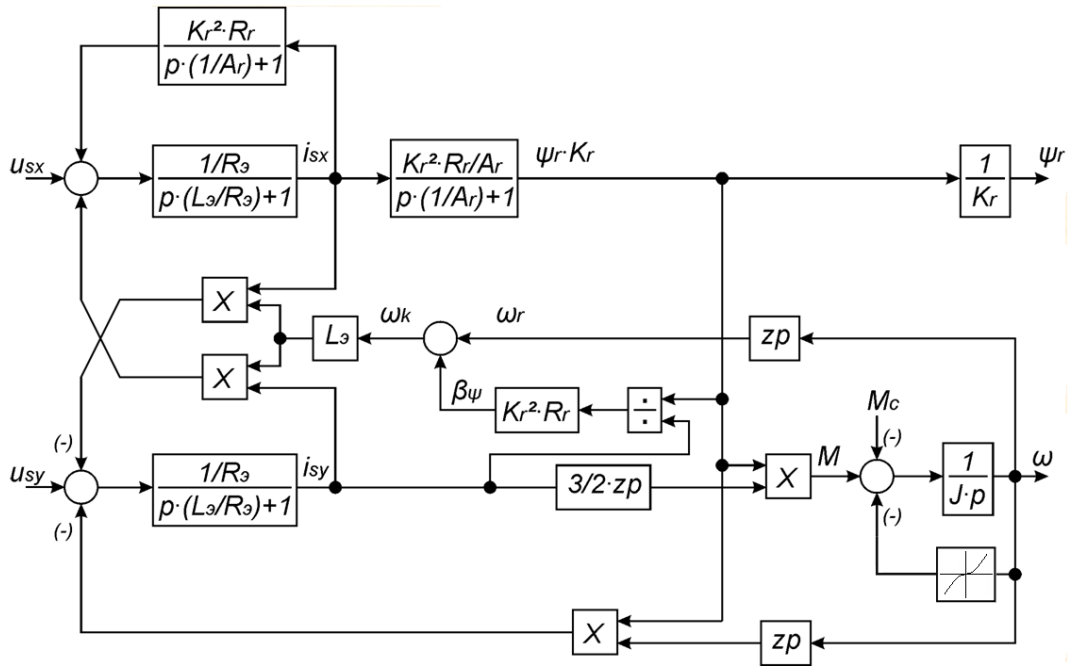


Рисунок 15 – Структурная схема имитационной модели АД в системе координат с ориентацией по вектору потокоцепления ротора ψ_r

В данной системе симметричные трёхфазные напряжения, представленные в относительных единицах подвергаются преобразованию Кларка и поступают в виде компонентов пространственного вектора напряжений $u_{s\alpha}$ и $u_{s\beta}$ на входы координатного преобразователя Парка-Горева [15]. Формулы для координатного преобразования Парка-Горева, позволяющего реализовать переход от стационарной системы координат к вращающейся представлены ниже:

$$\begin{aligned} u_{sx} &= u_{s\alpha} \cos \theta_k + u_{s\beta} \sin \theta_k, \\ u_{sy} &= -u_{s\alpha} \sin \theta_k + u_{s\beta} \cos \theta_k. \end{aligned} \quad (18)$$

Здесь $u_{s\alpha}$, $u_{s\beta}$ - составляющие пространственного вектора напряжения статора u_s , представленные в стационарной системе координат;

u_{sx} , u_{sy} - составляющие вектора напряжения статора u_s , представленные во вращающейся системе координат;

θ_k - угол поворота вращающейся координатной системы (угол ориентации).

Параметр θ_k связан с угловой скоростью вращения координатной системы ω_k благодаря следующему выражению

$$\frac{d\theta_k}{dt} = \omega_k. \quad (19)$$

Графически преобразование Парка-Горева иллюстрируется на рисунке 16.

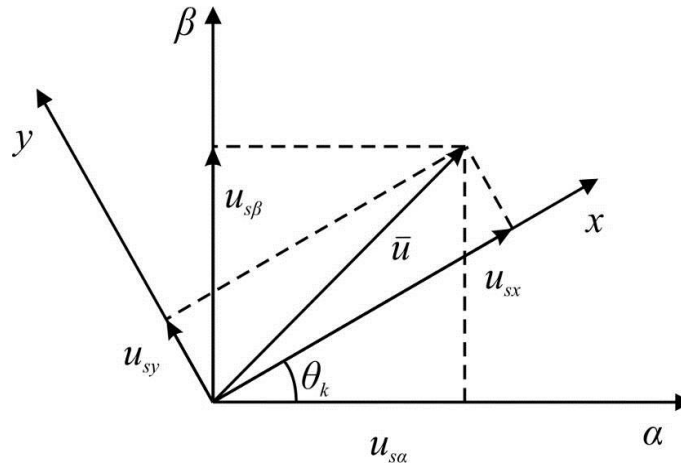


Рисунок 16 – График преобразований Парка-Горева для связи между вращающейся и стационарной системой координат

Координатный преобразователь Парка-Горева сориентирован совместно с системой координат разработанной имитационной модели АД. Благодаря этому на входы модели по напряжению u_{sx} и u_{sy} поступают компоненты пространственного вектора напряжения, представленного во вращающейся системе координат.

Исследования проводились в условиях неуправляемого режима работы при «прямом» пуске АД. Для возможности адекватного восприятия информации о работе АД и сравнения с предыдущими результатами компоненты пространственного вектора тока в стационарной системе координат восстанавливались с помощью обратного преобразования Парка-Горева [23]. Обратное преобразование Парка-Горева используется для организации перехода из вращающейся системы координат в стационарную. Математическое выражение для обратного преобразования можно получить из (18).

$$\begin{aligned} i_{sa} &= i_{sx} \cos \theta_k - i_{sy} \sin \theta_k, \\ i_{s\beta} &= i_{sx} \sin \theta_k + i_{sy} \cos \theta_k. \end{aligned} \quad (20)$$

В выражении (18) также как и в (20) переменные с индексами «х» и «у» относятся к вращающейся системе координат, а с индексами « α » и « β » к стационарной. Параметр θ_k , как и ранее, определяет ориентацию вращающейся системы координат.

Обратный преобразователь Парка-Горева ориентирован синхронно с системой координат модели, что позволяет наблюдать за переменными АД в стационарной системе координат.

Имитационная модель короткозамкнутого асинхронного двигателя во вращающейся системе координат в программной среде MATLAB Simulink приведена в приложении А на рисунке А.2.

Результаты расчёта переходных процессов применительно к асинхронной машине АИР355S6 мощностью 160 кВт, представлены на рисунке 17.

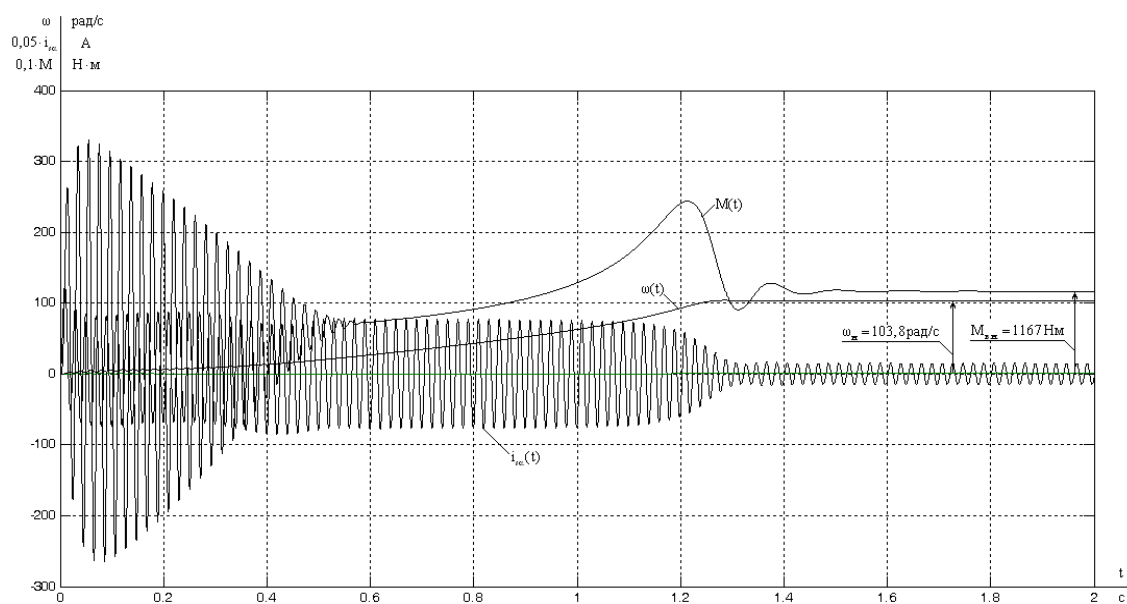


Рисунок 17 – График расчёта переходных процессов имитационной модели АД в системе координат с ориентацией по вектору потокоцепления ротора

$$\psi_r$$

По итогам эксперимента с расчётом переходных процессов можно сделать вывод о том, что кривые переходных процессов по своей форме полностью повторяют полученные ранее результаты расчёта переходных процессов имитационной модели в стационарной системе координат, что в

свою очередь, свидетельствует о правильной организации работы имитационной модели во вращающейся координатной системе и о её адекватности реальному АД.

3.4. Инвертор напряжения

В асинхронном ЭП переменного тока в качестве силовых преобразователей электроэнергии широкое распространение получили двухзвенные ПЧ с неуправляемым выпрямителем и транзисторным автономным инвертором напряжения.

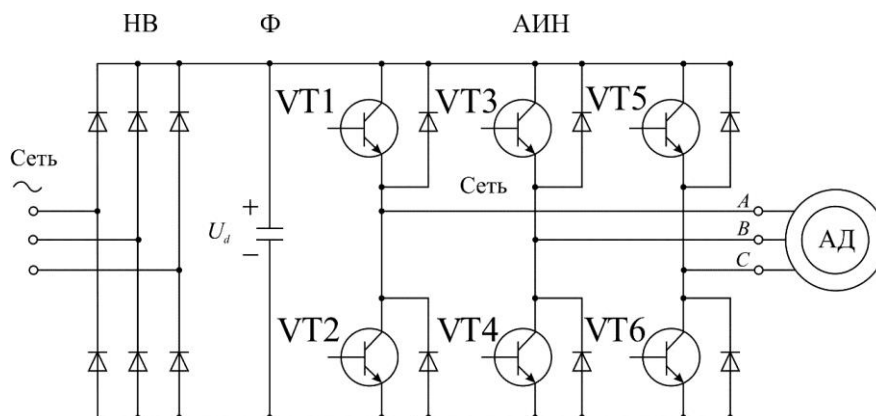


Рисунок 18 – Двухзвенный ПЧ с неуправляемым выпрямителем и транзисторным автономным инвертором напряжения

Напряжение питающей сети выпрямляется неуправляемым выпрямителем НВ, пульсации сглаживаются фильтром Ф и далее преобразуется в переменное напряжение требуемой частоты и амплитуды. В системах частотного управления электродвигателями переменного тока широкое распространение получили автономные инверторы напряжения. Они способны работать как при наличии, так и при отсутствии в цепи нагрузки источников, способных развивать ЭДС и генерировать активную энергию.

Автономный инвертор напряжения представляет собой коммутатор на основе полностью управляемых переключающих элементов – силовых ключей, в качестве которых используют полностью управляемые полупроводниковые приборы в виде силовых транзисторов или запираемых тиристоров [1].

Инверторы напряжения совместимы с нагрузкой активно-индуктивного характера и благодаря специальному алгоритму формирования управляющих импульсов обеспечивают требуемую величину и форму выходного напряжения. Для управления ключами автономного инвертора используются различные законы ШИМ: синусоидальный, векторный и т.д. [2]. Законы широтно-импульсной модуляции предполагают, как правило, микропроцессорную реализацию управляющего устройства для воспроизведения импульсов, необходимых для управления силовыми ключами.

При проведении анализа с позиций организации оптимального управления асинхронным ЭП, автономный инвертор напряжения при определённых допущениях можно рассмотреть как дискретно-управляемый объект с периодичностью обновления, равной частоте ШИМ. Справедливость данного допущения подтверждается временной разницей в скорости процессов, протекающих в инверторе напряжения и электромагнитных контурах машины. Как правило, постоянные времени указанных объектов отличаются друг от друга более чем на порядок.

Величина запаздывания является переменной и в зависимости от формируемого на выходе инвертора напряжения изменяется в следующих пределах

$$\tau = 0 \dots T_{\text{шим}}, \quad (21)$$

где $T_{\text{шим}}$ – период несущей частоты ШИМ.

При математическом описании обычно принимают среднестатистическое запаздывание

$$\tau_{\text{ср}} = 0.5 \cdot T_{\text{шим}} \quad (22)$$

и с точки зрения классификации динамических звеньев, принятой в теории автоматического управления, передаточную функцию для автономного инвертора напряжения при упрощенном рассмотрении можно представить в виде звена с запаздыванием [43]:

$$W_{инв}(p) = k_{инв} e^{-p\tau_{cp}}. \quad (23)$$

где $k_{инв}$ – коэффициент передачи инвертора напряжения, принимаем $k_{инв} = 1$;
 τ_{cp} – длительность запаздывания, определяемая через период $T_{шшм}$ или несущую частоту ШИМ $f_{шшм}$

$$\tau_{cp} = 0.5 \cdot T_{шшм} = \frac{0.5}{f_{шшм}}. \quad (24)$$

Однако в рамках структур подчинённого регулирования развиты методы оптимальной настройки линеаризованных систем на базе типовых инерционных звеньев с постоянными времени [2]. Данное условие требует аппроксимации передаточной функции (23) путём представления в виде эквивалентной передаточной функции на базе последовательного соединения n инерционных звеньев первого порядка с одинаковыми постоянными времени. Согласно методике, предложенной в [11] получаем следующее:

$$W_{инв}(p) = k_{инв} e^{-p\tau_{cp}} \approx \frac{k_{инв}}{\left(\frac{\tau_{cp}}{n} p + 1\right)^n}. \quad (25)$$

Для решения задачи аппроксимации передаточной функции инвертора напряжения со звеном запаздывания ограничимся условием $n = 2$, тогда итоговое выражение принимает вид

$$W_{инв}(p) = k_{инв} e^{-p\tau_{cp}} \approx \frac{k_{инв}}{\left(\frac{\tau_{cp}}{2} p + 1\right)^2} = \frac{k_{инв}}{(T_{инв} p + 1)^2}, \quad (26)$$

где $T_{инв} = \frac{\tau_{cp}}{2}$ – постоянная времени инвертора.

При разработке имитационной модели автономного инвертора и последующем анализе всей системы будем использовать ряд следующих допущений:

- выходное напряжение имеет синусоидальную форму;
- пренебрегаем взаимным влиянием по силовому каналу между инвертором напряжения и АД;

- инвертор напряжения представлен апериодическим звеном второго порядка с постоянной времени $T_{инв}$, учитывающей его инерционность.

В схеме на рисунка 18 управляющие импульсы в рамках каждого интервала ШИМ поступают к смежным ключам (VT1-VT2, VT3-VT4, VT5-VT6), т.е. управление осуществляется пофазно. При работе с имитационной моделью АД, представленной в соответствии с методом пространственного вектора, возникает необходимость использования передаточной функции инвертора напряжения (26), представленной отдельно для каждой из фаз. Для доказательства правомерности данного решения обратимся к рисунку 19, где представлена структурная схема упрощенной имитационной модели трёхфазного инвертора напряжения.

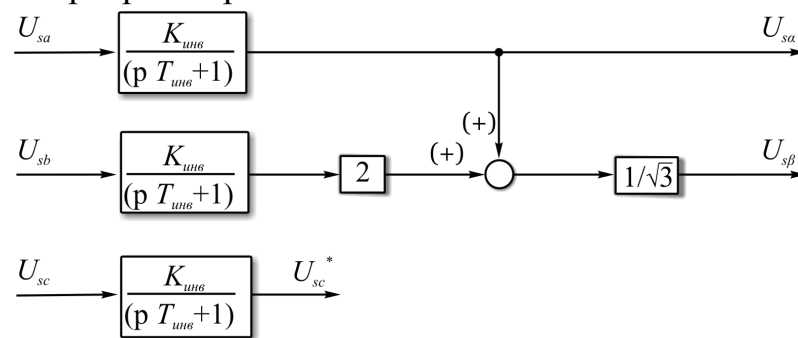


Рисунок 19 – Упрощенная имитационная модель трёхфазного инвертора напряжения

Если теперь воспользоваться правилом преобразования структурных схем и перенести передаточные функции инвертора в сторону компонентов вектора напряжения $u_{s\alpha}$ и $u_{s\beta}$, получаем эквивалентную имитационную модель инвертора применительно к компонентам пространственного вектора напряжения, рисунок 20.

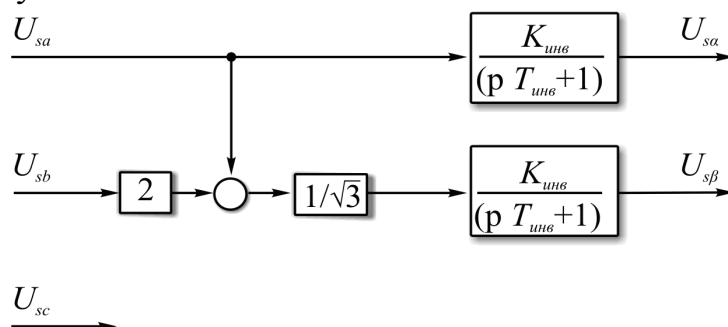


Рисунок 20 – Упрощенная имитационная модель инвертора напряжения применительно к компонентам пространственного вектора

Разработанная таким образом упрощенная имитационная модель автономного инвертора напряжения может использоваться при создании

имитационной модели асинхронного ЭП, при синтезе систем управления и при проведении исследований.

4. РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АСИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ВЕНТИЛЯТОРА

4.1. Синтез структуры и параметров системы векторного управления асинхронным электроприводом

Системы векторного управления представляют собой класс систем автоматического управления ЭП переменного тока во вращающихся и определённым образом сориентированных системах координат с подчинённым регулированием переменных [20]. Способ ориентации системы координат по вектору потокосцепления ротора управляемого АД делает схожим организацию системы векторного управления на структуру управления классическим ЭП постоянного тока с независимым возбуждением.

На фоне развития и применения для ЭП переменного тока новых принципов управления принцип подчинённого регулирования координат в настоящее время не теряет своей актуальности и позволяет получать высококачественные системы управления ЭП с нормированными показателями качества и требуемым быстродействием.

На рисунке 21 представлена функциональная схема системы векторного управления ЭП вентилятора главного проветривания. Система базируется на имитационной модели АД во вращающихся координатах, сориентированных по вектору потокосцепления ротора и представляет собой классическую структуру векторного управления с разомкнутым контуром скорости.

На рисунке 21 приняты следующие обозначения:

ППГ – преобразователь Парка-Горева,

ОППГ – обратный преобразователь Парка-Горева,

3/2 – модуль преобразований из трёхфазной системы статорных токов в составляющие пространственного вектора,

ИДС – импульсный датчик скорости,

$W_{\text{рег}}^{\Psi_r}(p)$, $W_{\text{рег}}^{i_{sx}}(p)$, $W_{\text{рег}}^{i_{sy}}(p)$, $W_{\text{рег}}^{\omega_r}(p)$ – управляющие регуляторы.

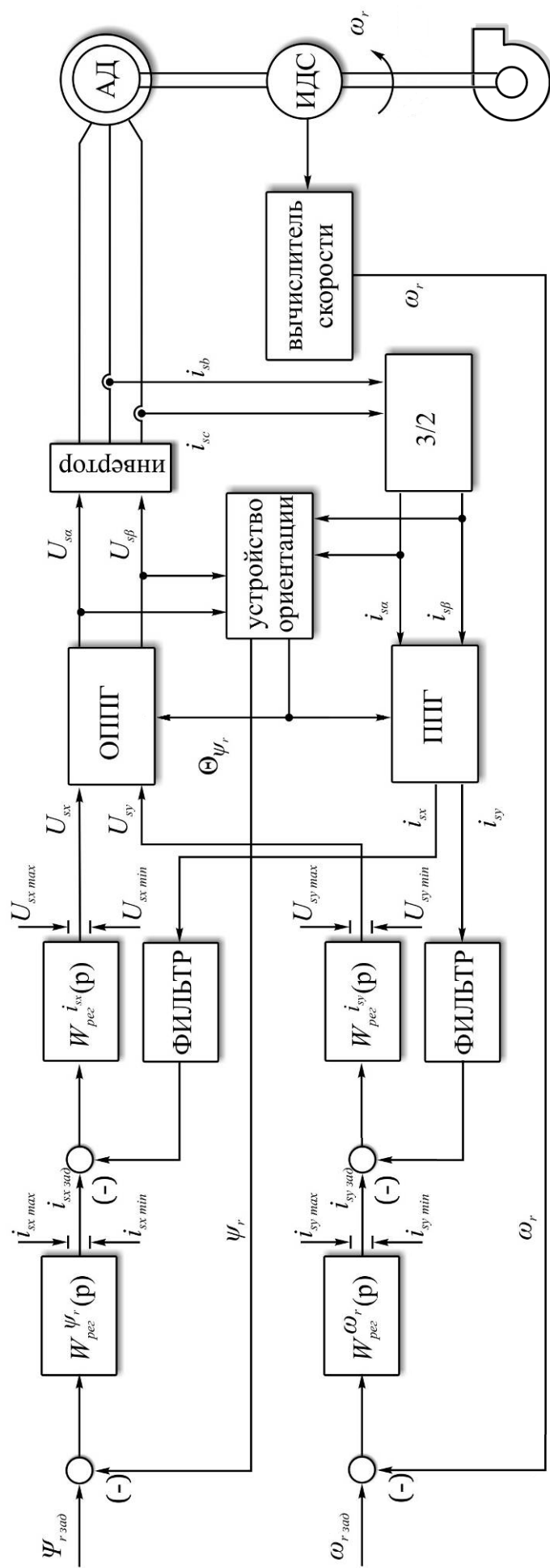


Рисунок 21 – Функциональная схема системы векторного управления асинхронным ЭП вентилятора

4.2. Оптимизация контуров управления составляющими вектора тока статора

Оптимизацию контура тока осуществляем без учёта перекрёстных связей двигателя. Правомерность пренебрежения перекрёстными обратными связями основывается на временной разнице процессов, протекающих в цепях обратной связи и оптимизируемом контуре управления.

Для нахождения требуемой передаточной функции регулятора $W_{рег}^{i_{sx}}(p)$ выделим из всей системы ЭП отдельно взятый контур, рисунок 22 и сопоставим передаточную функцию объекта управления с желаемой.

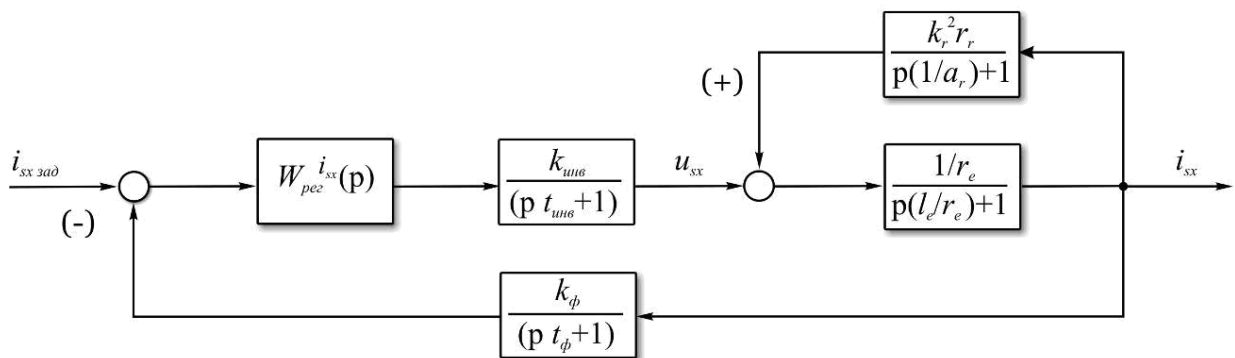


Рисунок 22 – Контур управления составляющей пространственного вектора тока статора i_{sx}

В канале обратной связи составляющей пространственного векторы тока статора i_{sx} находится фильтрующее апериодическое звено, снижающее уровень помех возникающих вследствие работы инвертора в режиме ШИМ. Кроме того, данное звено учитывает влияние суммарной инерционности координатных преобразователей и датчиков тока. Перед выполнением оптимизации контура необходимо определить постоянную времени фильтрующего элемента.

Для определения необходимой постоянной времени фильтрующего элемента удобно воспользоваться методом получения желаемых логарифмических характеристик. Фильтр в канале обратной связи должен ослаблять уровень высокочастотной составляющей инвертора напряжения, определяемой несущей частотой ШИМ. Однако увеличение постоянной

времени фильтра сверх нормы влечёт за собой снижение быстродействия системы. Анализируя указанное выше, принимаем для высокочастотной составляющей коэффициент ослабления на уровне двух, т.е. постоянная времени фильтра должна обеспечивать двукратное снижение сигнала на частоте широтно-импульсной модуляции. При анализе логарифмических частотных характеристик данное условие можно выразить следующим образом:

$$\lg(f_{\phi}) \gg \lg(f_{\text{шим}}) - \Delta L / 20, \quad (27)$$

где f_{ϕ} – частота соответствующая полосе пропускания фильтра, $f_{\text{шим}}$ – частота ШИМ инвертора, $\Delta L = 20 \cdot \lg\left(\frac{A_2}{A_1}\right) = 20 \cdot \lg(0.5)$ – требуемое ослабление сигнала.

В качестве базовой частоты ШИМ принимаем работу инвертора на частоте $f_{\text{шим}} = 5$ (кГц) как наиболее оптимальное соотношение между величиной коммутационных потерь и точностью воспроизведения заданной формы напряжения на выходе.

Из формулы (27) получаем выражение для постоянной времени фильтра:

$$t_{\phi} = \frac{1}{10^{(\lg(f_{\text{шим}}) - \Delta L / 20)}} = \frac{1}{10^{(\lg(5000 / 2 \times 3.14) - \lg(0.5))}} = \frac{1}{10^{2.6}} = 0.0004 \text{ с},$$

Теперь согласно методике настройки на модульный оптимум [12] получаем выражение для передаточной функции регулятора:

$$W_{\text{рег}}^{\text{isx}}(p) = W_{\text{раз}}^{\text{MO}}(p) \cdot \frac{1}{\frac{k_{\text{инв}}}{(pt_{\text{инв}} + 1)} \cdot \frac{1/r_{\text{э}}}{\left(p \frac{l_{\text{э}}}{r_{\text{э}}} + 1\right)} \cdot \frac{k_{\phi}}{(pt_{\phi} + 1)}},$$

где $W_{\text{раз}}^{\text{MO}}(p) = \frac{1}{p 2t_{\mu}(pt_{\mu} + 1)}$ – передаточная функция эталонного разомкнутого контура, оптимизированного на модульный оптимум, а t_{μ} – малая

некомпенсируемая постоянная времени, определяющая быстродействие контура после оптимизации.

Получаем следующее выражение для передаточной функции регулятора:

$$W_{\text{рег}}^{\text{isx}}(p) = W_{\text{раз}}^{\text{MO}}(p) \cdot \frac{(pt_{\text{инв}} + 1) \left(p \frac{l_3}{r_3} + 1 \right) (pt_{\phi} + 1)}{k_{\text{инв}} \frac{1}{r_3} k_{\phi}}$$

Стремясь упростить задачу синтеза понизим порядок передаточной функции объекта управления, для чего группируем вместе постоянные времени $t_{\text{инв}}$ и t_{ϕ} :

$$(pt_{\text{инв}} + 1) \cdot (pt_{\phi} + 1) = (p^2 t_{\text{инв}} t_{\phi} + p[t_{\text{инв}} + t_{\phi}] + 1) \gg (p[t_{\text{инв}} + t_{\phi}] + 1).$$

В итоге для передаточной функции регулятора получаем следующее выражение:

$$W_{\text{рег}}^{\text{isx}}(p) = W_{\text{раз}}^{\text{MO}}(p) \cdot \frac{(p[t_{\text{инв}} + t_{\phi}] + 1) \cdot \left(p \frac{l_3}{r_3} + 1 \right)}{k_{\text{инв}} k_{\phi} \frac{1}{r_3}}.$$

Для величины малой некомпенсируемой постоянной времени принимаем значение $t_{\mu} = t_{\text{инв}} + t_{\phi}$, и тогда итоговое выражение для передаточной функции регулятора получаем в следующем виде:

$$\begin{aligned} W_{\text{рег}}^{\text{isx}}(p) &= \frac{1}{2pt_{\mu}(pt_{\mu} + 1)} \cdot \frac{(p[t_{\text{инв}} + t_{\phi}] + 1) \cdot \left(p \frac{l_3}{r_3} + 1 \right)}{k_{\text{инв}} k_{\phi} \frac{1}{r_3}} = \\ &= \frac{1}{2p[t_{\text{инв}} + t_{\phi}] \cdot (p[t_{\text{инв}} + t_{\phi}] + 1)} \cdot \frac{(p[t_{\text{инв}} + t_{\phi}] + 1) \cdot \left(p \frac{l_3}{r_3} + 1 \right)}{k_{\text{инв}} k_{\phi} \frac{1}{r_3}} = \\ &= \frac{\left(p \frac{l_3}{r_3} + 1 \right)}{2p[t_{\text{инв}} + t_{\phi}] k_{\text{инв}} k_{\phi} \frac{1}{r_3}} = \frac{\frac{l_3}{r_3}}{2[t_{\text{инв}} + t_{\phi}] k_{\text{инв}} k_{\phi} \frac{1}{r_3}} \cdot \frac{\left(p \frac{l_3}{r_3} + 1 \right)}{p \frac{l_3}{r_3}} \end{aligned}$$

В итоге синтезирован пропорционально-интегральный регулятор со следующими параметрами:

$$k_{\text{рег}}^{i_{\text{sx}}} = \frac{l_3 / r_3}{2[t_{\text{инв}} + t_{\phi}] k_{\text{инв}} k_{\phi} 1 / r_3} =$$

$$= \frac{0,00063 / 0,033}{2 \cdot [0,0002 + 0,0004] \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 / 0,033} = 0,525$$

– коэффициент усиления,

$$t_{\text{рег}}^{i_{\text{sx}}} = l_3 / r_3 = 0,00063 / 0,033 = 0,0191$$

– постоянная времени интегрирования.

В таблице 5 представлены ожидаемые показатели качества оптимизированного контура, определённые в соответствии с методикой, предложенной в работе [12].

Таблица 5 – Ожидаемые показатели качества контура управления составляющей пространственного вектора тока статора i_{sx}

Название показателя	Расчётная формула	Значение
Эквивалентная малая постоянная времени оптимизированного контура, t_{μ} , с	$t_{\mu} = 2t_{\text{инв}} + t_{\phi}$	0.0008
Полоса пропускания по модулю, $\omega_{\text{п}}^{(м)}$, рад/с	$\omega_{\text{п}}^{(м)} = \frac{0.71}{t_{\mu}}$	887,5
Полоса пропускания по фазе, $\omega_{\text{п}}^{(\phi)}$, рад/с	$\omega_{\text{п}}^{(\phi)} = \frac{0.71}{t_{\mu}}$	887,5
Перерегулирование, σ , %	—	4,32
Время первого согласования, $t_{\text{py1}}^{(5)}$, с	$t_{\text{py1}}^{(5)} = 4.1 \cdot t_{\mu}$	0,0033
Время переходного процесса, $t_{\text{py2}}^{(5)}$, с	$t_{\text{py2}}^{(5)} = 4.1 \cdot t_{\mu}$	0,0033

Для проверки соответствия показателей качества оптимизированного контура ожидаемым значениям, проведём расчёт переходных процессов и частотных характеристик. Переходные процессы и частотные характеристики рассчитаем, используя программную среду Simulink-Matlab. Результаты в виде графиков представлены на рисунке 23 и рисунке 24. В приложении А на рисунке А.3 представлен внешний вид имитационной модели в среде Simulink-Matlab для расчёта частотных характеристик и переходных процессов в оптимизированном контуре управления составляющей пространственного вектора тока i_{sx} при подаче на вход ступенчатого сигнала.

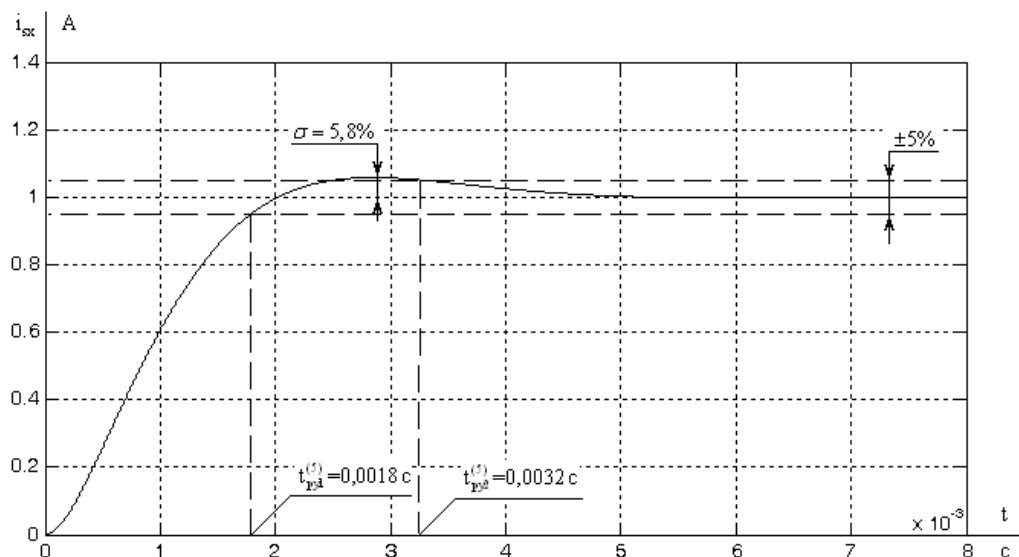


Рисунок 23 – График расчёта переходных процессов в оптимизированном контуре управления составляющей пространственного вектора тока i_{sx}

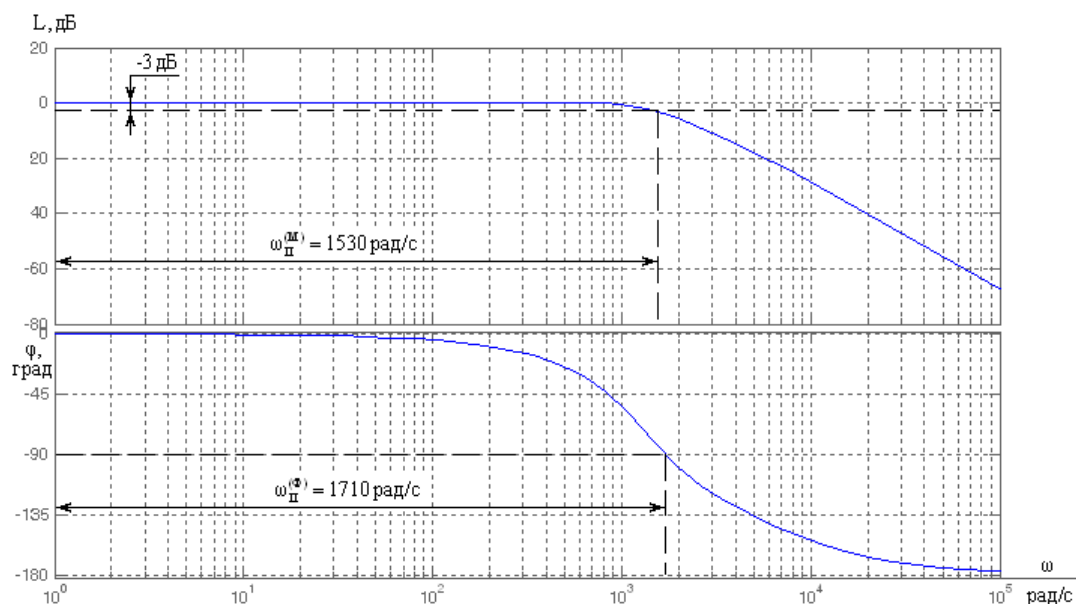


Рисунок 24 – График логарифмических амплитудно-частотных характеристик оптимизированного контура управления составляющей пространственного вектора тока i_{sx}

Сравнительные результаты показателей качества представлены в таблице 6. Как видно из полученных графиков, показатели качества переходных процессов оптимизированного контура несколько отличаются от ожидаемых. По величине перерегулирования расхождение составляет

$$\Delta_{\sigma} = |\sigma - \sigma_{ож}| = |5,8 - 4,32| = 1,48\%,$$

а значение времени первого согласования отличается на величину

$$\Delta_t = |t_{py1}^{(5)} - t_{py1.ож}^{(5)}| = |0,0033 - 0,0018| = 0,0015 \text{ с},$$

Полоса пропускания по модулю отличается от ожидаемого значения на величину

$$\Delta_{\omega_{\Pi}^{(M)}} = |\omega_{\Pi}^{(M)} - \omega_{\Pi.ож}^{(M)}| = |1530 - 592| = 938 \text{ рад/с},$$

а полоса пропускания по фазе – на величину

$$\Delta_{\omega_{\Pi}^{(\phi)}} = |\omega_{\Pi}^{(\phi)} - \omega_{\Pi.ож}^{(\phi)}| = |1710 - 592| = 1118 \text{ рад/с}.$$

Таблица 6 – Результаты сравнения показателей качества при оптимизации контура управления составляющей пространственного вектора тока статора i_{sx}

Перерегулирование, σ , %	Время первого согласования, $t_{py1}^{(5)}$, с	Время переходного процесса, $t_{py2}^{(5)}$, с	Полоса пропускания по модулю, $\omega_n^{(м)}$, рад/с	Полоса пропускания по фазе, $\omega_n^{(ф)}$, рад/с
Ожидаемые показатели качества				
4.32	0,0033	0,0033	592	592
Показатели качества оптимизированного контура				
5,8	0,0018	0,0032	1530	1710

По результатам синтеза получена система, обладающая нулевым значением установившейся ошибки и астатизмом первого порядка по управлению и возмущению. Анализ отклонений между ожидаемыми показателями и показателями качества оптимизированного контура показывает, что расхождения вызванные допущениями при оптимизации незначительны и могут быть приняты при проведении оптимальной настройки контура управления составляющей пространственного вектора тока статора i_{sx} , так как обеспечивают получение удовлетворительных рабочих характеристик.

Рассматривая контур управления второй составляющей пространственного вектора тока статора i_{sy} , также используем метод настройки на оптимум по модулю [12]. Для нахождения требуемой передаточной функции регулятора $W_{рег}^{i_{sy}}(p)$ выделим из всей системы ЭП отдельно взятый контур, рисунок 25. Структурная схема данного контура практически полностью аналогична рассмотренному ранее контуру управления составляющей i_{sx} и, следовательно, все предположения относительно проведения оптимизации для контура управления составляющей i_{sx} также справедливы и для данного случая.

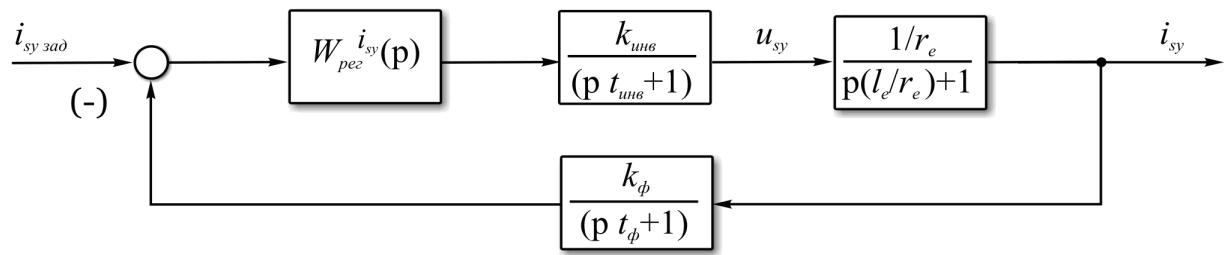


Рисунок 25 – Контур управления составляющей пространственного вектора тока статора i_{sy}

Таким образом, для контура управления составляющей пространственного вектора тока статора i_{sy} принимаем результаты оптимизации, полученные ранее при рассмотрении контура i_{sx} :

$$W_{\text{рег}}^{i_{sy}}(p) = W_{\text{рег}}^{i_{sx}}(p) = W_{\text{раз}}^{\text{МО}}(p) \cdot \frac{(p[t_{\text{инв}} + t_{\phi}] + 1) \cdot (p \frac{l_{\sigma}}{r_{\sigma}} + 1)}{k_{\text{инв}} k_{\phi} \frac{1}{r_{\sigma}}}.$$

В итоге получаем пропорционально-интегральный регулятор со следующими параметрами:

$$\begin{aligned} k_{\text{рег}}^{i_{sy}} = k_{\text{рег}}^{i_{sx}} &= \frac{\frac{l_{\sigma}}{r_{\sigma}}}{2[t_{\text{инв}} + t_{\phi}] k_{\text{инв}} k_{\phi} \frac{1}{r_{\sigma}}} = \\ &= \frac{0,00063}{2 \cdot [0,0002 + 0,0004] \cdot 1 \cdot 1 \cdot \frac{1}{0,033}} = 0,525. \end{aligned}$$

– коэффициент усиления,

$$t_{\text{рег}}^{i_{sy}} = t_{\text{рег}}^{i_{sx}} = \frac{l_{\sigma}}{r_{\sigma}} = \frac{0,00063}{0,033} = 0,0191.$$

– постоянная времени интегрирования.

Ожидаемые показатели качества оптимизированного контура в данном случае будут полностью совпадать с показателями качества контура управления составляющей i_{sx} , таблица 5.

Для проверки соответствия показателей качества оптимизированного контура и ожидаемых значений, проведём расчёт переходных процессов и

частотных характеристик. Переходные процессы и частотные характеристики рассчитаем, используя программную среду Simulink-Matlab. Результаты в виде графиков представлены на рисунке 26 и рисунке 27. В приложении А на рисунке А.4 представлен внешний вид имитационной модели в среде Simulink-Matlab для расчёта частотных характеристик и переходных процессов в оптимизированном контуре управления составляющей пространственного вектора тока i_{sy} при подаче на вход ступенчатого управляющего сигнала.

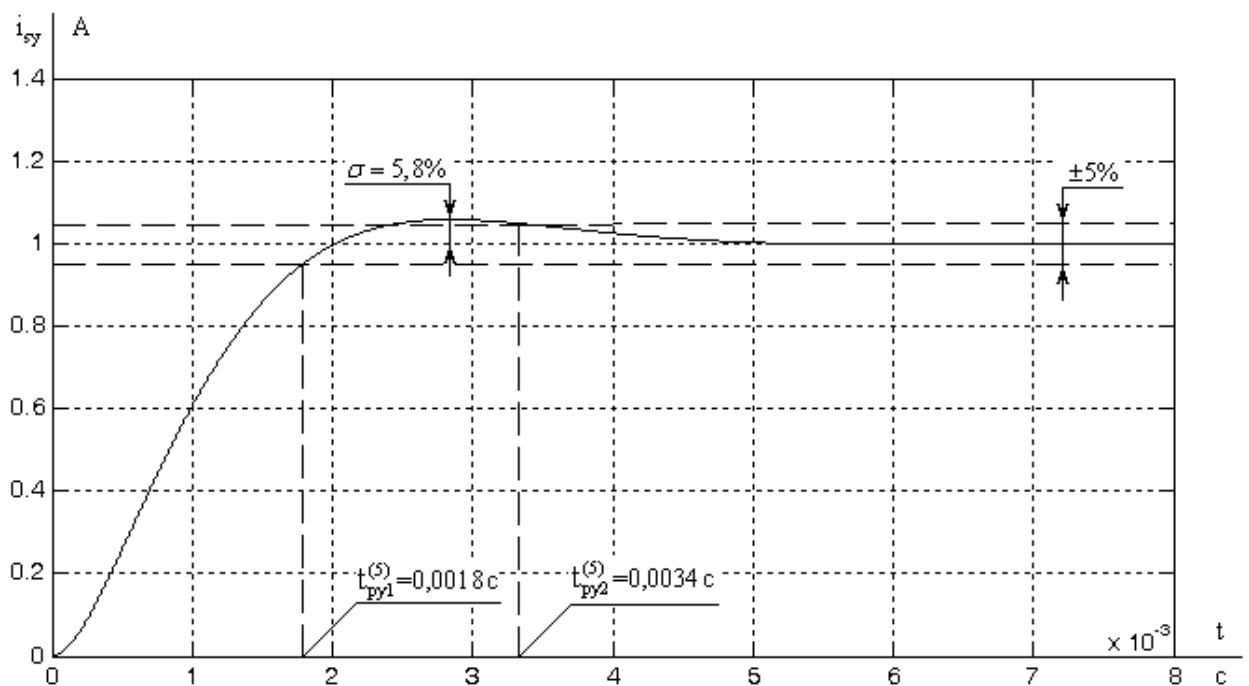


Рисунок 26 – График расчёта переходных процессов в оптимизированном контуре управления составляющей пространственного вектора тока i_{sy}

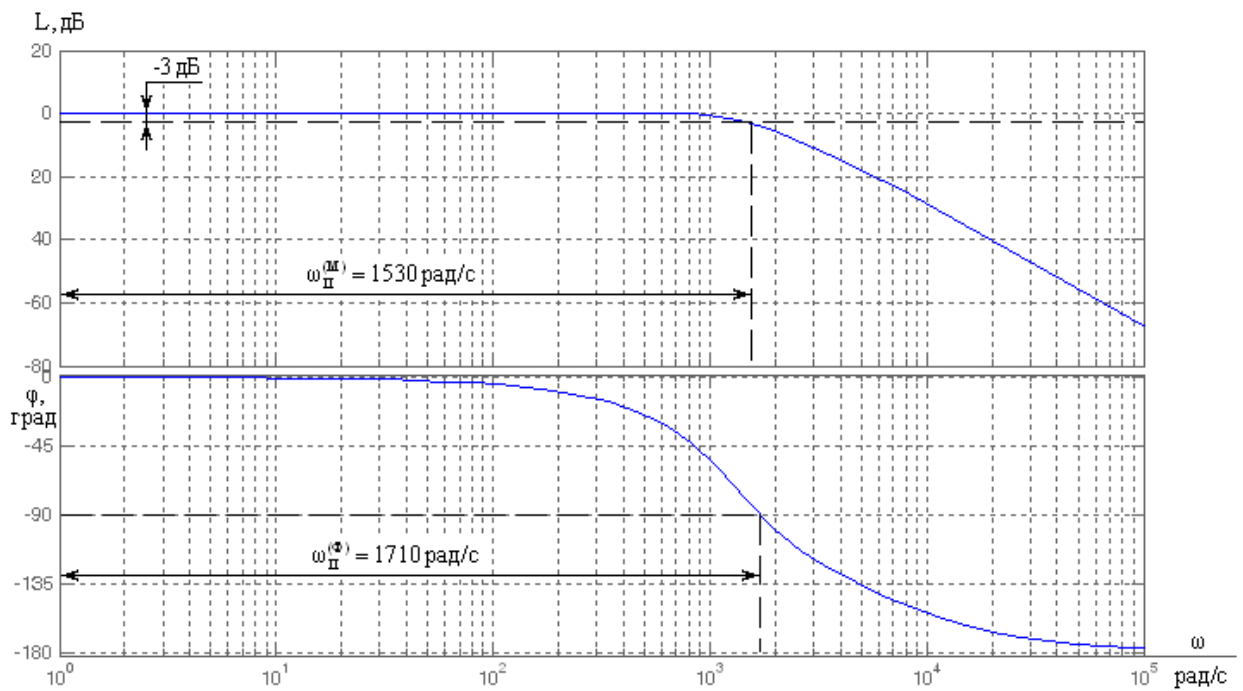


Рисунок 27 – График логарифмических амплитудно-частотных характеристик оптимизированного контура управления составляющей пространственного вектора тока i_{sy}

Сравнительные результаты показателей качества представлены в таблице 7. Как видно из полученных графиков, показатели качества переходных процессов оптимизированного контура несколько отличаются от ожидаемых. По величине перерегулирования расхождение составляет

$$\Delta_{\sigma} = |\sigma - \sigma_{ож}| = |5,8 - 4,32| = 1,48 \%,$$

а значение времени первого согласования отличается на величину

$$\Delta_t = |t_{pyl}^{(5)} - t_{pyl.ож}^{(5)}| = |0,0033 - 0,0018| = 0,0015 \text{ с}.$$

Полоса пропускания по модулю отличается от ожидаемого значения на величину

$$\Delta_{\omega_{\Pi}^{(M)}} = |\omega_{\Pi}^{(M)} - \omega_{\Pi.ож}^{(M)}| = |1530 - 592| = 938 \text{ рад/с},$$

а полоса пропускания по фазе – на величину

$$\Delta_{\omega_{\Pi}^{(\Phi)}} = |\omega_{\Pi}^{(\Phi)} - \omega_{\Pi.ож}^{(\Phi)}| = |1710 - 592| = 1118 \text{ рад/с}.$$

Таблица 7 – Результаты сравнения показателей качества при оптимизации контура управления составляющей пространственного вектора тока статора i_{sy}

Перерегулирование, σ , %	Время первого согласования, $t_{py1}^{(5)}$, с	Время переходного процесса, $t_{py2}^{(5)}$, с	Полоса пропускания по модулю, $\omega_n^{(м)}$, рад/с	Полоса пропускания по фазе, $\omega_n^{(ф)}$, рад/с
Ожидаемые показатели качества				
4.32	0,0033	0,0033	592	592
Показатели качества оптимизированного контура				
5,8	0,0018	0,0034	1530	1710

Как и в предыдущем случае с контуром управления составляющей пространственного вектора тока i_{sy} , по результатам синтеза получена система с нулевым значением установившейся ошибки и астатизмом первого порядка по управлению и возмущению. Анализ полученных результатов показывает, что отклонения между ожидаемыми показателями и показателями качества оптимизированного контура незначительны и могут быть приняты при проведении оптимальной настройки контура управления составляющей пространственного вектора тока статора i_{sy} . Следовательно, допущения, выполненные при оптимизации, можно считать справедливыми, так как обеспечивается упрощение объекта управления до уровня апериодического звена второго порядка с одновременным получением удовлетворительных рабочих характеристик в оптимизированном контуре.

4.3. Оптимизация контура управления потокосцеплением ротора

Для контура управления составляющей пространственного вектора тока i_{sy} внешним контуром является контур управления потокосцеплением

ψ_r . При оптимизации контура управления потокосцеплением ψ_r временно пренебрегаем влиянием перекрёстных обратных связей и используем метод настройки на оптимум по модулю [12]. Для нахождения требуемой передаточной функции регулятора $W_{\text{рег}}^{\psi_r}(p)$ выделим из всей системы ЭП отдельно взятый контур, рисунок 28.

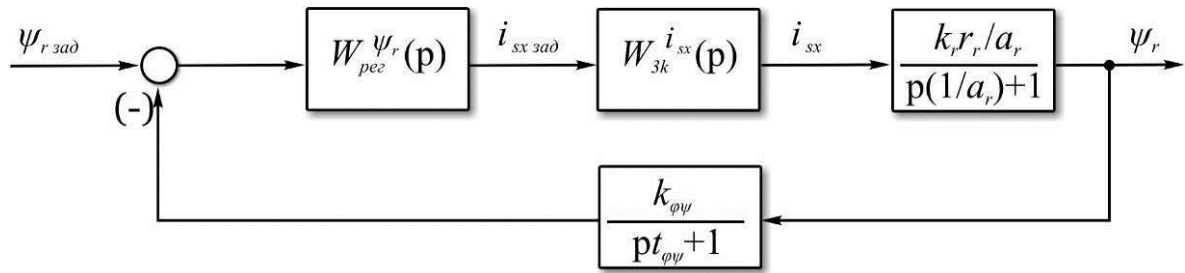


Рисунок 28 – Контур управления потокосцеплением ротора ψ_r

В канале обратной связи контура управления потокосцеплением ψ_r расположим фильтрующее апериодическое звено, смысл которого заключается в учёте инерционности системы косвенной оценки переменных, недоступных для прямого измерения. При решении задачи оптимизации данного контура определим постоянную времени фильтрующего элемента как двукратное значение постоянной времени из внутреннего подчинённого контура управления составляющей вектора тока:

$$t_{\phi\psi} = 2 \cdot t_{\phi} = 2 \cdot 0,0004 = 0,0008 \text{ с},$$

Далее согласно методике настройки на модульный оптимум [12] получаем выражение для передаточной функции регулятора

$$W_{\text{рег}}^{\psi_r}(p) = W_{\text{раз.}\psi}^{\text{МО}}(p) \cdot \frac{1}{W_{\text{зк}}^{i_{\text{sx}}}(p) \cdot \frac{k_r r_r / a_r}{\left(p \frac{1}{a_r} + 1\right)} \cdot \frac{k_{\phi\psi}}{(pt_{\phi\psi} + 1)}},$$

где $W_{\text{раз.}\psi}^{\text{МО}}(p) = \frac{1}{2 \cdot p \cdot t_{\mu\psi} (pt_{\mu\psi} + 1)}$ это передаточная функция эталонного разомкнутого контура потокосцепления, оптимизированного на модульный

оптимум, а $t_{\mu\psi}$ – малая некомпенсируемая постоянная времени, определяющая быстродействие контура;

$W_{3\kappa}^{i_{sx}}(p) = \frac{1}{2 \cdot p \cdot t_{\mu} (pt_{\mu} + 1) + 1}$ это передаточная функция замкнутого контура

управления составляющей вектора тока i_{sx} , являющаяся подчинённым контуром относительно контура потокосцепления.

В стремлении понизить порядок передаточной функции объекта управления допустимо не учитывать постоянные времени высших порядков. Применительно к замкнутому контуру $W_{3\kappa}^{i_{sx}}(p)$ это выглядит следующим образом:

$$W_{3\kappa}^{i_{sx}}(p) = \frac{1}{2 \cdot p \cdot t_{\mu} (pt_{\mu} + 1) + 1} = \frac{1}{2 \cdot p^2 \cdot t_{\mu}^2 + p2t_{\mu} + 1} \gg \frac{1}{2 \cdot p \cdot t_{\mu} + 1}. \quad (28)$$

С учётом допущения (28) получаем следующее выражение для передаточной функции регулятора:

$$W_{\text{рег}}^{\psi_r}(p) = W_{\text{раз.}\psi}^{\text{МО}}(p) \cdot \frac{1}{\frac{1}{(2 \cdot p \cdot t_{\mu} + 1)} \cdot \frac{k_r r_r / a_r}{\left(p \frac{1}{a_r} + 1\right)} \cdot \frac{k_{\phi\psi}}{(p \cdot t_{\phi\psi} + 1)}}.$$

Продолжая стремление к упрощению задачи синтеза, понижаем порядок передаточной функции объекта управления, для чего группируем вместе постоянные времени $2t_{\mu}$ и $t_{\phi\psi}$:

$$(2 \cdot p \cdot t_{\mu} + 1) \cdot (p \cdot t_{\phi\psi} + 1) = (p^2 2 \cdot t_{\mu} t_{\phi\psi} + p[2 \cdot t_{\mu} + t_{\phi\psi}] + 1) \gg (p[2 \cdot t_{\mu} + t_{\phi\psi}] + 1).$$

В итоге для передаточной функции регулятора получаем следующее выражение:

$$W_{\text{рег}}^{\psi_r}(p) = \frac{1}{2 \cdot p \cdot t_{\mu\psi} (pt_{\mu\psi} + 1)} \cdot \frac{[p(2 \cdot t_{\mu} + t_{\phi\psi}) + 1] \cdot \left(p \frac{1}{a_r} + 1\right)}{k_{\phi\psi} k_r r_r / a_r}.$$

Для величины малой некомпенсируемой постоянной времени в контуре потокосцепления принимаем значение $t_{\mu\psi} = 2t_{\mu} + t_{\phi\psi}$, и тогда итоговое

выражение для передаточной функции регулятора получаем в следующем виде:

$$W_{\text{рег}}^{\psi_r}(p) = \frac{1}{2 \cdot p(2 \cdot t_{\mu} + t_{\phi\psi}) \cdot [p(2 \cdot t_{\mu} + t_{\phi\psi}) + 1]} \cdot \frac{[p(2 \cdot t_{\mu} + t_{\phi\psi}) + 1] \cdot (p \frac{1}{a_r} + 1)}{k_{\phi\psi} k_r r_r / a_r} =$$

$$= \frac{(p \frac{1}{a_r} + 1)}{2 \cdot p(2 \cdot t_{\mu} + t_{\phi\psi}) k_{\phi\psi} k_r r_r / a_r} = \frac{1}{2 \cdot (2 \cdot t_{\mu} + t_{\phi\psi}) k_{\phi\psi} k_r r_r} \cdot \frac{(p \frac{1}{a_r} + 1)}{p \frac{1}{a_r}}.$$

В итоге синтеза оказался получен пропорционально-интегральный регулятор со следующими параметрами:

$$k_{\text{рег}}^{\psi_r} = \frac{1}{2 \cdot (2 \cdot t_{\mu} + t_{\phi\psi}) k_{\phi\psi} k_r r_r} =$$

$$= \frac{1}{2 \cdot (2 \cdot 0,0008 + 0,0008) \cdot 1 \cdot 0,967 \cdot 0,017} = 12673,11.$$

– коэффициент усиления и $t_{\text{рег}}^{\psi_r} = \frac{1}{a_r} = \frac{1}{0,669} = 1,495$

– постоянная времени интегрирования регулятора потокосцепления.

В таблице 8 представлены ожидаемые показатели качества оптимизированного контура.

Таблица 8 – Ожидаемые показатели качества контура управления потокосцеплением ротора ψ_r

Название показателя	Расчётная формула	Значение
Эквивалентная малая постоянная времени оптимизированного контура, $t_{\mu\psi}$, с	$t_{\mu\psi} = 2t_{\mu} + t_{\phi\psi}$	0,0024
Полоса пропускания по модулю, $\omega_{\text{п.}\psi}^{(м)}$, рад/с	$\omega_{\text{п.}\psi}^{(м)} = \frac{0.71}{t_{\mu\psi}}$	295
Полоса пропускания по фазе, $\omega_{\text{п.}\psi}^{(\phi)}$, рад/с	$\omega_{\text{п.}\psi}^{(\phi)} = \frac{0.71}{t_{\mu\psi}}$	295
Перерегулирование, σ_{ψ} , %	—	4,32
Время первого согласования, $t_{\text{py1.}\psi}^{(5)}$, с	$t_{\text{py1.}\psi}^{(5)} = 4.1 \cdot t_{\mu\psi}$	0,0098

Время переходного процесса, $t_{py2.\psi}^{(5)}$, с	$t_{py2.\psi}^{(5)} = 4.1 \cdot t_{\mu\psi}$	0,0098
---	--	--------

Для проверки соответствия показателей качества между оптимизированным контуром и ожидаемыми значениями, проведём расчёт переходных процессов и частотных характеристик. Переходные процессы и частотные характеристики рассчитаем, используя программную среду Simulink-Matlab. Результаты в виде графиков представлены на рисунках 29 и рисунках 30. В приложение А на рисунке А.5 представлен внешний вид имитационной модели в программной среде Simulink-Matlab для расчёта частотных характеристик и переходных процессов в оптимизированном контуре управления потокосцеплением ротора ψ_r при подаче на вход ступенчатого задающего сигнала.

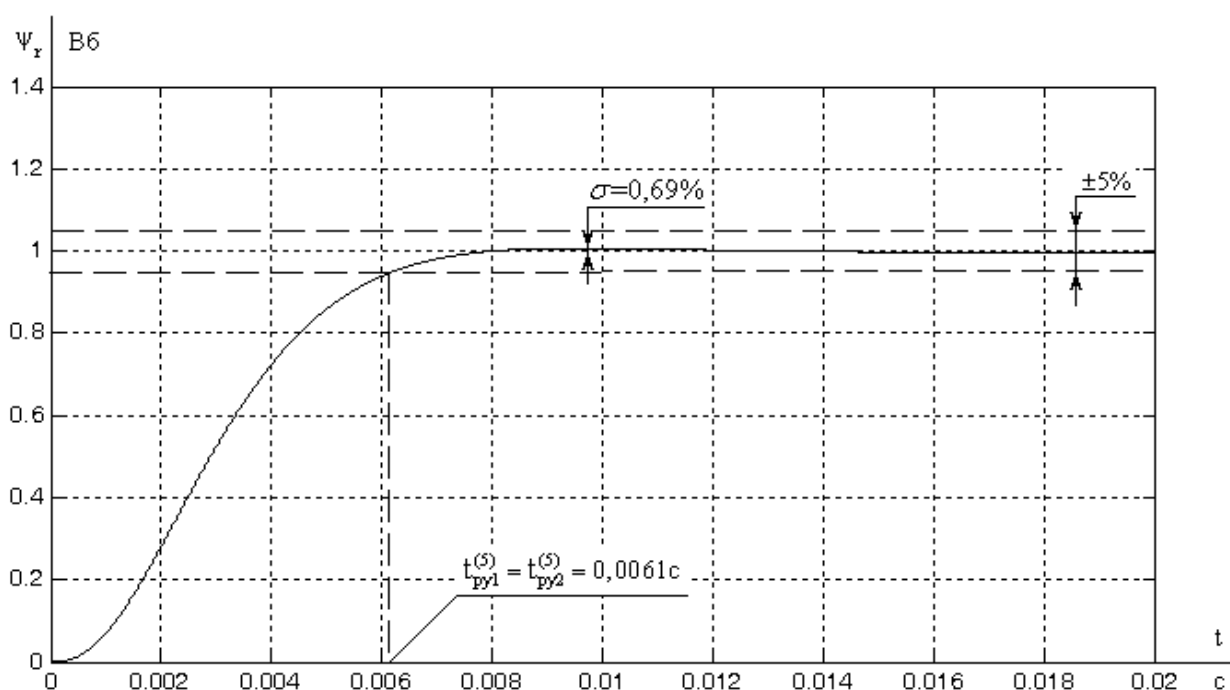


Рисунок 29 – График расчёта переходных процессов в оптимизированном контуре управления потокосцеплением ротора ψ_r

Сравнительные результаты показателей качества представлены в таблице 9. Как видно из полученных графиков, показатели качества переходных процессов оптимизированного контура несколько отличаются от ожидаемых. По величине перерегулирования расхождение составляет

$$\Delta_{\sigma\psi} = |\sigma_{\psi} - \sigma_{\psi\text{ож}}| = |0,69 - 4,32| = 3,63 \%,$$

а значение общего времени переходного процесса отличается на величину

$$\Delta_{t_{\text{то}}} = |t_{\text{py}2.\psi}^{(5)} - t_{\text{py}2.\psi\text{ож}}^{(5)}| = |0,0061 - 0,0098| = 0,0037 \text{ с},$$

Полоса пропускания по модулю отличается от ожидаемого значения на величину

$$\Delta_{\omega_{\text{п}}^{(M)}} = |\omega_{\text{п.}\psi}^{(M)} - \omega_{\text{п.}\psi\text{ож}}^{(M)}| = |600 - 295| = 305 \text{ рад/с},$$

а полоса пропускания по фазе – на величину

$$\Delta_{\omega_{\text{п}}^{(\Phi)}} = |\omega_{\text{п.}\psi}^{(\Phi)} - \omega_{\text{п.}\psi\text{ож}}^{(\Phi)}| = |500 - 295| = 205 \text{ рад/с}.$$

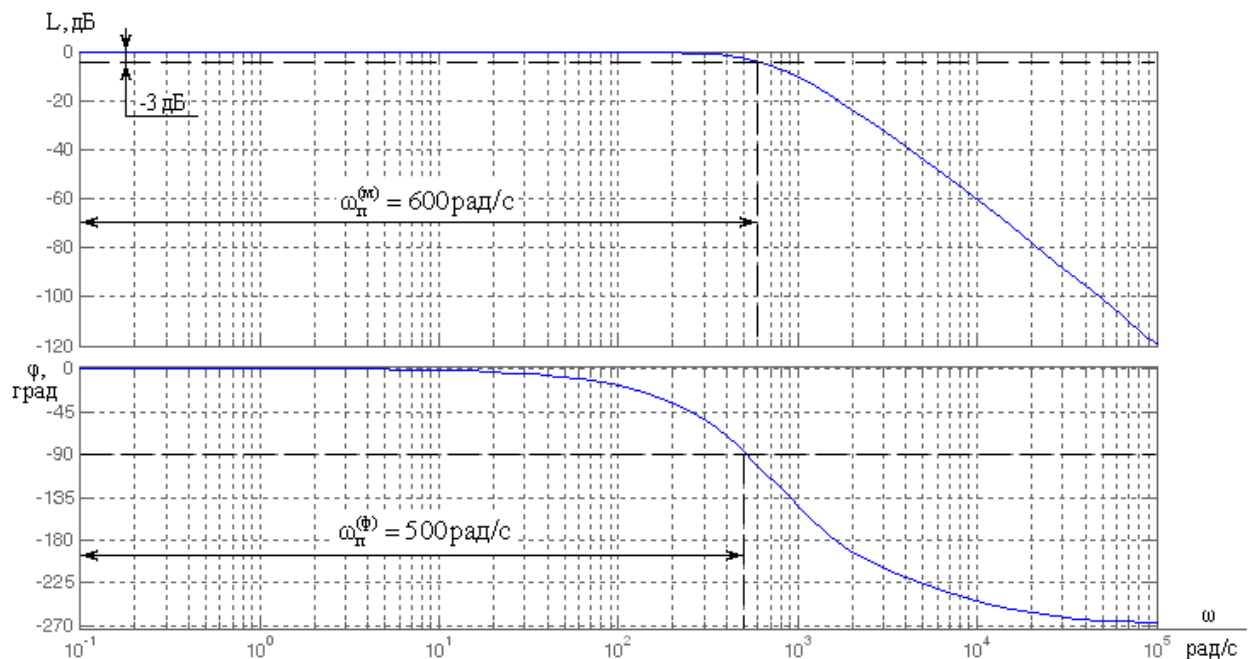


Рисунок 30 – График логарифмических амплитудно-частотных характеристик оптимизированного контура управления потокосцеплением ротора ψ_r

Как и во всех предыдущих случаях, по результатам исследований получена система с нулевым значением установившейся ошибки и астатизмом первого порядка по управлению и возмущению. Отклонения между ожидаемыми показателями и показателями качества оптимизированного контура незначительны и, следовательно, могут быть приняты при проведении

оптимальной настройки контура управления с потокосцеплением ротора ψ_r , так как обеспечивают получение вполне удовлетворительных рабочих характеристик.

Таблица 9 – Результаты сравнения показателей качества при оптимизации контура управления потокосцеплением ротора ψ_r

Перерегулирование, σ , %	Время первого согласования, $t_{py1}^{(5)}$, с	Время переходного процесса, $t_{py2}^{(5)}$, с	Полоса пропускания по модулю, $\omega_n^{(м)}$, рад/с	Полоса пропускания по фазе, $\omega_n^{(ф)}$, рад/с
Ожидаемые показатели качества				
4,32	0,0098	0,0098	295	295
Показатели качества оптимизированного контура				
0,69	0,0061	0,0061	600	500

4.4. Оптимизация контур управления скоростью

Для контура управления составляющей пространственного вектора тока i_{sy} внешним контуром является контур управления частотой вращения ω_r .

При оптимизации контура управления частотой вращения ω_r необходимо использовать настройку на симметричный оптимум [11,12], так как в данном случае объект управления содержит интегральное звено, что приводит к необходимости использования пропорционального регулятора при настройке на модульный оптимум и делает невозможным получение системы астатической по возмущению. Именно поэтому при оптимизации контура скорости используем настройку на симметричный оптимум, а для приближения характеристик контура после оптимизации к характеристикам, соответствующим настройке на модульный оптимум на входе контура согласно методике [12] установим фильтр в виде апериодического звена.

Для проведения оптимальной настройки временно пренебрегаем влиянием перекрёстных обратных связей и используем метод настройки на симметричный оптимум по модулю [9,12]. Для нахождения требуемой передаточной функции регулятора $W_{\text{рег}}^{\omega_r}(p)$ выделим из всей системы ЭП отдельно взятый контур, рисунке 31 и сопоставим передаточную функцию объекта управления данного контура с желаемой с учётом используемой системы относительных единиц.

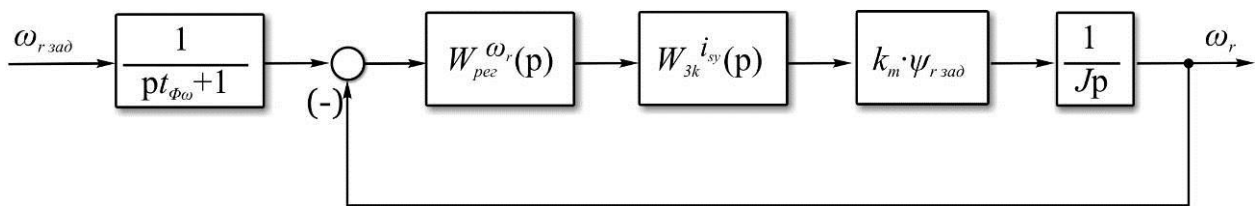


Рисунок 31 – Контур управления частотой вращения ω_r

Согласно методике настройки на симметричный оптимум [12] получаем выражение для передаточной функции регулятора скорости

$$W_{\text{рег}}^{\omega}(p) = W_{\text{раз.}\omega}^{\text{CO}}(p) \cdot \frac{J_{\text{экв}} p}{W_{\text{зк}}^{i_{\text{sy}}}(p) k_m \psi_{r,\text{зад}}}, \quad (29)$$

где $W_{\text{раз.}\omega}^{\text{CO}}(p) = \frac{(4 \cdot p \cdot t_{\mu\omega} + 1)}{8 \cdot p^2 \cdot t_{\mu\omega}^2 (p \cdot t_{\mu\omega} + 1)}$ это передаточная функция эталонного разомкнутого контура скорости, оптимизированного на симметричный оптимум, а $t_{\mu\omega}$ – малая некомпенсируемая постоянная времени, определяющая быстродействие контура;

$W_{\text{зк}}^{i_{\text{sy}}}(p) = \frac{1}{2 \cdot p \cdot t_{\mu} (p \cdot t_{\mu} + 1) + 1}$ это передаточная функция замкнутого контура управления составляющей вектора тока i_{sy} , в данном случае являющаяся подчинённым контуром для контура частоты вращения.

В стремлении понизить порядок передаточной функции объекта управления допустимо не учитывать постоянные времени высших порядков.

Применительно к замкнутому контуру $W_{3\kappa}^{i_{sy}}(p)$ это выглядит также как и в случае с замкнутым контуром $W_{3\kappa}^{i_{sx}}(p)$ в выражении (28):

$$W_{3\kappa}^{i_{sy}}(p) = \frac{1}{2 \cdot p \cdot t_{\mu} (pt_{\mu} + 1) + 1} = \frac{1}{2 \cdot p^2 \cdot t_{\mu}^2 + 2 \cdot p \cdot t_{\mu} + 1} \gg \frac{1}{2 \cdot p \cdot t_{\mu} + 1}.$$

С учётом допущения (29) получаем следующее выражение для передаточной функции регулятора скорости:

$$W_{\text{рег}}^{\omega}(p) = W_{\text{раз.}\omega}^{\text{CO}}(p) \cdot \frac{J_{\text{экр}} p}{\frac{1}{(2 \cdot p \cdot t_{\mu} + 1)} \cdot k_m \psi_{\text{г.зад}}}.$$

Для величины малой некомпенсируемой постоянной времени в контуре скорости принимаем значение $t_{\mu\omega} = 8t_{\mu}$, что почти в четыре раза больше чем при оптимизации контура управления потокосцеплением. Данное положение приводит к снижению быстродействия в контуре скорости с одной стороны, но позволяет уменьшить взаимное влияние между контурами скорости и потокосцепления с другой. Ввиду наличия перекрёстных обратных связей в структурной схеме имитационной модели объекта управления, при выполнении синтеза системы управления необходимо принимать дополнительные меры для снижения взаимного влияния перекрёстных контуров. Тогда итоговое выражение для передаточной функции регулятора в контуре скорости получаем в следующем виде:

$$W_{\text{рег}}^{\omega}(p) = \frac{(32 \cdot p \cdot t_{\mu} + 1)(2 \cdot p \cdot t_{\mu} + 1)J_{\text{экр}} p}{8 \cdot p^2 \cdot (8 \cdot t_{\mu})^2 (8 \cdot p \cdot t_{\mu} + 1)k_m \psi_{\text{г.зад}}}. \quad (30)$$

Выражение (30) неудобно для синтеза регулятора. Предлагается с учётом некоторых допущений, связанных с пренебрежением постоянными времени высших порядков выполнить ряд преобразований над числителем для его представления в более подходящем для синтеза виде.

$$(32 \cdot p \cdot t_{\mu} + 1)(2 \cdot p \cdot t_{\mu} + 1) \gg (34 \cdot p \cdot t_{\mu} + 1) \gg (26 \cdot p \cdot t_{\mu} + 1)(8 \cdot p \cdot t_{\mu} + 1). \quad (31)$$

С учётом (31), выражение (30) преобразуем к следующему виду:

$$W_{\text{рег}}^{\omega}(p) = \frac{(26 \cdot p \cdot t_{\mu} + 1)(8 \cdot p \cdot t_{\mu} + 1)J_{\text{экв}}p}{8 \cdot p^2 \cdot (8 \cdot t_{\mu})^2 (8 \cdot p \cdot t_{\mu} + 1)k_m \psi_{\text{г.зад}}} = \frac{(26 \cdot p \cdot t_{\mu} + 1)J_{\text{экв}}}{512 \cdot p \cdot t_{\mu}^2 k_m \psi_{\text{г.зад}}} =$$

$$= \frac{26J}{512 \cdot t_{\mu} k_m \psi_{\text{г.зад}}} \cdot \frac{(26 \cdot p \cdot t_{\mu} + 1)}{26 \cdot p \cdot t_{\mu}}$$

В итоге синтеза оказался получен пропорционально-интегральный регулятор со следующими параметрами:

$$k_{\text{рег}}^{\omega} = \frac{26J_{\text{экв}}}{512t_{\mu}k_m\psi_{\text{г.зад}}} = \frac{26 \cdot 7,3}{512 \cdot 0,0008 \cdot 4,5 \cdot 0,89} = 115,7$$

– коэффициент усиления,

$$t_{\text{рег}}^{\omega} = 26 \cdot t_{\mu} = 26 \cdot 0,0008 = 0,0256 \text{ с}$$

– постоянная времени интегрирования регулятора скорости,

$$t_{\text{ф}\omega} = 4 \cdot t_{\mu\omega} = 4 \cdot 8t_{\mu} = 32 \cdot t_{\mu} = 32 \cdot 0,0008 = 0,0208 \text{ с}$$

– постоянная времени входного фильтра.

В таблице 10 представлены ожидаемые показатели качества оптимизированного контура с настройкой на симметричный оптимум и фильтром на входе, определённые в соответствии с методикой, предложенной в [12].

Таблица 10 – Ожидаемые показатели качества контура управления частотой вращения

Название показателя	Расчётная формула	Значение
Эквивалентная малая постоянная времени оптимизированного контура, $t_{\mu\omega}$, с	$t_{\mu\omega} = 8t_{\mu}$	0,0064
Полоса пропускания по модулю, $\omega_{\text{п.}\omega}^{(M)}$, рад/с	$\omega_{\text{п.}\omega}^{(M)} = \frac{0.5}{t_{\mu\omega}}$	78,1
Полоса пропускания по фазе, $\omega_{\text{п.}\omega}^{(\Phi)}$, рад/с	$\omega_{\text{п.}\omega}^{(\Phi)} = \frac{0.36}{t_{\mu\omega}}$	56,2
Перерегулирование, σ_{ω} , %	—	8,1
Время первого согласования, $t_{\text{pyl.}\omega}^{(5)}$, с	$t_{\text{pyl.}\omega}^{(5)} = 7,0 \cdot t_{\mu\omega}$	0,0448

Время переходного процесса, $t_{\text{py}2.\omega}^{(5)}$, с	$t_{\text{py}2.\omega}^{(5)} = 12,0 \cdot t_{\mu\omega}$	0,0768
---	--	--------

Проверку соответствия показателей качества между оптимизированным контуром и ожидаемыми значениями, проведём с помощью расчёта переходных процессов и частотных характеристик. Переходные процессы и частотные характеристики получим, используя программную среду Simulink-Matlab. Результаты в виде графиков представлены на рисунках 32 и 33. В приложение А на рисунке А.6 представлен внешний вид имитационной модели в среде Simulink-Matlab для расчёта частотных характеристик и переходных процессов в оптимизированном контуре управления частотой вращения ω_r при подаче на вход ступенчатого задающего сигнала.

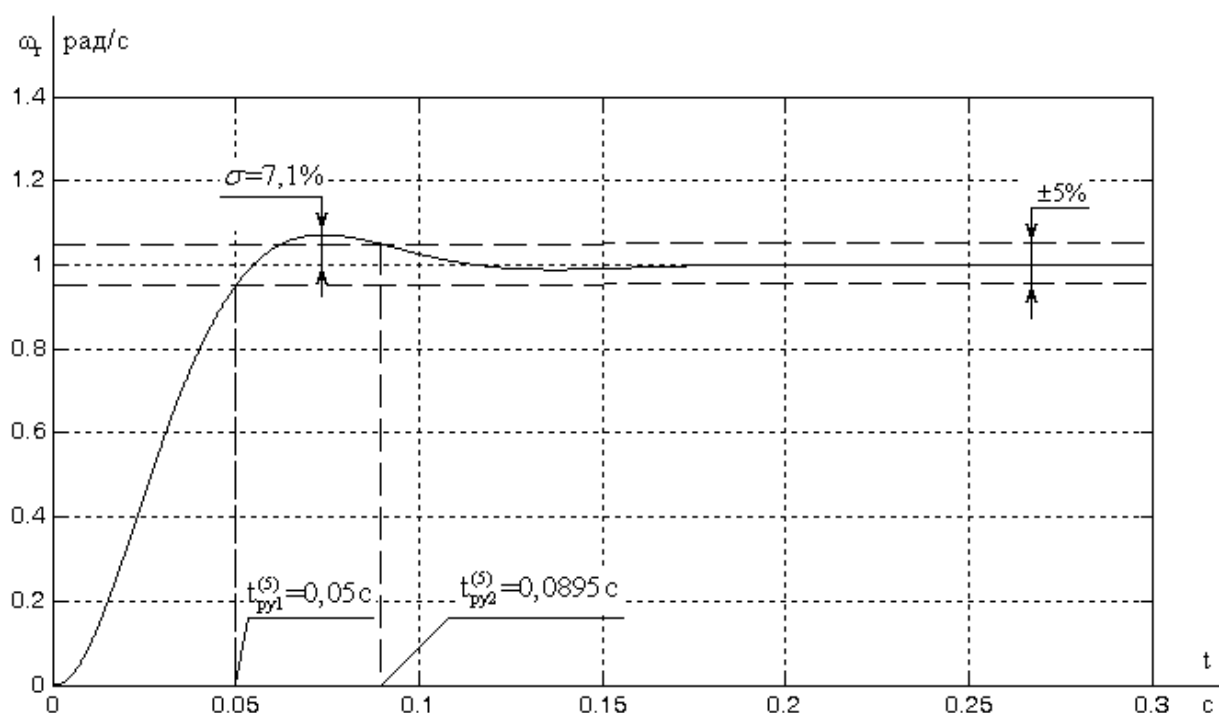


Рисунок 32 – График расчёта переходных процессов в оптимизированном контуре управления частотой вращения ротора ω_r

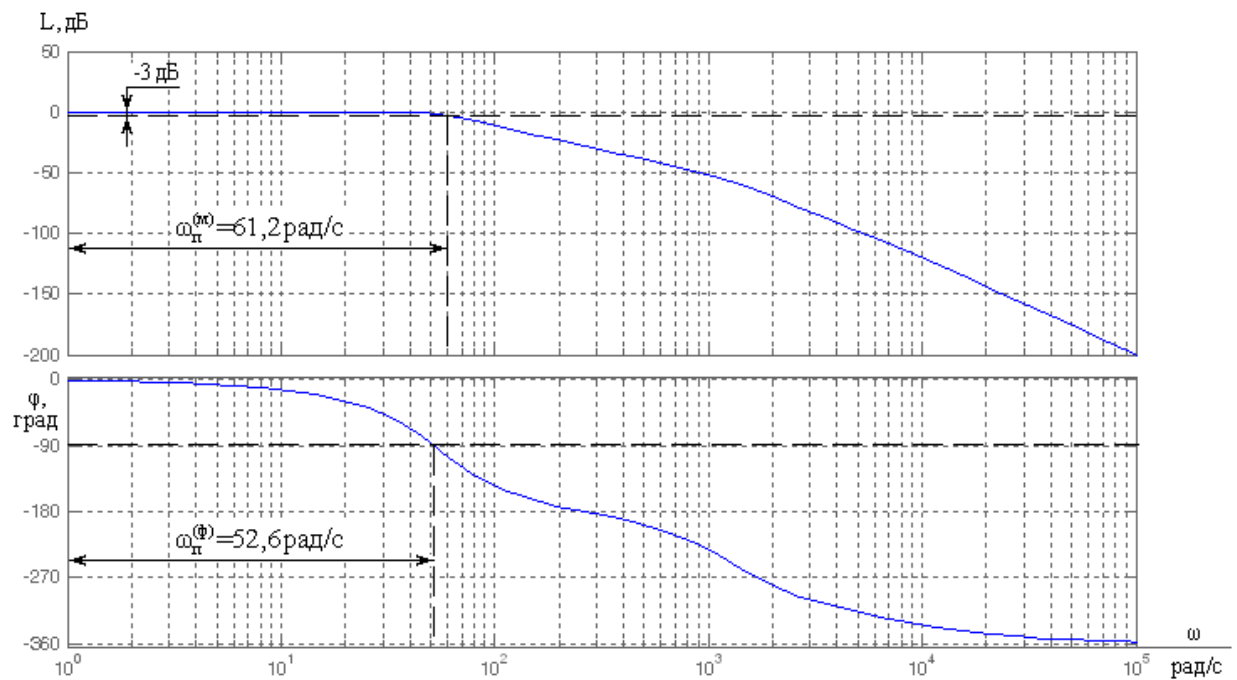


Рисунок 33 – График логарифмических амплитудно-частотных характеристик оптимизированного контура управления частотой вращения ротора ω_r

Как видно из таблицы и графиков, показатели качества переходных процессов желаемой передаточной функции и показатели оптимизированного контура отличаются друг от друга. По величине перерегулирования расхождение составляет

$$\Delta_{\sigma\omega} = |\sigma_{\omega} - \sigma_{\omega\text{ож}}| = |7,1 - 8,1| = 1\%,$$

а значение общего времени переходного процесса отличается на величину

$$\Delta_{t_{\omega}} = |t_{\text{py}2.\omega}^{(5)} - t_{\text{py}2.\omega\text{ож}}^{(5)}| = |0,0895 - 0,0768| = 0,0127 \text{ с}$$

Полоса пропускания по модулю отличается от ожидаемого значения на величину

$$\Delta_{\omega_{\text{по}}^{(M)}} = |\omega_{\text{п.}\omega}^{(M)} - \omega_{\text{п.}\omega\text{ож}}^{(M)}| = |61,2 - 78,1| = 16,9 \text{ рад/с},$$

а полоса пропускания по фазе – на величину

$$\Delta_{\omega_{\text{по}}^{(\Phi)}} = |\omega_{\text{п.}\omega}^{(\Phi)} - \omega_{\text{п.}\omega\text{ож}}^{(\Phi)}| = |52,6 - 56,2| = 3,6.$$

Таблица 11 – Результаты сравнения показателей качества при оптимизации контура управления частотой вращения ротора ω_r

Перерегулирование, σ , %	Время первого согласования, $t_{py1}^{(5)}$, с	Время переходного процесса, $t_{py2}^{(5)}$, с	Полоса пропускания по модулю, $\omega_p^{(M)}$, рад/с	Полоса пропускания по фазе, $\omega_p^{(\Phi)}$, рад/с
Ожидаемые показатели качества				
8,1	0,0448	0,00768	78,1	56,2
Показатели качества оптимизированного контура				
7,1	0,05	0,0895	61,2	52,6

После проведения оптимизации система обладает нулевым значением установившейся ошибки и астатизмом первого порядка по управлению и возмущению. Анализ результатов по отклонению показателей качества от ожидаемых показывает, что расхождения незначительны и могут быть использованы при оптимальной настройке контура управления частотой вращения ротора ω_r .

4.5. Исследование переходных процессов в линеаризованной системе

После проведения оптимизации отдельных контуров системы управления необходимо провести проверку показателей качества всей системы ЭП вентилятора главного проветривания. Данный режим не принимает во внимание различные нелинейности, присущие системе любого ЭП и предполагает рассмотрение системы в линеаризованном виде. На рисунке 34 представлена структурная схема линеаризованного асинхронного ЭП с векторным управлением на основе имитационной модели АД во вращающейся системе координат с ориентацией по вектору потокосцепления ротора, т.е. в данном случае и система управления, и модель АД, как

управляемый объект, находятся в одной и той же вращающейся системе координат.

Исследование показателей качества имитационной модели ЭП в представленном виде позволяет проверить работоспособность и оценить взаимное влияние перекрёстных контуров управления потокосцеплением ротора и скорости. Используя программную среду Simulink-Matlab на базе структурной схемы рисунке 34 разработаем имитационную модель линеаризованного асинхронного ЭП с векторным управлением. В приложение А на рисунке А.7 представлен внешний вид имитационной модели в среде Simulink-Matlab для расчёта переходных процессов.

Моделирование производится при последовательной подаче задающего сигнала в контуры потокосцепления и скорости. В первую очередь ступенчатый сигнал задания поступает на вход контура потокосцепления, и только по окончании переходных процессов в данном контуре система формирует следующий задающий сигнал для контура скорости. Данная задержка позволяет ещё перед началом движения стабилизировать магнитное состояние АД и способствует приближению переходных процессов по характеру к переходным процессам в ЭП с двигателем постоянного тока независимого возбуждения. В теории асинхронного ЭП задержку с подачей задания в контур скорости подобного вида принято называть начальным намагничиванием.

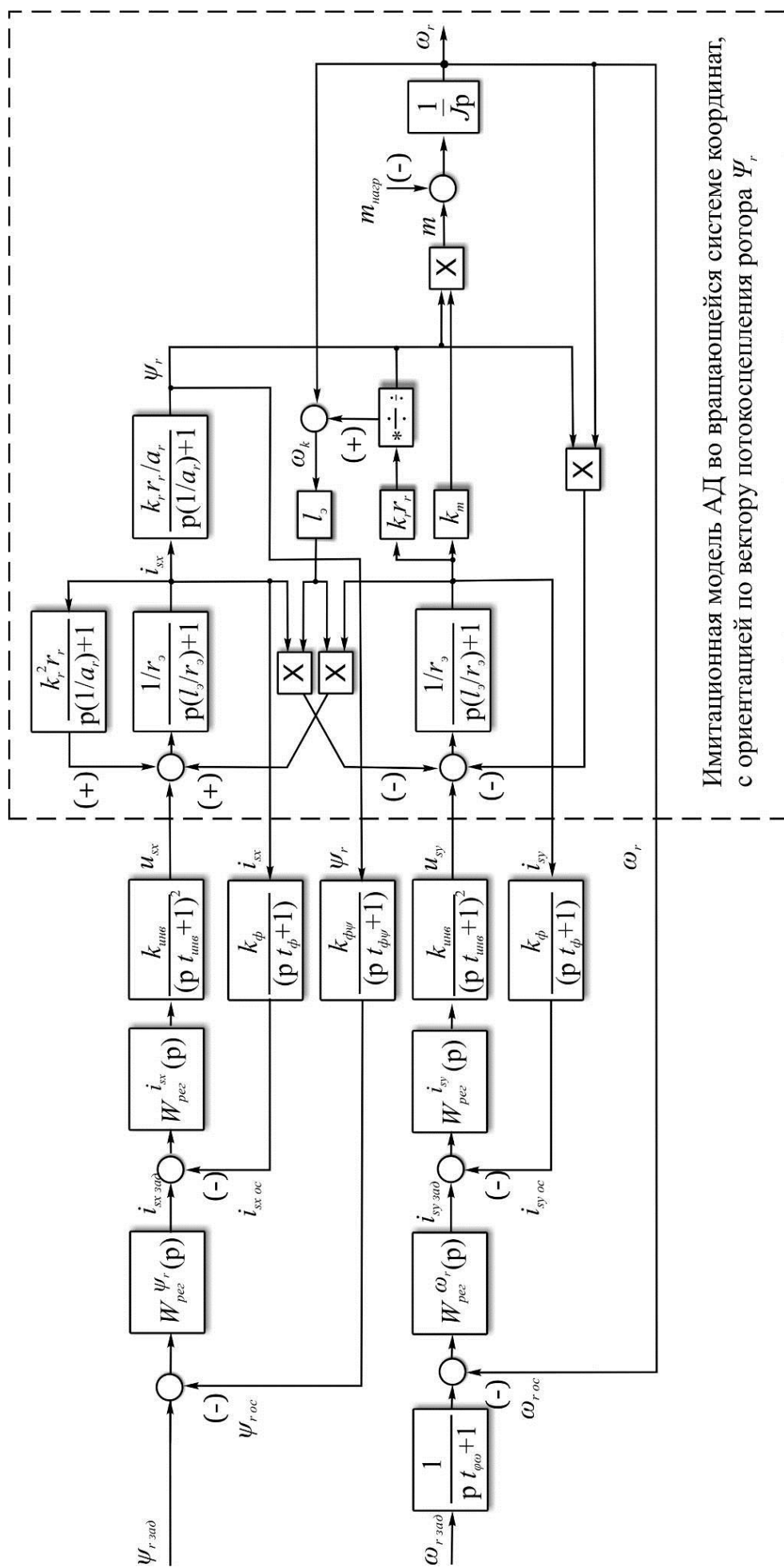


Рисунок 34 – Структурная схема линейризованного асинхронного ЭП с векторным управлением на основе модели

АД во вращающейся системе координат с ориентацией по вектору потокоцепления ротора

Результаты моделирования переходных процессов в линеаризованной системе при $\omega_{\text{зад}}=102,4$ рад/с и $\psi_{\text{зад}}=0,89$ Вб приведены на рисунке 35.

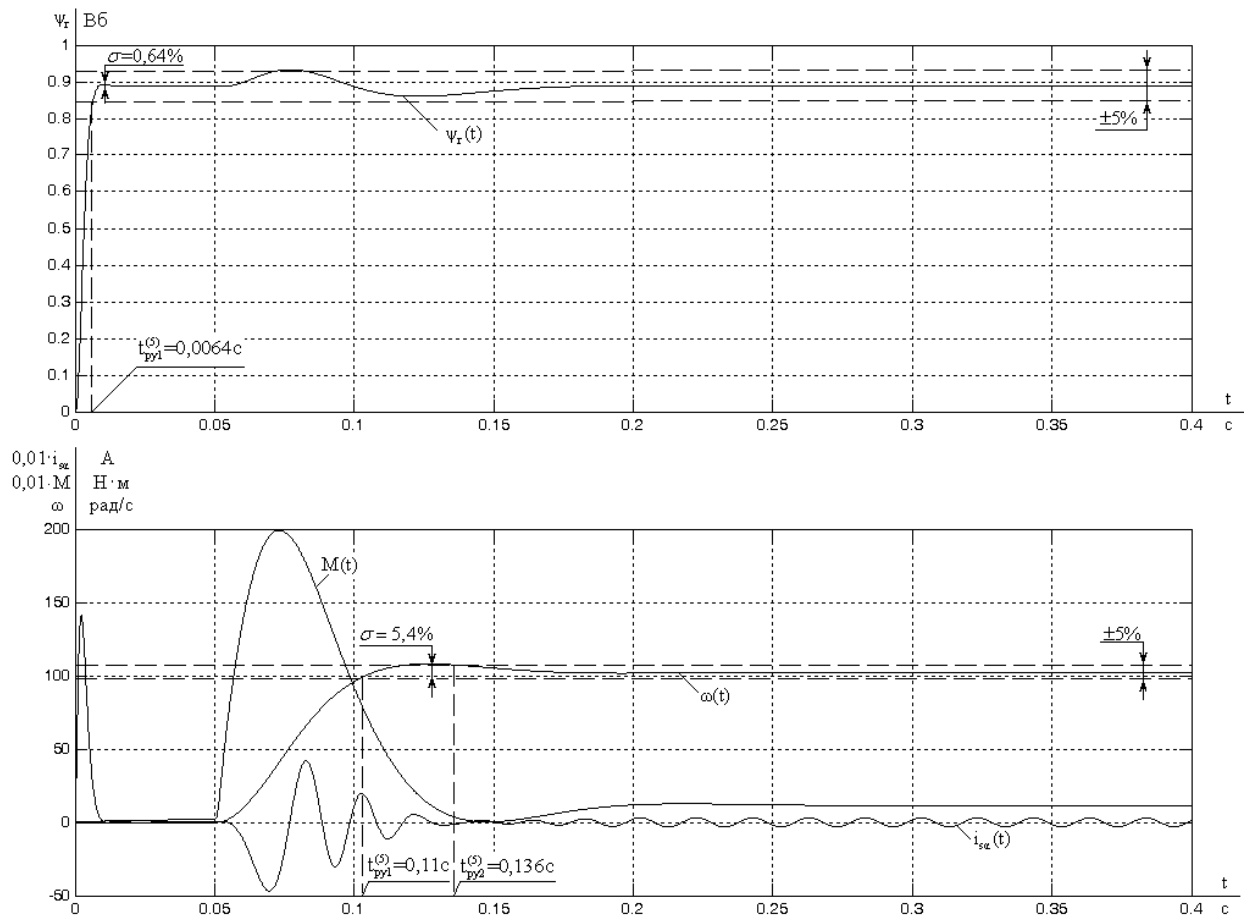


Рисунок 35 – Переходные процессы в линеаризованном асинхронном ЭП с векторным управлением на базе имитационной модели АД во вращающейся системе координат с ориентацией по вектору потокосцепления ротора

Анализ переходных процессов применительно к оценке взаимного влияния перекрёстных контуров потокосцепления ротора и скорости показывает, что наибольшее влияние оказывает переходный процесс в контуре скорости, вызывая отклонение потокосцепления ротора от установившегося значения. Относительно переходных процессов в контуре потокосцепления, можно заключить, что значительное влияние на отклонения в контуре скорости, как и ожидалось, отсутствует.

Продолжая исследования, выполним переход от имитационной модели АД во вращающейся системе координат к модели в стационарной

координатной системе. Именно модель АД в стационарной системе координат позволяет получить протекание процессов по характеру наиболее близкое к реальному АД, что незаменимо при отладке системы управления.

Используя координатные преобразования Парка-Горева связываем разработанную систему управления с имитационной моделью АД в стационарной системе координат. На рисунке 36 представлена структурная схема линейризованного асинхронного ЭП с векторным управлением на основе модели АД в стационарной системе координат.

Для ориентации координатных преобразователей, и, как следствие, всей системы управления вычисляем угол поворота пространственного вектора потокосцепления ротора на основе информации о его составляющих в стационарной системе координат. Данная степень идеализации процесса косвенного определения переменных использована в линейризованной системе для получения возможности анализа и оценки влияния промежуточных координатных преобразований.

Используя программную среду Simulink-Matlab на базе структурной схемы рисунка 36 разработаем имитационную модель линейризованного асинхронного ЭП с векторным управлением и координатными преобразованиями. В приложении А на рисунке А.8 представлен внешний вид имитационной модели в среде Simulink-Matlab для расчёта переходных процессов.

На рисунке 37 представлены графики переходных процессов рассчитанные для условий работы, аналогичных исследованным ранее на рисунке 35. Численные значения показателей качества переходных процессов, полученные по итогам моделирования, приведены в сравнительной таблице 12. Как видно из графиков, характер переходных процессов и показатели качества практически полностью совпадают с полученными ранее на рисунке 35, что свидетельствует о правильном выполнении перехода к имитационной модели АД в стационарных координатах и верной ориентации координатной системы.

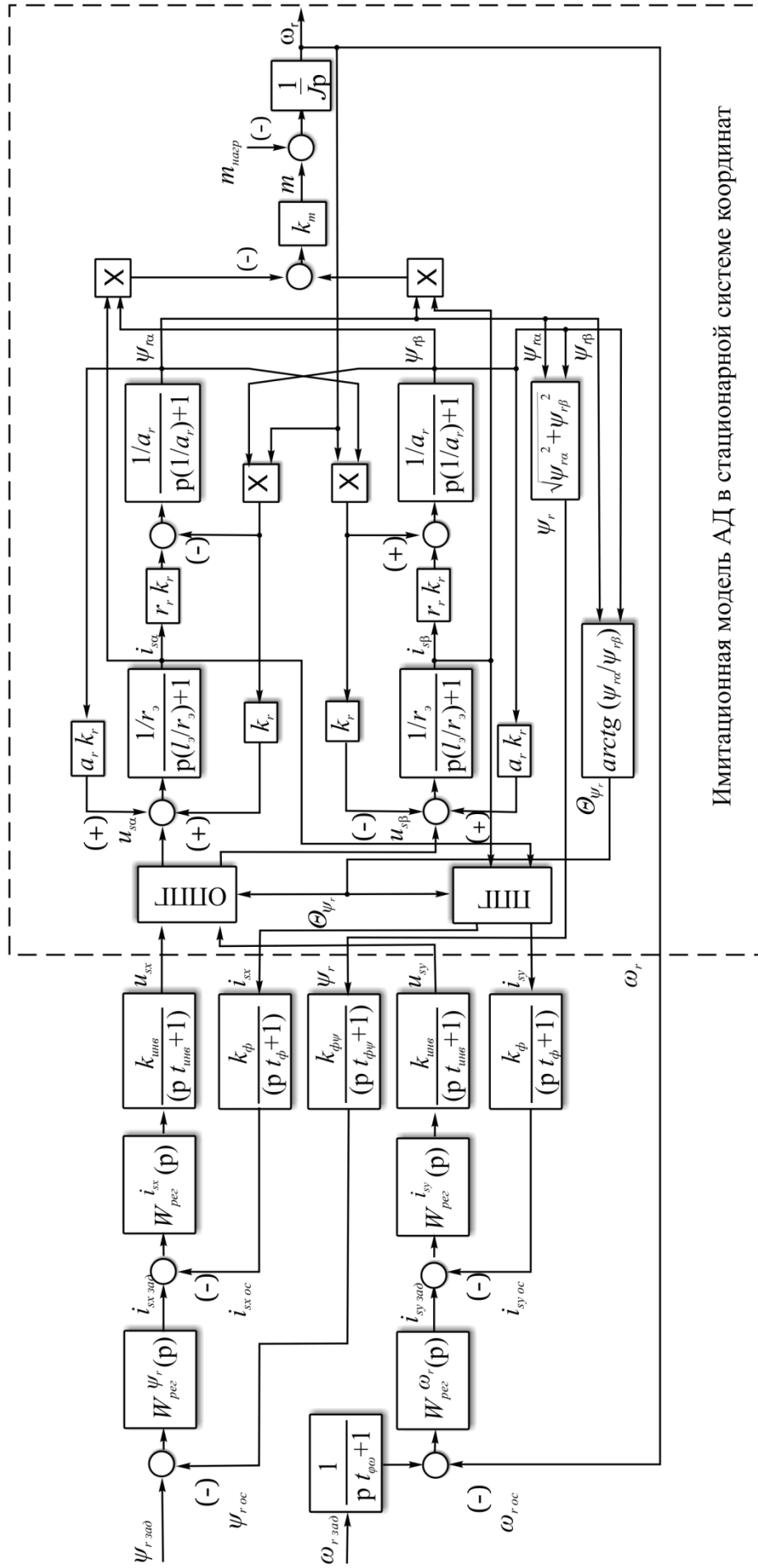


Рисунок 36 – Структурная схема линейризованного асинхронного ЭП с векторным управлением на основе имитационной модели АД в стационарной системе координат

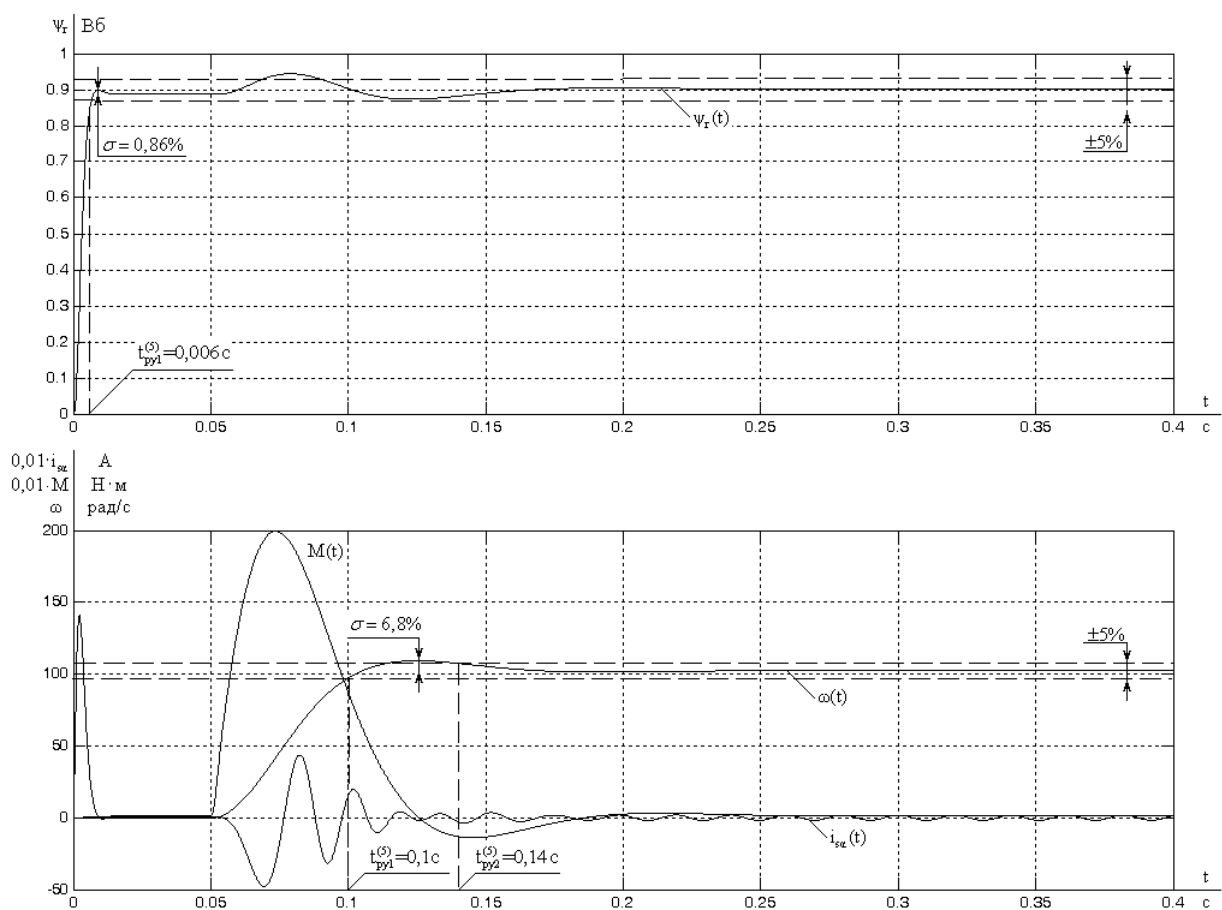


Рисунок 37 – Переходные процессы в линейризованном асинхронном ЭП с векторным управлением на базе имитационной модели АД в стационарной системе координат

Таблица 12 – Сравнительные показатели качества перекрёстных контуров управления потокосцеплением ротора и частотой вращения

Показатели качества	Контур управления частотой вращения ротора ω_r			Контур управления потокосцеплением ротора ψ_r		
	$\sigma, \%$	$t_{py1}^{(5)}, c$	$t_{py2}^{(5)}, c$	$\sigma, \%$	$t_{py1}^{(5)}, c$	$t_{py2}^{(5)}, c$
Ожидаемые	8,1	0,0448	0,0768	4.32	0,0098	0,0098
Отдельный контур,	7,1	0,05	0,0895	0,69	0,0061	0,0061
Система без координатных преобразований	5,4	0,11	0,136	0,64	0,0064	0,0064
Система с координатными преобразованиями	6,8	0,1	0,14	0,86	0,006	0,006

Анализируя полученные результаты можно сделать вывод о незначительном взаимном влиянии на качество переходных процессов в перекрёстных контурах управления потокосцеплением ротора и скоростью. Итоги перехода к системе асинхронного ЭП с координатными преобразованиями свидетельствуют также о незначительном влиянии на показатели качества и доказывают допустимость применения предложенной методики для оптимизации системы модифицированного векторного управления.

4.6. Исследование переходных процессов в нелинейной системе

Для приближения условий исследования имитационной модели ЭП вентилятора к реальному объекту следует модернизировать линеаризованную систему с возможностью учёта нелинейностей обусловленных наложением всевозможных ограничений и использованием задатчиков интенсивности.

Применительно к асинхронному ЭП вентилятора главного проветривания следует выделить следующие нелинейности:

- ограничение на выходе регуляторов,
- линейные задатчики интенсивности в каналах управления потокосцеплением ротора и скоростью,

Используя в качестве основы линеаризованную структурную схему имитационной модели ЭП вентилятора (рисунок 36) разработаем соответствующую систему с учётом указанных выше нелинейностей. На рисунке 22 представлена функциональная схема системы векторного управления асинхронным ЭП вентилятора с учётом нелинейностей.

Для проведения исследований и получения предварительной оценки качества функционирования разработанной системы в программной среде Simulink-Matlab создана имитационная модель асинхронного ЭП вентилятора с векторным управлением. В приложение А на рисунке А.9 представлен

внешний вид имитационной модели в среде Simulink-Matlab нелинейной системы ЭП вентилятора.

На рисунке 38 представлены результаты исследования ЭП вентилятора главного проветривания с векторным управлением при учёте нелинейностей.

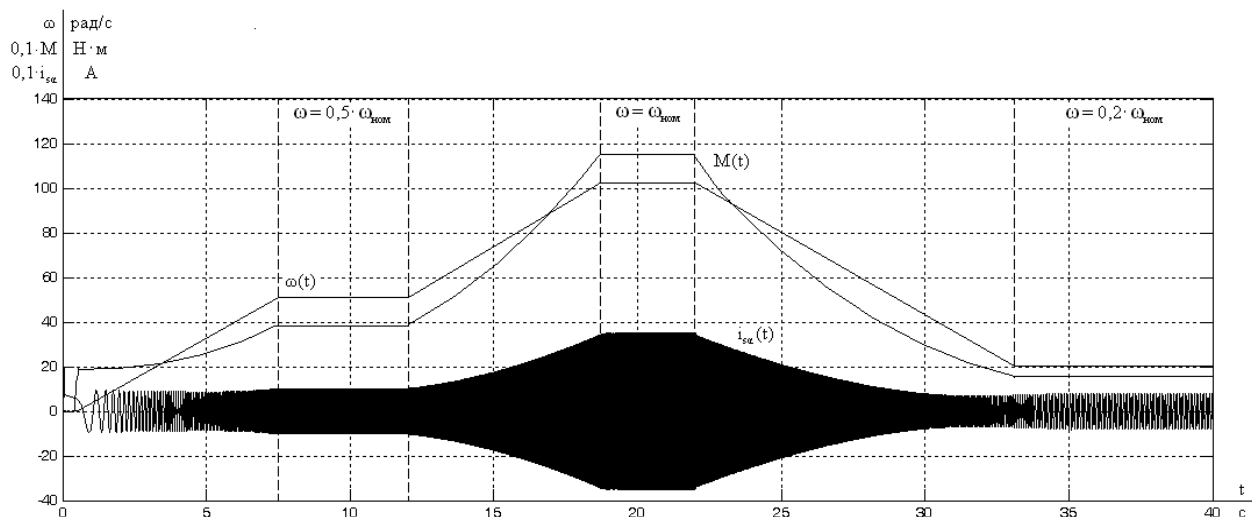


Рисунок 38 – Графики переходных процессов в системе ЭП вентилятора с векторным управлением при учёте нелинейностей

Анализ графиков переходных процессов на рисунке 38 показывает, что нелинейности значительно влияют на работу системы управления, главным образом влияя на быстродействие, снижая его. Так же можно отметить, что ЭП вентилятора в полном объёме отрабатывает требуемые частоты вращения и обеспечивает необходимый диапазон регулирования.

Полученные результаты имитационных исследований доказывают, что частотно-регулируемый асинхронный электропривод вентилятора с векторным управлением позволяет обеспечить требуемый диапазон регулирования скорости вентилятора. Переходные процессы в электроприводе протекают плавно с ограничением динамического момента, токов двигателя и преобразователя.

ЗАДАНИЯ ДЛЯ РАЗДЕЛА «ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:

Группа	ФИО
3-5Г4Б2	Енин Андрей Евгеньевич

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

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

1. Стоимость затрат технического проекта(ТП):	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.
2. Продолжительность выполнения ТП	По приближительной оценке, продолжительность ТП составляет 67 рабочих дней.

Тема вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

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

Тема графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. Диаграмма Ганта

Выдачи задания для раздела по линейному графику	20.03.2019 г.
---	---------------

Задание выдал консультант:

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

социально-гуманитарных наук	Мария Вигеновна			
-----------------------------	-----------------	--	--	--

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
3-5Г4Б2	Енин Андрей Евгеньевич		

5 ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ

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

Достижение цели обеспечивается решением следующих задач:

- Составление SWOT-анализа работы вентилятора главного проветривания шахты;
- Планирование технико-конструкторских работ;
- Определение ресурсной эффективности проекта.

5.1 SWOT-анализ работы осевого вентилятора местного проветривания шахты

SWOT – представляет собой комплексный анализ проекта. SWOT анализ применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта, которые помогают оценить возможности, угрозы сильных и слабых сторон.

Для того, чтобы найти сильные и слабые стороны, проведем SWOT–анализ. Он проводится в несколько этапов.

При составлении матрицы SWOT удобно использовать следующие обозначения:

С – сильные стороны проекта;

Сл – слабые стороны проекта;

В – возможности;

У – угрозы;

Матрица SWOT приведена в таблице 13.

Таблица 13 – Составление предварительной матрицы SWOT

	Сильные стороны проекта С1. Высокая надежность обеспечением необходимого давления и подачи воздуха в забой. С2. Большая экономия потребляемой эл.энергии. С3. Квалифицированный персонал. С4. Повышение безопасности производства С5. Небольшие затраты на ремонт оборудования	Слабые стороны проекта Сл1. Повышенный уровень шума при работе. Сл2. Высокая стоимость оборудования. Сл3. Большой срок поставки оборудования и комплектующих.
Возможности В1. Экономия производительности энергоблоков В2. Уменьшение себестоимости путем внедрения новых технологий. В3. Дополнительное резервное питание вентилятора. В4. Повышение стоимости конкурентных систем.	В1С1; С2; С3; С4; В2С1; С2; С4; С5; В3С1; С4; С5; В4С1; С2; С5;	В1Сл2; В2Сл1; В4Сл2.
Угрозы У1. Исчезновение питания вентилятора. У2. Негативные изменения в отношениях с поставщиками. У3. Введения дополнительных государственных требований к стандартизации и сертификации продукции У4. Отсутствие финансового обеспечения со стороны государства	У1С1С3; У2С5; У3С1; У4С3;	У1Сл3; У2Сл2; У4Сл2.

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

При построении интерактивных матриц используются обозначения аналогичные самой матрицы SWOT с дополнением знаков (+, -) для подробного представления наличия возможностей и угроз проекта («+» – сильное соответствие; «-» – слабое соответствие) [6].

Анализ интерактивных матриц, приведенных в таблицах 14 и 15, показывает, что сильных сторон у проекта значительно больше, чем слабых.

Таблица 14 – Интерактивная матрица возможностей

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

Таблица 15 – Интерактивная матрица угроз

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

В результате проведения SWOT – анализа были рассмотрены сильные и слабые стороны технического проекта.

Самой сильной стороной проекта является надежность обеспечением необходимого давления и подачи воздуха в забой и повышение безопасности производства, так как исчезновение питания вентилятора может повлечь за собой опасность для жизни людей, а также нарушение сложного технологического процесса. Кроме того, дополнительное резервное питание вентилятора показывает перспективность проекта в целом. Угрозы имеют низкие вероятности, что говорит о высокой надежности проекта.

5.2 Организация работ 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 электроснабжения осевого вентилятора местного проветривания шахты.

5.3.1 Структура работ в рамках технического проектирования

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

Номерам этапов соответствуют следующие виды выполняемых работ, представленные в таблице 16:

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

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

№3 – сбор исходных данных – сбор параметров осевого вентилятора местного проветривания, двигателей, нагрузок;

№4 – подготовка данных, ввод нагрузок;

№5 – расчет нагрузок осевого вентилятора местного проветривания;

№6 – выбор оборудования – выбор элементов электропривода;

№7 – расчет элементов электропривода, построение механических и электромеханических характеристик;

№8 – проверка правильности выбора оборудования;

№9 – составление пояснительной записки;

№10 – проверка выпускной квалификационной работы руководителем – в рамках учебно-практической работы, включает в себя окончательную проверку руководителем, устранение недочетов дипломником, подготовка к защите ВКР – подготовка презентации, согласование с преподавателем для защиты перед аттестационной государственной комиссией.

Таблица 15 – перечень этапов работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение ТЗ	Научный руководитель
Выбор направления технического исследования	2	Подбор и изучение материалов по теме	Дипломник
Расчеты и проектирование системы	3	Сбор исходных данных	Дипломник
	4	Подготовка и ввод данных	Дипломник
	5	Расчет нагрузок осевого вентилятора местного проветривания	Дипломник
	6	Выбор оборудования	Дипломник, научный руководитель
	7	Расчет элементов электропривода, построение механических и электромеханических характеристик	Дипломник, научный руководитель
Обобщение и оценка результатов	8	Проверка правильности выбора оборудования	Дипломник, научный руководитель

Оформление отчета по техническому проектированию	9	Составление пояснительной записки	Дипломник
Сдача выпускной квалификационной работы	10	Проверка ВКР руководителем, подготовка к защите ВКР	Дипломник, научный руководитель

В результате определения структуры работ в рамках технического проекта было выявлено шесть основных этапов (разработка технического задания, выбор направления технического исследования, расчеты и проектирование системы, обобщение и оценка результатов, оформление отчета по техническому проектированию, сдача выпускной квалификационной работы) и 10 работ.

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:

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

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.;

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

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.

График строится для ожидаемого по длительности исполнения работ в рамках технического проекта, с разбивкой по месяцам и декадам за период времени подготовки ВКР. На основе таблицы 16 строим план-график проведения работа (таблица 17).

Продолжительность выполнения технического проекта заняла 8 декад, начиная с третьей декады марта и заканчивая первой декадой июня. Продолжительность выполнения технического проекта в рабочих днях заняла 67 дней. Из них:

66 дней – продолжительность выполнения работ дипломника;

9 дней – продолжительность выполнения работ научным руководителем;

Таблица 16 – Расчёт продолжительность работ чел.-дн.

№	Название работы	Трудоёмкость работ, чел-дни					
		Минимально возможная трудоемкость		Максимально возможная трудоемкость		Ожидаемая трудоемкость	
		Науч. рук-ль	Дипломник	Науч. рук-ль	Дипломник	Науч. рук-ль	Дипломник
1	Составление и утверждение ТЗ	1	-	1	-	1	-
2	Подбор и изучение материалов по теме	-	5	-	10	-	7
3	Сбор исходных данных	-	5	-	10	-	7
4	Подготовка и ввод данных	-	7	-	12	-	9
5	Расчет нагрузок вентилятора	-	5	-	10	-	7
6	Выбор оборудования	2	2	2	5	2	3,2
7	Расчет элементов электропривода, построение механических и электромеханических характеристик	2	8	2	14	2	10,4
8	Проверка правильности выбора оборудования	2	3	2	8	2	5
9	Составление пояснительной записки	-	8	-	15	-	10,8
10	Проверка ВКР руководителем, подготовка к защите ВКР	2	3	2	10	2	5,8

При заполнении таблицы используются следующие обозначения:

«Д» - дипломник;

«Р» - руководитель.

Таблица 17 – Диаграмма Ганта

№ этап а работ	Вид работ	И с п .	Продол жительн ость одной работы дн.	Продолжительность выполнения работ по декадам							
				Март	Апрель			Май			Июнь
				3	1	2	3	1	2	3	1
1	Составление и утверждение технического задания	Р	1								
2	Подбор и изучение материалов по теме	Д	7								
3	Сбор исходных данных	Д	7								
4	Подготовка и ввод данных	Д	9								
5	Расчет нагрузок вентилятора	Д	7								
6	Выбор оборудования	Д	3								
		Р	2								
7	Расчет элементов электропривода, построение механических и электромеханических характеристик	Д	10								
		Р	2								
8	Проверка правильности выбора оборудования	Р	2								
		Д	5								
9	Оформление пояснительной записки	Д	11								
10	Проверка ВКР руководителем, подготовка к защите ВКР	Р	2								
		Д	6								

5.2 Расчёт затрат на осуществление технического проекта

Целью планирования себестоимости проведения технического проекта является экономически обоснованное определение величины затрат на его выполнение. Исходными данными для расчета затрат является план работ и перечень требуемой аппаратуры, оборудования, сырья и материалов.

Затраты на осуществление технического проекта рассчитываются по следующим статьям расходов с последующим суммированием:

- расходы на оплату труда;
- отчисления во внебюджетные страховые фонды;
- расходы на материалы и комплектующие изделия;
- расходы на спецоборудование;
- накладные расходы.

5.3.1 Расчет защита материальных затрат пожары технического проекта

Расчет материальных затрат осуществляется по следующей формуле:

$$З_{\text{м}} = \sum_{i=1}^m Ц_i \cdot N_{\text{расх}i}$$

где m – количество видов материальных ресурсов, потребляемых при выполнении технического проекта;

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

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

К материальным затратам можно отнести: бумага, ручка, корректор, USB-накопитель, блокнот, линейка, мультифора. Материальные затраты, необходимые для данной работы, указаны в таблице 18.

Таблица 18 – Материальные затраты

Наименование	Единица измерения	Количество	Цена за ед., руб.	Затраты на материалы (Зм), руб.
Бумага	Лист	150	2,5	375
Ручка	Шт.	1	60	60
USB накопитель	Шт.	1	305	305
Линейка	Шт.	1	85	85
Мультифора	Шт.	10	2	20
Блокнот	Шт.	1	100	100
Корректор	Шт.	1	55	55
Итого:				1000

5.3.2 Полная заработная плата исполнителей темы

В настоящую статью включается полная заработная плата научного руководителя и студента, которая рассчитывается по формуле:

$$З_{п} = З_{осн} + З_{доп},$$

где: $З_{осн}$ – основная заработная плата;

$З_{доп}$ – дополнительная заработная плата.

Величина расходов по заработной плате определяется исходя из трудоемкости выполняемых работ и действующей системы окладов и тарифных ставок.

Основная заработная плата ($З_{осн}$) руководителя (лаборанта, инженера) от предприятия (при наличии руководителя от предприятия) рассчитывается по следующей формуле:

$$З_{осн} = T_p \cdot З_{дн},$$

где: $З_{осн}$ – основная заработная плата одного работника;

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

$З_{дн}$ – среднедневная заработная плата работника, руб. Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$З_{дн} = \frac{З_{м} \cdot M}{F_d},$$

где: $З_{м}$ – месячный должностной оклад работника, руб.;

$F_{мес}$ – количество рабочих дней, раб.дн.

Таблица 19 - 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	47100	10 100	57200	2355	9	21200
Дипломник	12300	3 700	16000	615	66	40600

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

Расчет дополнительной заработной платы ведется по следующей формуле:

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

где: $k_{\text{доп}}$ – коэффициент дополнительной заработной платы.

Таблица 20 – Расчет полной заработной платы

Исполнители	коэффициент дополнительно заработной платы $k_{\text{доп}}$, руб	Основная заработная плата одного работника $З_{\text{осн}}$, руб.	Дополнительная заработная плата $З_{\text{доп}}$, руб.	Полная заработная плата $З_{\text{п}}$, руб.
Руководитель	0,15	21200	3200	24400
Бакалавр	0,12	40600	4900	45500
Итого:				69900

5.3.3 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

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

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

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

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 фонды составят:

$$З_{\text{внеб}} = 0,302 \cdot 69,9 = 21,1 \text{ тыс.руб}$$

5.3.4 Накладные расходы

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

5.3.5 Формирование сметы затрат технического проекта

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

Определение сметы затрат на технический проект приведен в таблице 20.

Таблица 20 – Смета затрат технического проекта

Наименование разделов	Сумма, тыс. руб	Структура затрат, %
1. Материальные расходы	1,0	0,9
2. Затраты по полной заработной плате исполнителей ТП	69,9	63,9
3. Отчисления во внебюджетные фонды	21,1	19,2
4. Накладные расходы	18,0	16,0
5. Итого	110,0	100,0

В ходе выполнения данного параграфа была рассчитана продолжительность выполнения технического проекта, которая составляет 66 дней для дипломника и 9 дней для научного руководителя. Составлен

календарный график выполнения работ. Смета затрат на разработку технического проекта составляет 110,0 тыс.руб, из которых более половины (63,9%) составляют затраты на оплату труда. Все результаты проекта оказались ожидаемы и могут быть реализованы.

5.4 Определение ресурсоэффективности проекта

Определение ресурсоэффективности проекта можно оценить с помощью интегрального критерия ресурсоэффективности по формуле [6]:

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

где I_{pi} – интегральный показатель ресурсоэффективности;

a_i – весовой коэффициент разработки;

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

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

1) надежный весовой коэффициент достаточно высокий. Надежность электроснабжения обеспечивается дополнительным резервным питанием вентилятора, что позволяет обеспечить бесперебойность в электроснабжении.

2) энергосбережение весовой коэффициент. Энергосбережение достигается за счет оптимального подбора мощности электродвигателей, использование частотно-регулируемого привода.

3) материалоемкость весовой коэффициент не очень большой. При проектировании системы электроснабжения значительную часть общего электропотребления компенсируем за счет энергосберегающей политики.

4) помехоустойчивость весовой коэффициент. Помехоустойчивость достигается за счет классификации всех электроприемников по степени их помехоустойчивости и выбора точки их подключения с учетом

электромагнитной обстановки. Эти меры позволяют снизить помехи электроприемников.

5) удобство в эксплуатации весовой коэффициент не очень высокий, т.к. большие расстояния обслуживания электрических сетей.

6) рост производительности труда пользователя, осуществляется в проекте благодаря повышению уровня автоматизации, что способствует росту производительности труда, но при этом капиталовложения возрастают, поэтому весовой коэффициент не высокий.

Результаты интегрального показателя ресурсоэффективности приведены в таблице 21.

Таблица 21 – Результаты интегрального показателя ресурсоэффективности.

Критерии	Весовой коэффициент	Балльная оценка разработки
1. Надежность	0,25	5
2. Энергосбережение	0,20	4
3. Материалоемкость	0,15	4
4. Помехоустойчивость	0,15	5
5. Удобство в эксплуатации (соответствует требованиям потребителей)	0,15	5
6. Способствует росту производительности труда пользователя	0,10	5
Итого:	1,00	

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности технического проекта составит:

$$I_p = 5 \cdot 0,1 + 5 \cdot 0,15 + 5 \cdot 0,15 + 0,2 \cdot 4 + 0,25 \cdot 5 + 0,15 \cdot 4 = 4,65$$

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

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

- в результате проведения SWOT-анализа были выявлены сильные и слабые стороны выбора технического проекта. Установлено, что технический проект имеет несколько важных преимуществ, обеспечивающих повышение производительности, безопасности 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 (4,65 по 5-балльной шкале), что говорит об эффективности реализации технического проекта.

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
3-5Г4Б2	Енин Андрей Евгеньевич

Школа	Инженерная школа энергетики	Отделение	ЭПЭО
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.	Описание рабочего места инженера-проектировщика электропривода вентилятора главного проветривания шахты. Основное рабочее оборудование - электропривод вентилятора главного проветривания.
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 и опасных факторы проектируемой среды; Разработка мероприятий по снижению воздействия вредных и опасных факторов: – Неудовлетворительный микроклимат; – Повышенный уровень шума на рабочем месте; – Повышенная вибрация; – Повышенное электромагнитное излучение; – Недостаточная освещенность в рабочей зоне; – Электроопасность.
3. Экологическая безопасность:	- Анализ воздействия объекта на литосферу(отходы); - 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 отделения общетехнических дисциплин	Гуляев Милий Всеволодович	доцент, к.т.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
З-5Г4Б2	Енин Андрей Евгеньевич		

6 Социальная ответственность

Областью исследования ВКР является вентилятор главного проветривания шахты. Произведён расчёт и моделирование электропривода вентилятора главного проветривания шахты.

В данном разделе анализируются все вредные и опасные факторы проектируемой производственной среды, а также рассмотрены меры по снижению воздействия опасных и вредных производственных факторов (ОВПФ) на рабочем месте инженера-проектировщика (аудитория 243, 8 корпуса ТПУ).

6.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

6.1.1 Специальные (характерные для проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства

Согласно ТК РФ, N 197 -ФЗ работник аудитории 243, 8 корпуса ТПУ имеет право на:

- рабочее место, соответствующее требованиям охраны труда;
- обязательное социальное страхование от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний в соответствии с федеральным законом;
- отказ от выполнения работ в случае возникновения опасности для его жизни и здоровья вследствие нарушения требований охраны труда, за исключением случаев, предусмотренных федеральными законами, до устранения такой опасности;
- обеспечение средствами индивидуальной и коллективной защиты в соответствии с требованиями охраны труда за счет средств работодателя;

- внеочередной медицинский осмотр в соответствии с медицинскими рекомендациями с сохранением за ним места работы (должности) и среднего заработка во время прохождения указанного медицинского осмотра.

6.1.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны

Рабочее место в аудитории 243, 8 корпуса ТПУ должно соответствовать требованиям ГОСТ 12.2.032-78. Оно должно занимать площадь не менее 4,5 м², высота помещения должна быть не менее 4 м, а объем - не менее 20 м³ на одного человека. Высота над уровнем пола рабочей поверхности, за которой работает оператор, должна составлять 720 мм. Оптимальные размеры поверхности стола 1600 x 1000 кв. мм. Под столом должно иметься пространство для ног с размерами по глубине 650 мм. Рабочий стол должен также иметь подставку для ног, расположенную под углом 15° к поверхности стола. Длина подставки 400 мм, ширина - 350 мм. Удаленность клавиатуры от края стола должна быть не более 300 мм, что обеспечит удобную опору для предплечий. Расстояние между глазами оператора и экраном видеодисплея должно составлять 40 - 80 см. Так же рабочий стол должен быть устойчивым, иметь однотонное неметаллическое покрытие, не обладающее способностью накапливать статическое электричество. Рабочий стул должен иметь дизайн, исключаящий онемение тела из-за нарушения кровообращения при продолжительной работе на рабочем месте.

Рабочее место сотрудника аудитории 243, 8 корпуса ТПУ соответствует требованиям ГОСТ 12.2.032-78.

6.2 Производственная безопасность

С точки зрения социальной ответственности целесообразно проанализировать вредные и опасные факторы, которые могут возникать при расчёте и моделировании электропривода вентилятора, а также требования по организации рабочего места.

6.2.1 Анализ потенциально возможных и опасных факторов, которые могут возникнуть на рабочем месте при проведении исследований

Для выбора факторов использовался ГОСТ 12.0.003-2015 «Опасные и вредные производственные факторы. Классификация». Перечень опасных и вредных факторов, характерных для проектируемой производственной среды представлен в виде таблицы 22:

Таблица 22 - Опасные и вредные факторы при выполнении работ по разработке программного модуля

Источник фактора, наименование вида работ	Факторы (по ГОСТ 12.0.003-2015)		Нормативные документы
	Вредные	Опасные	
1) Расчёт и моделирование электропривода вентилятора главного проветривания шахты 2) Работа с ЭВМ	1. Повышенный уровень электромагнитных полей; 2. Недостаточная освещенность рабочей зоны; 3. Повышенный уровень шума на рабочем месте; 4. Неудовлетворительный микроклимат; 5. Повышенный уровень напряженности электростатического поля.	1. Поражение электрическим током. 2. Пожаровзрывоопасность.	СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03 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

6.2.2 Разработка мероприятий по снижению воздействия вредных и опасных факторов

При расчёте и моделировании электропривода вентилятора главного проветривания шахты в аудитории 243, 8 корпуса ТПУ, основным источником потенциально опасных и вредных производственных факторов (ОВПФ) является ЭВМ, возможность поражения электрическим током. Использование серверного оборудования может привести к наличию таких вредных факторов, как повышенный уровень статического электричества, повышенный уровень электромагнитных полей, повышенная напряженность электрического поля.

Микроклимат

Для создания и автоматического поддержания в аудитории 243, 8 корпуса ТПУ независимо от наружных условий оптимальных значений температуры, влажности, чистоты и скорости движения воздуха, в холодное время года используется водяное отопление, в теплое время года применяется кондиционирование воздуха. Кондиционер представляет собой вентиляционную установку, которая с помощью приборов автоматического регулирования поддерживает в помещении заданные параметры воздушной среды.

Аудитория 243, 8 корпуса ТПУ является помещением I б категории. Допустимые величины интенсивности теплового облучения работающих на рабочих местах от производственных источников, нагретых до темного свечения (материалов, изделий и др.)

Таблица 23 - Оптимальные величины показателей микроклимата на рабочих местах производственных помещений

Период года	Катег. работ по уровню энергозатрат	Температура воздуха, °С	Температура поверхностей, °С	Относ. влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный	Iб	21-23	20-24	40-60	0,1

Теплый	Iб	22-24	21-25	40-60	0,1
--------	----	-------	-------	-------	-----

Таблица 24 - Допустимые величины интенсивности теплового облучения

Облучаемая поверхность тела, %	Интенсивность теплового облучения, Вт/м ² , не более
50 и более	35
25-50	70
не более 25	100

В аудитории проводится ежедневная влажная уборка и систематическое проветривание после каждого часа работы на ЭВМ.

Микроклимат аудитории 243, 8 корпуса ТПУ соответствует допустимым нормам[28].

Шум и вибрация на рабочем месте.

Шумы оказывают на организм человека такие действия как: снижение остроты слуха; повышение кровяного давления; нарушение ритма сердечной деятельности; ухудшение памяти; снижение производительности труда.

Шумы на рабочих местах нормируются по ГОСТ 12.1.003-2014 ССБТ. Допустимые уровни звукового давления и эквивалентного уровня звука представлены в таблице 25.

Таблица 25 - Допустимые уровни звукового давления и эквивалентного уровня звука

Рабочие места	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц									Уровни звука и эквивалентные уровни звука, дБА
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Конструкторские бюро, программисты, лаборатории	86	71	61	54	49	45	42	40	38	50

Для уменьшения шума и вибраций в помещениях вычислительных центров оборудование и приборы необходимо устанавливать на специальные фундаменты и амортизирующие прокладки, описанные в нормативных документах. Снизить уровень шума в помещениях с ПК можно также

использованием звукопоглощающих материалов с максимальными коэффициентами звукопоглощения в области частот 63 - 8000 Гц для отделки помещений (разрешенных органами и учреждениями Госсанэпиднадзора), подтвержденных специальными акустическими расчетами. По характеру спектра в помещении присутствуют широкополосные шумы. Источник шумов – электродвигатели в системе охлаждения и вентиляции машин.

Допустимый уровень шумов для помещений компьютерных залов 50 Дб. Защита от шумов – заключение вентиляторов в защитный кожух и установление их внутри корпуса ЭВМ.

Вибрация оборудования на рабочих местах не должна превышать допустимых величин, установленных ГОСТ 12.1.012-2004. Допустимый уровень звукового давления, звука и эквивалентные уровни звука на рабочих местах должны отвечать требованиям ГОСТ 12.1.003-2014 ССБТ.

Уровень шума в аудитории 243, 8 корпуса ТПУ не более 80 дБА и соответствует нормам[28].

Освещение в рабочей зоне.

В аудитории 243, 8 корпуса ТПУ имеется естественное (боковое двухстороннее) и искусственное освещение. Рабочие столы размещены таким образом, чтобы видеодисплейные терминалы были ориентированы боковой стороной к световым проемам, чтобы естественный свет падал преимущественно слева.

Нормирование освещенности производится в соответствии со СП 52.13330.2016. В соответствии с задачами зрительной работы компьютерная лаборатория относится к первой группе, т. е. помещение, в котором производится различение объектов зрительной работы при фиксированном направлении линии зрения. Нормированное значение освещённости рабочей поверхности для данной группы помещений составляет 300 лк.

Требования к освещению ряда производственных помещений представлены в таблице 26.

Таблица 26 - Нормируемые параметры естественного и искусственного освещения

Помещения	Рабочая поверхность и плоскость нормирования КЕО и освещенности (Г – горизонтальная, В - вертикальная) и высота плоскости над полом, м	Естественное освещение		Совмещенное освещение		Искусственное освещение		
		КЕО e_n , %		КЕО e_n , %		Освещенность, лк		
		при верхнем или комбинированном освещении	при боковом освещении	при верхнем или комбинированном освещении	при боковом освещении	при комбинированном освещении		при общем освещении
						всего	от общего	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Помещения для работы с дисплеями и видеотерминалами, залы ЭВМ	Г-0,8 Экран монитора: В-1,2	3,5 -	1,2 -	2,1 -	0,7 -	500 -	300 -	400 200

Для обеспечения требуемого освещения произведем расчет искусственной освещенности. Искусственное освещение устраивается во всех основных и вспомогательных помещениях производственных зданий в соответствии со СП 52.13330.2016.

Согласно санитарно-гигиеническим требованиям рабочее место инженера-проектировщика должно освещаться естественным и искусственным освещением. По нормам освещенности, СП 52.13330.2016 и отраслевым нормам освещенности в лабораториях при работе с экраном дисплея и в сочетании с работой над документами над документами рекомендуется освещенность 300 лк при общем освещении. В аудитории 243, 8 корпуса, в случаях работы с документами, следует применять системы комбинированного освещения (к общему освещению дополнительно устанавливаются светильники местного освещения, предназначенные для освещения зоны расположения документов).

Освещение в аудитории 243 8 корпуса ТПУ соответствует допустимым нормам[28].

Электромагнитное излучение.

ЭМП обладает способностью биологического, специфического и теплового воздействия на организм человека, что может повлечь следующие последствия: биохимические изменения в клетках и тканях; нарушения условно-рефлекторной деятельности, снижение биоэлектрической активности мозга, изменения межнейронных связей, отклонения в эндокринной системе; вследствие перехода ЭМП в тепловую энергию может наблюдаться повышение температуры тела, локальный избирательный нагрев тканей и др.

Допустимые уровни электромагнитных полей (ЭМП) в аудитории 243, 8 корпуса ТПУ, создаваемых ЭВМ, не должны превышать значений, представленных в таблице 27:

Наименование параметров	Диапазон	ДУ ЭМП
Напряженность электрического поля	в диапазоне частот 5 Гц - 2 кГц	25 В/м
	в диапазоне частот 2 кГц - 400 кГц	2,5 В/м
Плотность магнитного потока	в диапазоне частот 5 Гц - 2 кГц	250 нТл
	в диапазоне частот 2 кГц - 400 кГц	25 нТл
Напряженность электростатического поля		15 кВ/м

Уровни ЭМП, ЭСП в аудитории 243, 8 корпуса ТПУ, перечисленные в таблице соответствуют нормам[28].

Электробезопасность

Техника безопасности – это система организационных мероприятий и технических средств, предотвращающих или уменьшающих воздействие на работающих опасных производственных факторов, предусматривающая обеспечение безопасности производственного оборудования и производственных процессов, внедрение новых машин, механизмов, инструмента, сконструированных с соблюдением всех требований охраны

труда; установление блокирующих устройств, применение средств коллективной и индивидуальной защиты.

Для предотвращения поражения электрическим током, где размещаются рабочее место с ЭВМ в аудитории 243, 8 корпуса ТПУ, оборудование должно быть оснащено защитным заземлением, занулением в соответствии с техническими требованиями по эксплуатации. Для предупреждения электротравматизма необходимо проводить соответствующие организационные и технические мероприятия:

- 1) оформление работы нарядом или устным распоряжением;
- 2) проведение инструктажей и допуск к работе;
- 3) надзор во время работы. Уровень напряжения для питания ЭВМ в данной аудитории 220 В, для серверного оборудования 380 В.

По опасности поражения электрическим током помещение 243, 8 корпуса ТПУ относится к первому классу – помещения без повышенной опасности (сухое, хорошо отапливаемое, помещение с токонепроводящими полами, с температурой 18-20°, с влажностью 40-50%).

Офисное помещение, где была разработана ВКР, принадлежит к категории помещений без повышенной опасности по степени вероятности поражения электрическим током, вследствие этого к оборудованию предъявляются следующие требования:

- Экран видеомонитора должен находиться на расстоянии не менее 50 см от пользователя (расстояния от источника);
- Применение приэкранных фильтров, специальных экранов.
- Защитное заземление – это преднамеренное электрическое соединение с землей или ее эквивалентом металлических нетоковедущих частей, которые могут оказаться под напряжением.

Причины поражения человека электрическим током:

- непосредственное прикосновение к токоведущим частям;

- прикосновение к нетоковедущим частям, оказавшимся под напряжением;
- соприкосновение с полом, стенами и конструктивными деталями помещений, оказавшихся под напряжением;
- поражение через электрическую дугу при приближении к открытым токоведущим частям.

Основными техническими средствами защиты, согласно ПУЭ, являются защитное заземление, автоматическое отключение питания, устройства защитного отключения, изолирующие электрозащитные средства, знаки и плакаты безопасности. Наличие таких средств защиты предусмотрено в рабочей зоне.

6.3 Экологическая безопасность

В данном подразделе рассматривается характер воздействия проектируемого решения на окружающую среду. Выявляются предполагаемые источники загрязнения окружающей среды, возникающие в результате реализации предлагаемых в ВКР решений.

6.3.1 Анализ влияния объекта исследования на окружающую среду

Мероприятия по экологической безопасности регламентируются ГОСТ 17.1.3.13-86. «Охрана природы. Гидросфера. Общие требования к охране поверхностных вод от загрязнений», СанПиН 2.2.1/2.1.1.1200-03. «Санитарно-защитные зоны и санитарная классификация предприятий, сооружений и иных объектов», ГН 2.2.5.2308-07. «Ориентировочно безопасный уровень воздействия (ОБУВ) вредных веществ в воздухе рабочей зоны».

В настоящее время используются компьютеры, потребляющие сравнительно небольшое количество электроэнергии; вероятность электропоражения сравнительно невелика, поскольку современные ПЭВМ максимально приспособлены к безопасной работе. При работе с ПЭВМ и

ВДТ возникает электромагнитное поле и рентгеновское излучение. Доза облучения при работе с компьютером составляет 100 мкР/час, при этом доза облучения увеличивается с уменьшением расстояния до экрана. В целом, доза облучения, создаваемая монитором, невелика по сравнению с естественным фоном рентгеновского облучения, что достигается применением средств коллективной защиты. Работа компьютера сопровождается шумом, однако его уровень в пределах нормы и не оказывает значительного воздействия на окружающую среду. Для безопасной работы с ПЭВМ и ВДТ сам пользователь должен соблюдать требования: эргономики, пожарной и электрической безопасности.

6.3.2 Анализ влияния процесса исследования на окружающую среду

В представленной ВКР воздействие на окружающую среду может оказать лишь неправильная утилизация используемого оборудования – компьютер и люминесцентные лампы.

6.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях.

6.4.1 Анализ вероятных ЧС, которые может инициировать объект исследований и обоснование мероприятий по предотвращению ЧС

Мероприятия по безопасности и защите населения и территорий регламентируются ГОСТ Р 22.0.07-95 «Безопасность в ЧС. Источники техногенных ЧС. Классификация и номенклатура поражающих факторов и их параметров», ФЗ от 21.12.1994 г. № 68-ФЗ «О защите населения и территорий от ЧС природного и техногенного характера»,

ГОСТ Р22.3.03-94. «Безопасность в ЧС. Защита населения. Основные положения».

Причинами аварий и катастроф могут являться стихийные бедствия, нарушения режимов технологических процессов (несоблюдение технологической дисциплины) либо правил эксплуатации производственного, энергетического, транспортного и др. оборудования, а также правил техники безопасности. Инженер-проектировщик находится в офисном помещении, где может возникнуть пожар.

С точки зрения выполнения проекта характерны следующие виды ЧС:

1. Пожары, взрывы;
2. Внезапное обрушение зданий, сооружений;
3. Геофизические опасные явления (землетрясения);
4. Метеорологические и агрометеорологические опасные явления.

6.4.2 Анализ вероятных ЧС, которые могут возникнуть при проведении исследований и обоснование мероприятий по предотвращению ЧС

При проведении исследований наиболее вероятной ЧС является возникновение пожара в помещении 243, 8 корпуса ТПУ. Пожарная безопасность должна обеспечиваться системами предотвращения пожара и противопожарной защиты, в том числе организационно-техническими мероприятиями.

Основные источники возникновения пожара:

1. Неработоспособное электрооборудование, неисправности в проводке, розетках и выключателях. Для исключения возникновения пожара по этим причинам необходимо вовремя выявлять и устранять неполадки, а также проводить плановый осмотр электрооборудования.

2. Электрические приборы с дефектами. Профилактика пожара включает в себя своевременный и качественный ремонт электроприборов.

3. Перегрузка в электроэнергетической системе (ЭЭС) и короткое замыкание в электроустановке.

Под пожарной профилактикой понимается обучение пожарной технике безопасности и комплекс мероприятий, направленных на предупреждение пожаров.

Пожарная безопасность обеспечивается комплексом мероприятий:

- обучение, в т.ч. распространение знаний о пожаробезопасном поведении (о необходимости установки домашних индикаторов задымленности и хранения зажигалок и спичек в местах, недоступных детям);

- пожарный надзор, предусматривающий разработку государственных норм пожарной безопасности и строительных норм, а также проверку их выполнения;

- обеспечение оборудованием и технические разработки (установка переносных огнетушителей и изготовление зажигалок безопасного пользования).

В соответствии с ТР «О требованиях пожарной безопасности» для административного жилого здания требуется устройство внутреннего противопожарного водопровода.

Согласно ФЗ-123, НПБ 104-03 «Проектирование систем оповещения людей о пожаре в зданиях и сооружениях» для оповещения о возникновении пожара в каждом помещении должны быть установлены дымовые оптико-электронные автономные пожарные извещатели, а оповещение о пожаре должно осуществляться подачей звуковых и световых сигналов во все помещения с постоянным или временным пребыванием людей.

Аудитория 243, 8 корпуса ТПУ оснащена первичными средствами пожаротушения: огнетушителями ОУ-3 1шт., ОП-3, 1шт. (предназначены для

тушения любых материалов, предметов и веществ, применяется для тушения ПК и оргтехники, класс пожаров А, Е.).

Таблица 28 – Типы используемых огнетушителей при пожаре в электроустановках

Напряжение, кВ	Тип огнетушителя (марка)
До 1,0	порошковый (серии ОП)
До 10,0	углекислотный (серии ОУ)

Согласно НПБ 105-03 помещение, предназначенное для проектирования и использования результатов проекта, относится к типу П-2а.

Таблица 29 - Категории помещений по пожарной опасности

Категория помещения	Характеристика веществ и материалов, находящихся (обращающихся) в помещении
П-2а	Зоны, расположенные в помещениях, в которых обращаются твердые горючие вещества в количестве, при котором удельная пожарная нагрузка составляет не менее 1 мегаджоуля на квадратный метр.

В корпусе 8 ТПУ имеется пожарная автоматика, сигнализация. В случае возникновения загорания необходимо обесточить электрооборудование, отключить систему вентиляции, принять меры тушения (на начальной стадии) и обеспечить срочную эвакуацию студентов и сотрудников в соответствии с планом эвакуации.



Рисунок 39 - План эвакуации людей на случай пожара.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения диссертационной работы и проведенных теоретических и компьютерных исследований получены следующие результаты:

1. Выделены требования к технологическому процессу вентиляции горных шахт и, в частности, к электроприводам вентиляторных установок главного проветривания. В ходе определения и рассмотрения основных режимов работы шахтного вентилятора установлено, что наиболее подходящим электроприводом является асинхронный частотно-регулируемый ЭП.

2. Произведен выбор вентилятора и приводного асинхронного электродвигателя. Расчет параметры схемы замещения АД, проведено моделирования работы двигателя при питании от сети. Установлена зависимость между окружающими атмосферными условиями и параметрами двигателя. Определено, что методика нахождения параметров схемы замещения асинхронного двигателя по его каталожным данным является верной.

3. Рассмотрены уравнения и соответствующие им структурные схемы для математического описания асинхронного электропривода. Осуществлен синтез параметров системы управления асинхронным ЭП вентилятора, проведен анализ работы системы управления. Произведена настройка и оптимизация контуров регулирования. Используемый способ настройки позволил уменьшить взаимное влияние перекрёстных контуров управления потокосцеплением ротора и скорости.

4. Разработана имитационная модель линеаризованной системы автоматизированного управления электропривода шахтного вентилятора главного проветривания. С помощью метода имитационного моделирования произведена проверка функционирования разработанной системы векторного управления асинхронным ЭП вентилятора. Система автоматического регулирования с векторным управлением позволяет обеспечить необходимое значение скорости вентилятора в различных режимах работы.

5. Исследована нелинейная система автоматического управления электропривода шахтного вентилятора главного проветривания. Полученные результаты имитационных исследований доказывают, что частотно-регулируемый асинхронный электропривод вентилятора с векторным управлением позволяет обеспечить требуемый диапазон регулирования скорости вентилятора. Переходные процессы в электроприводе протекают плавно с ограничением динамического момента, токов двигателя и преобразователя.

6. В результате выполнения поставленных задач в разделе «Финансовый менеджмент», можно сделать следующие выводы:

- в результате проведения SWOT-анализа были выявлены сильные и слабые стороны выбора технического проекта. Установлено, что технический проект имеет несколько важных преимуществ, обеспечивающих повышение производительности, безопасности 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 (4,65 по 5-балльной шкале), что говорит об эффективности реализации технического проекта.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Документация по обслуживанию электропривода лебедки буровой установки БУ 2900/200 ЭПК-БМ
2. Комплектные тиристорные электроприводы: Справочник/ И.Х.Евзеров и др.; под ред. В.М.Перельмутора. - М.: Энергоатомиздат, 1988. - 319с.
3. Тарабин Б.В., Лунин Л.Ф., Смирнов Ю.Н. Интегральные микросхемы: Справочник. - М.: Энергоиздат, 1985. - 528 с.
4. Удуг Л.С., Мальцева О.П., Кояин Н.В. Проектирование и исследование автоматизированных электроприводов. Часть 1. - Введение в технику регулирования линейных систем. Часть 2. - Оптимизация контура регулирования. - Томск: Изд.ТПУ,2000.-144с.
5. Броун С.И., Хоботько В.И. Программированное руководство по безопасному ведению буровых работ. - М.: Недра, 1978.
6. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение, И.Г. Видяев, Г.Н. Серикова, Н.А. Гаврикова, Издательство Томского политехнического университета 2014, 36 стр.
7. Правила безопасности в нефтегазодобывающей промышленности. Изд.2. - М.: Недра, 1975.

8. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей (ПТЭ) и Правила техники безопасности при эксплуатации электроустановок потребителей (ПТБ). - М.: Атомиздат, 1972.
9. Техника безопасности в нефтяной промышленности. - Труды ВНИИТБ, вып. XIX - XXVII, 1970 - 1977.
10. Система стандартов безопасности труда. Сборники ГОСТов. 4 тома. - М.: издательство стандартов, 1971.
11. Охрана труда в машиностроении. Под редакцией Е.Я. Юдина. - М.: Машиностроение, 1983.
12. Противопожарные требования. Основные положения проектирования СнИП /П-А.5-70.-М.:1971.
13. Методическое пособие для расчета вибрации. - Т.: ТПУ Д989.
14. Панов Г. Е., Броун С. И. Охрана окружающей среды в нефтегазодобывающей промышленности. - М.: ВНИИОЭНГ, 1988.
15. Удут Л.С., Кояин Н.В., Мальцева О.П, Проектирование и исследование автоматизированных электроприводов. Ч.3. Электрические машины постоянного тока в системах автоматизированного электропривода: Учебное пособие. Томск: Изд-во ТПУ, 2004. – 152 с.
16. Удут Л.С., Кояин Н.В., Мальцева О.П, Проектирование и исследование автоматизированных электроприводов. Ч.4. Тиристорные преобразователи для электроприводов постоянного тока: Учебное пособие. Томск: Изд-во ТПУ, 2003. – 152 с.
17. Удут Л.С., Кояин Н.В., Мальцева О.П, Проектирование и исследование автоматизированных электроприводов. Ч.5. Применение программы DORA-FUZZY для имитационного моделирования автоматизированных электроприводов: Учебное пособие. Томск: Изд-во ТПУ, 2003. – 144 с.
18. Удут Л.С., Кояин Н.В., Мальцева О.П, Проектирование и исследование автоматизированных электроприводов. Ч.6. Механическая

система электроприводов постоянного тока: Учебное пособие. Томск: Изд-во ТПУ, 2003. – 144 с.

19. Справочник по автоматизированному электроприводу/ Под ред. В.А.Елисеева и А.В.Шинянского.- М.: Энергоатомиздат, 1983. – 616 с.

20. Справочник по проектированию автоматизированного электропривода и систем управления технологическими процессами/ Под ред. В.И. Круповича, Ю.Г. Барыбина, М.Л. Самовера – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 416 с.

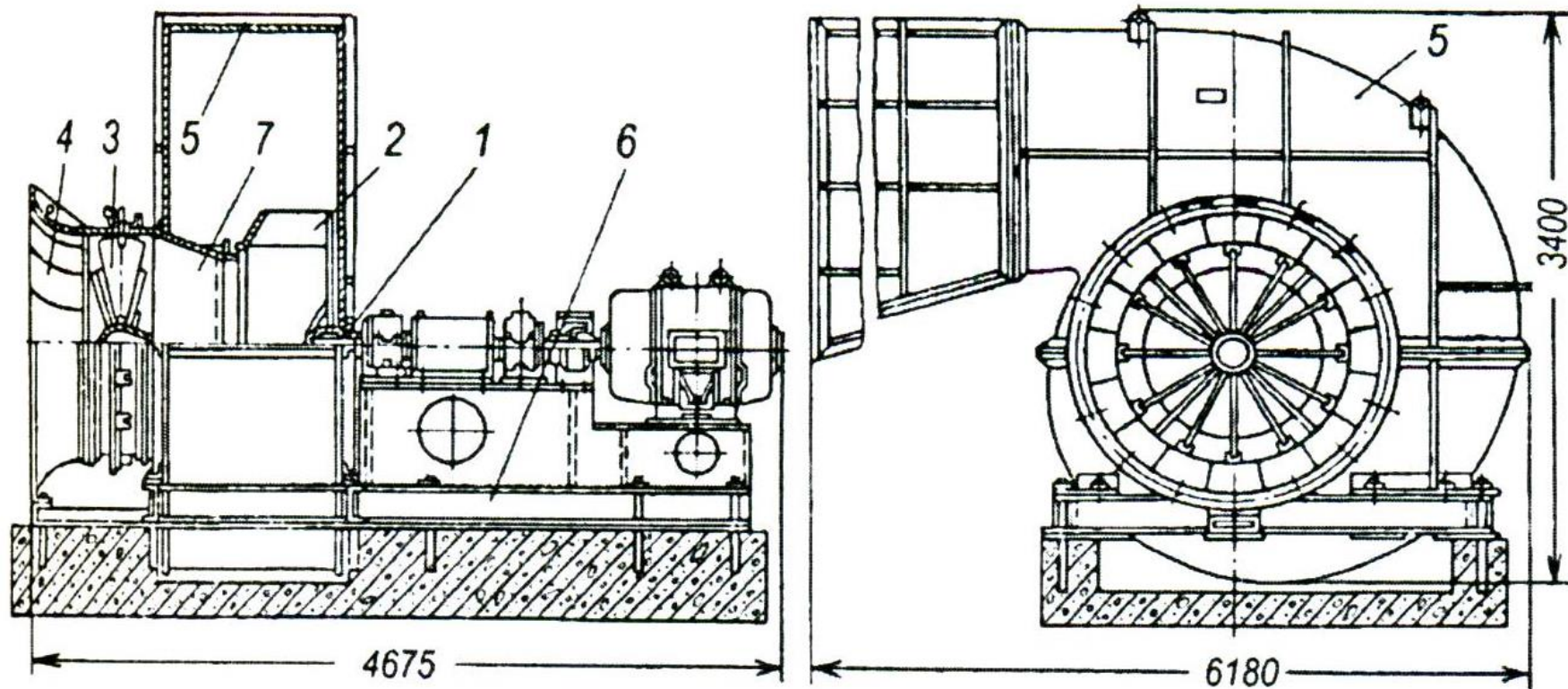
21.Правила устройства электроустановок. – М.: Энергоатомиздат, 1986, 648 с.

22. СНиП 23-05-95. Естественное и искусственное освещение. – М.: Стройиздат, 1996.

23. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1200-03. Санитарно-защитные зоны и санитарная классификация предприятий, сооружений и иных объектов. М.: Госкомсанэпиднадзор, 2003.

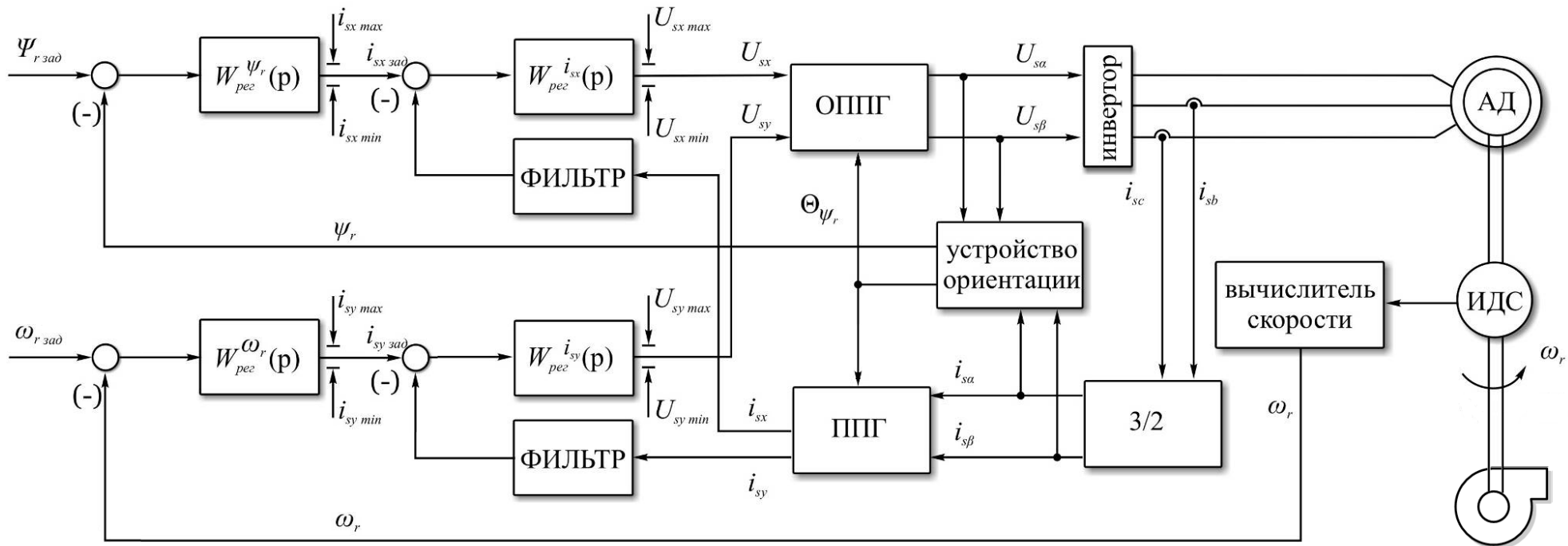
Приложение А
Графический материал.

Общий вид вентилятора

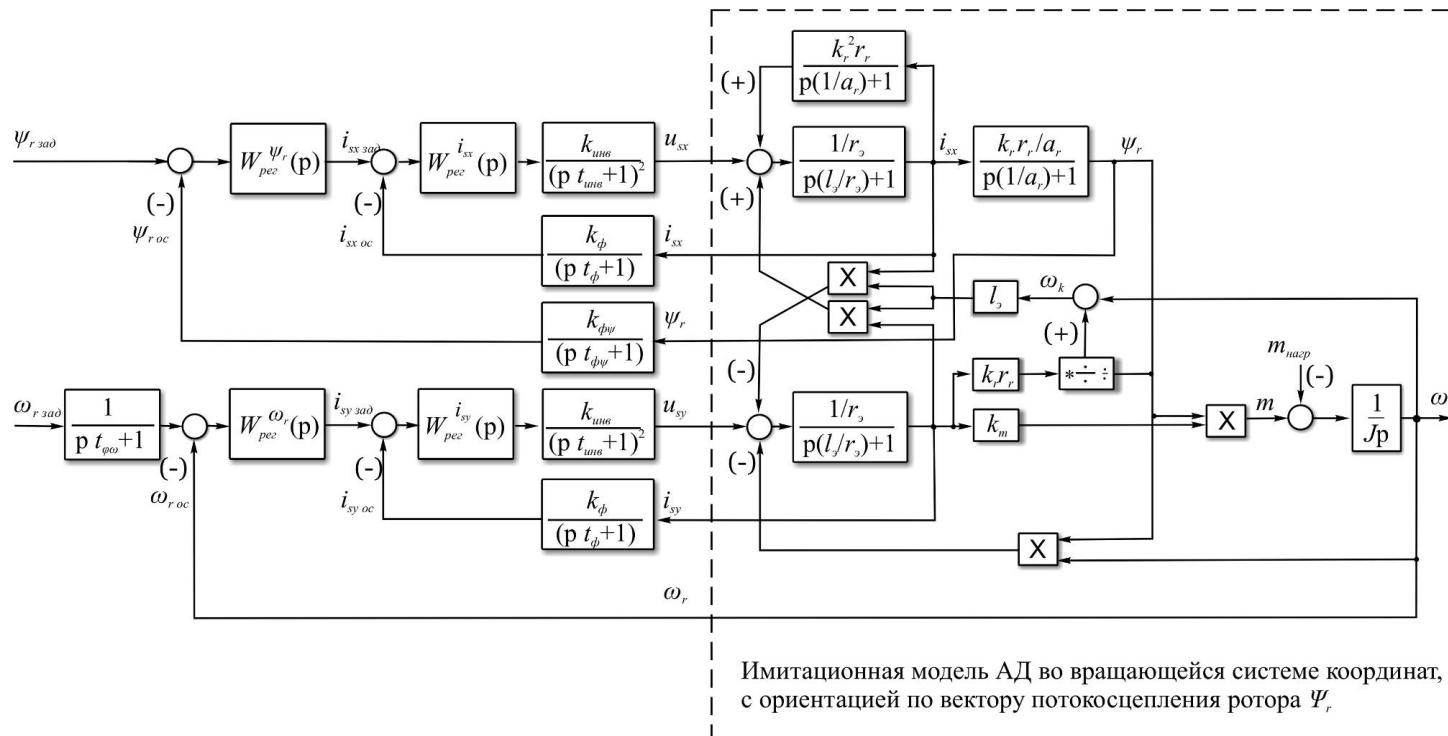


Функциональная схема системы векторного управления

асинхронным ЭП вентилятора



Структурная схема линейризованного асинхронного ЭП с векторным управлением на основе модели АД во вращающейся системе координат с ориентацией по вектору потокосцепления ротора



Внешний вид имитационной модели АД во вращающейся координатной системе в программной среде Matlab-Simulink

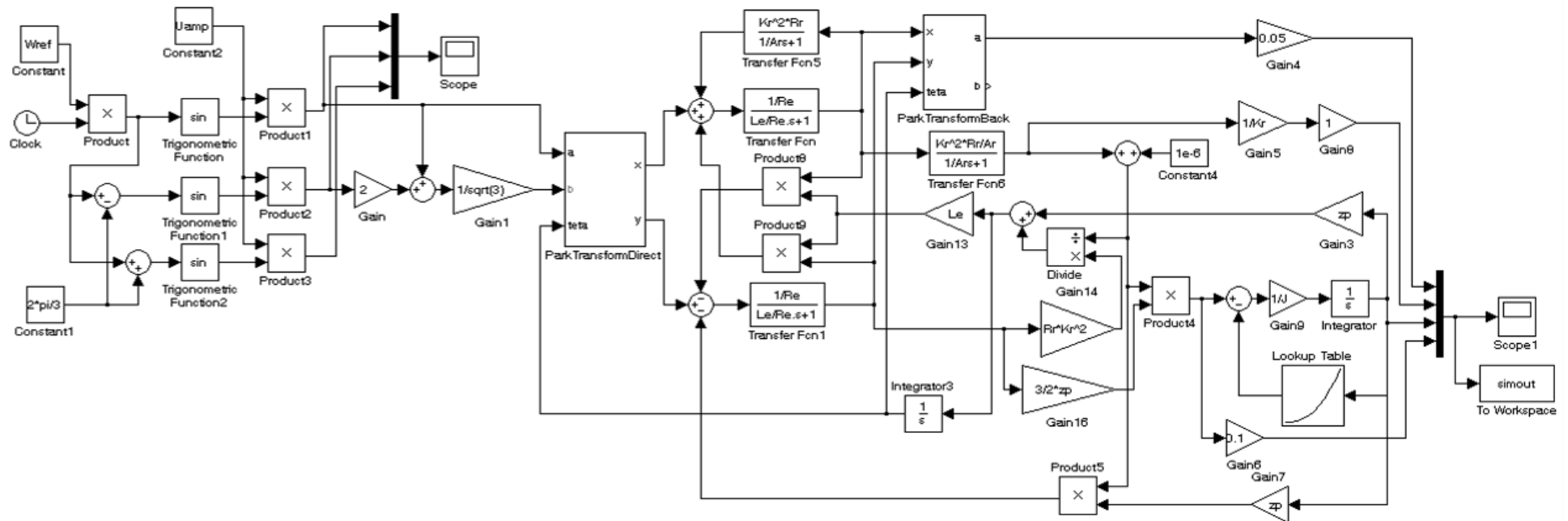
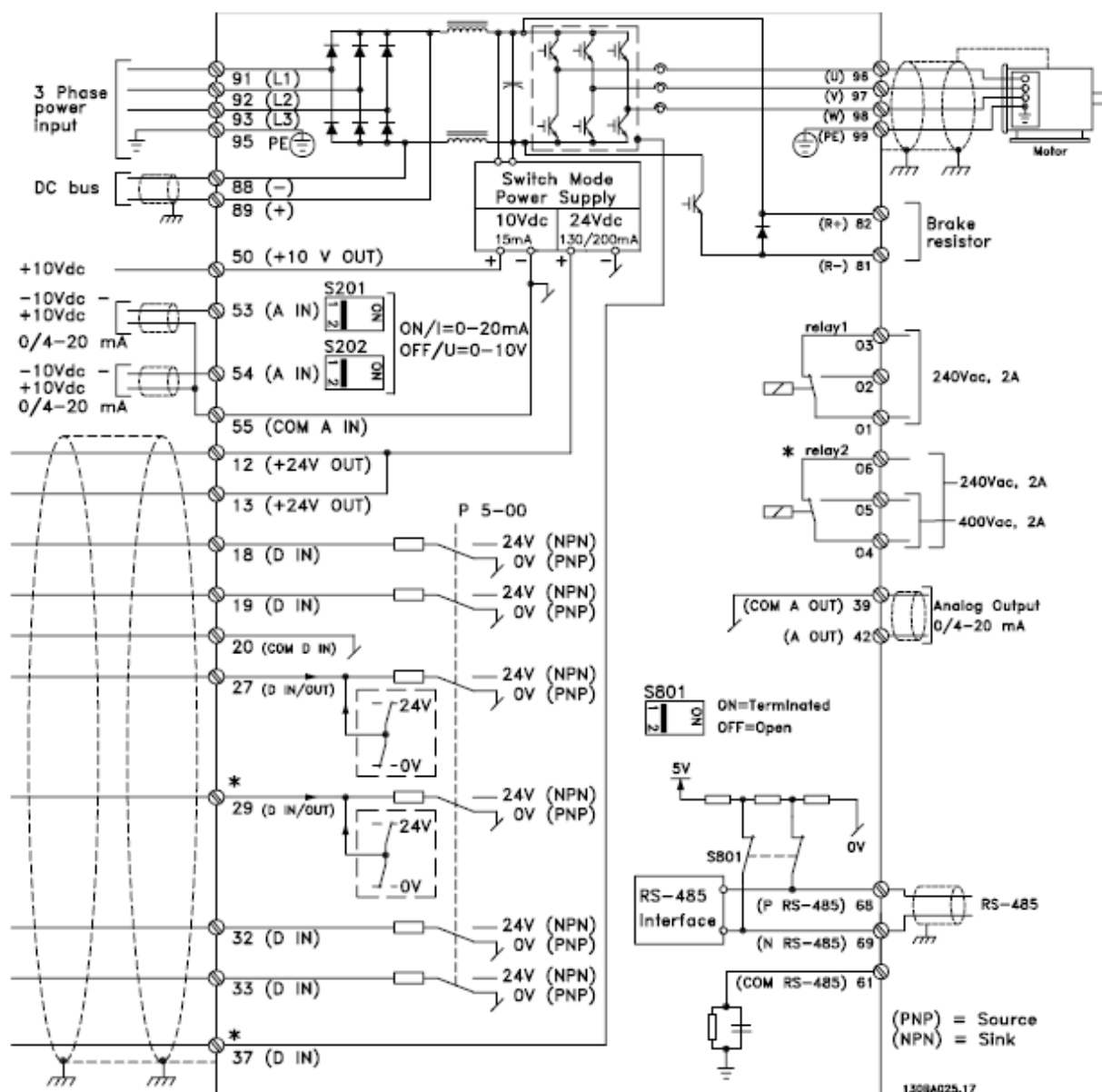
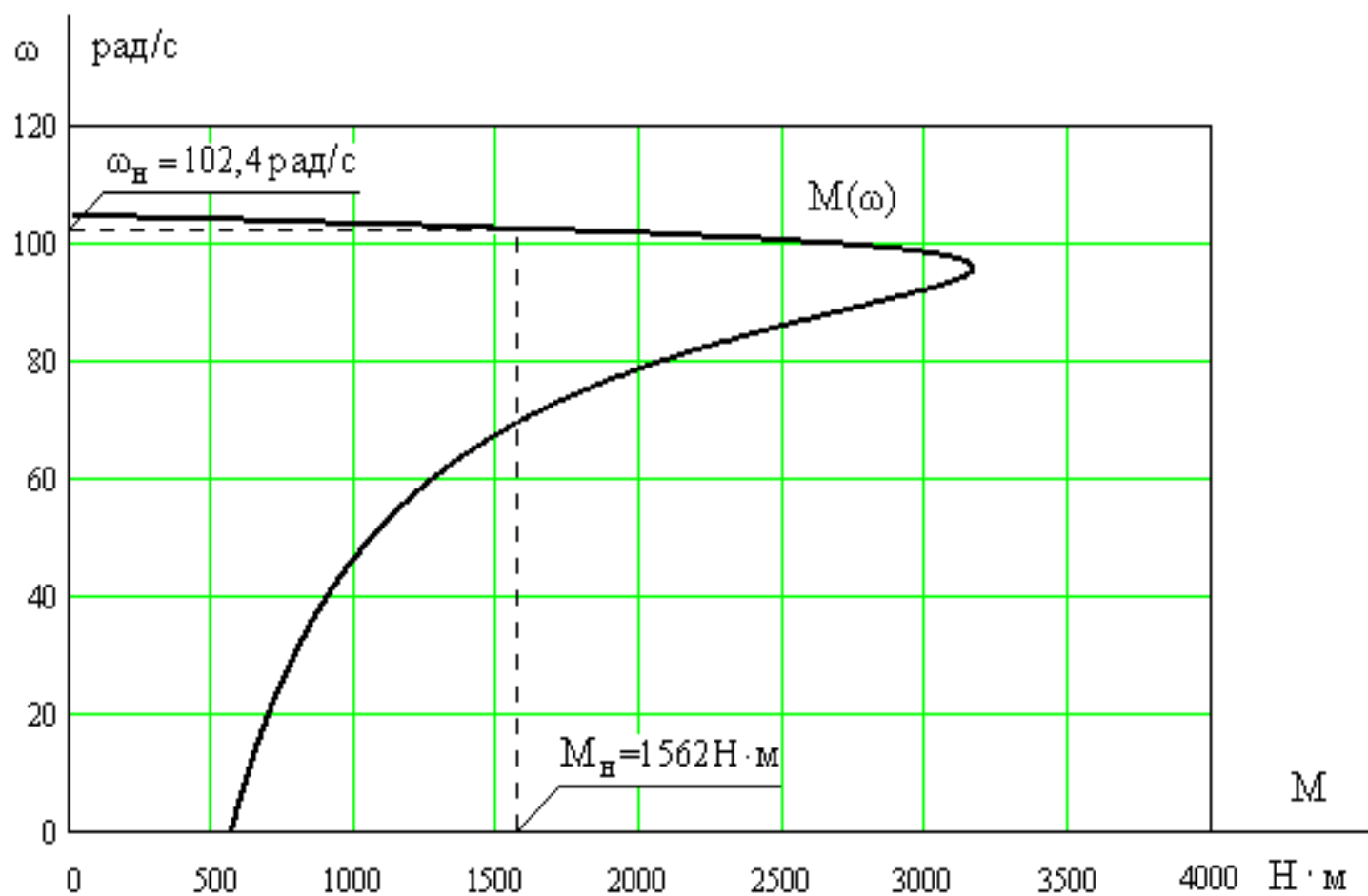


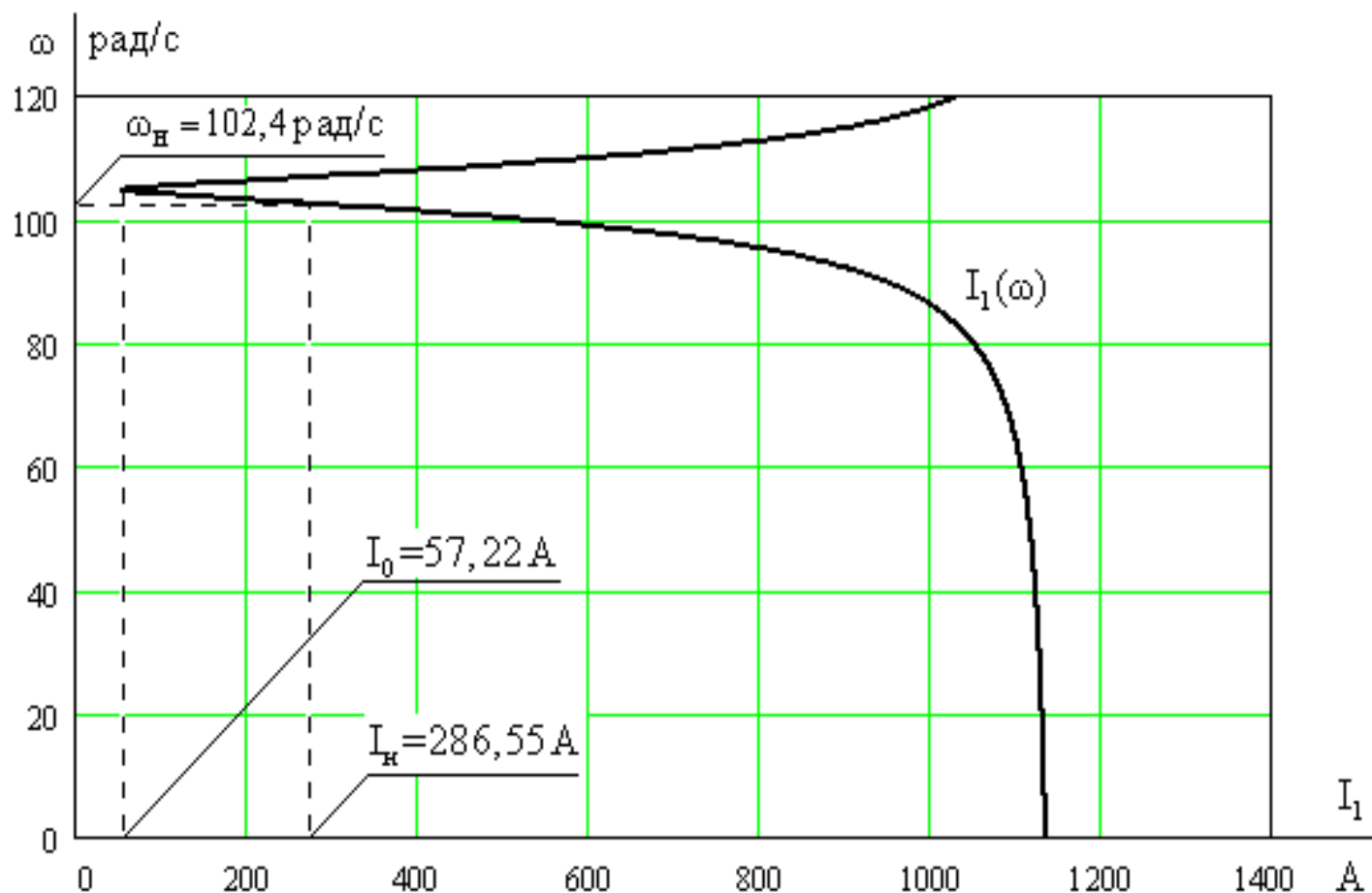
Схема электрических соединений преобразователя частоты Danfoss VLT Aqua Drive FC-202



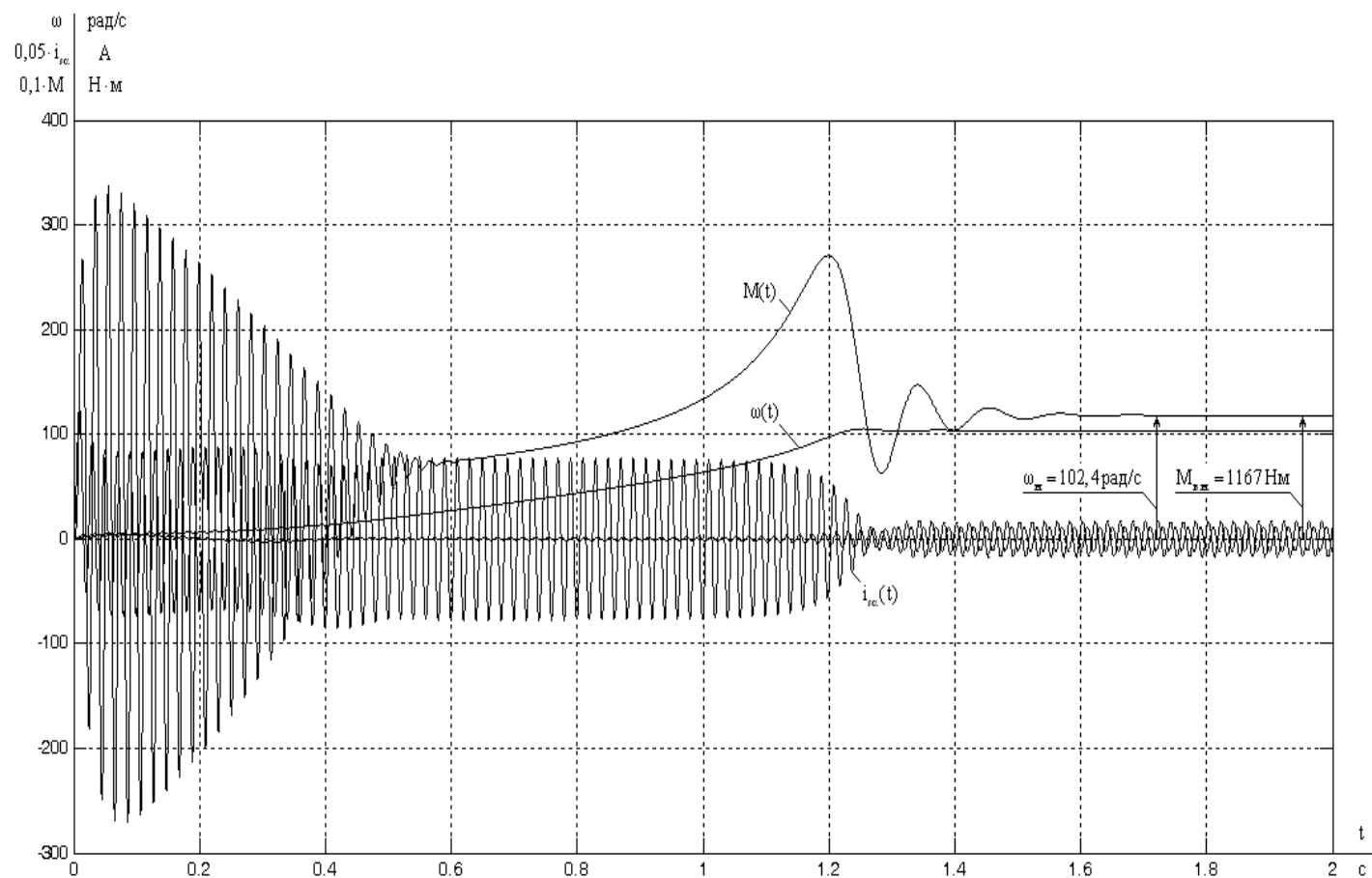
Механическая характеристика двигателя АИР355S6



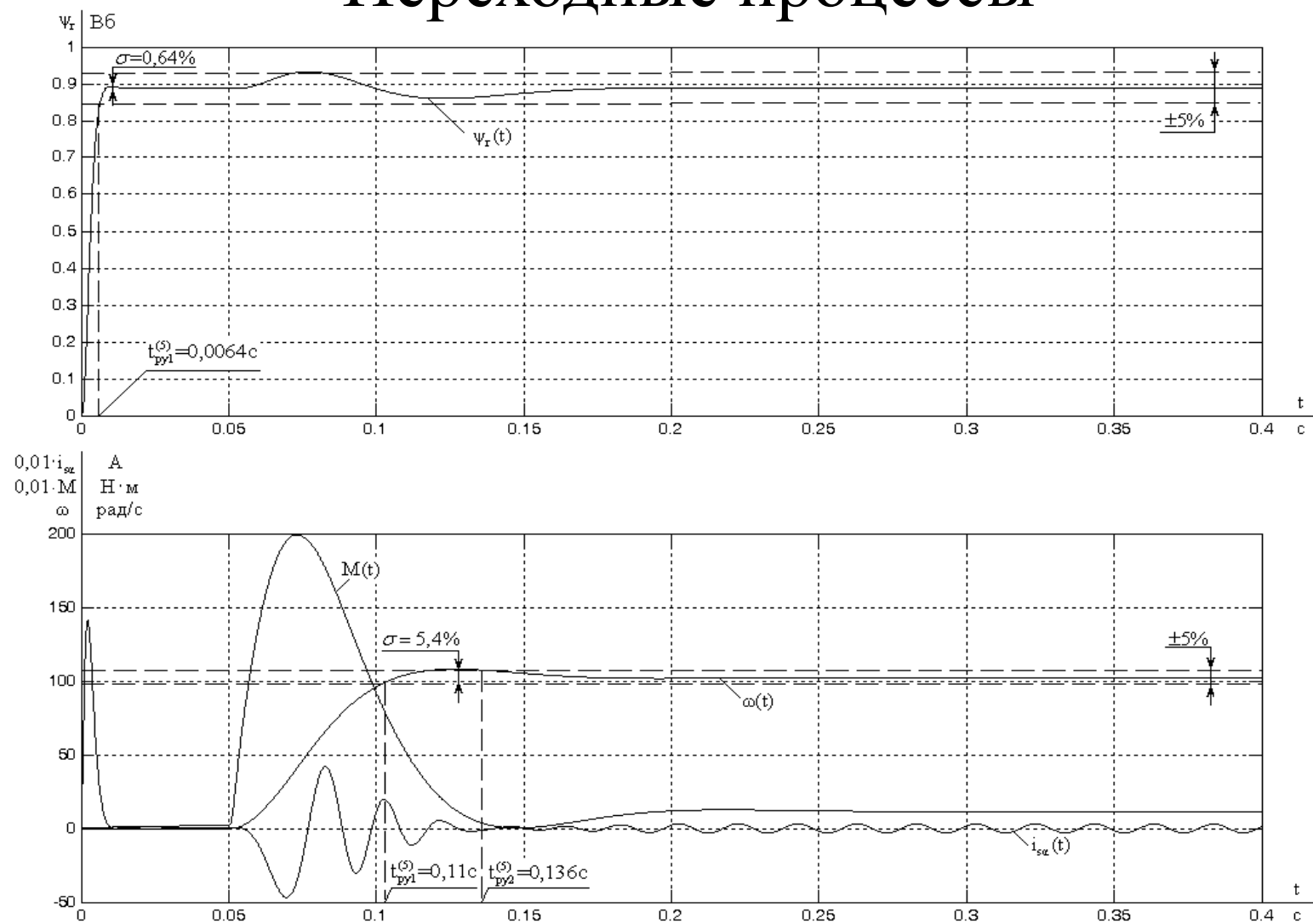
Электромеханическая характеристика двигателя АИР355S6



Графики переходных процессов при пуске АД прямым включением в сеть



Переходные процессы



Процесс пуска на минимальную и разгон до максимальной с применением линейного задатчика интенсивности на ВХОДЕ

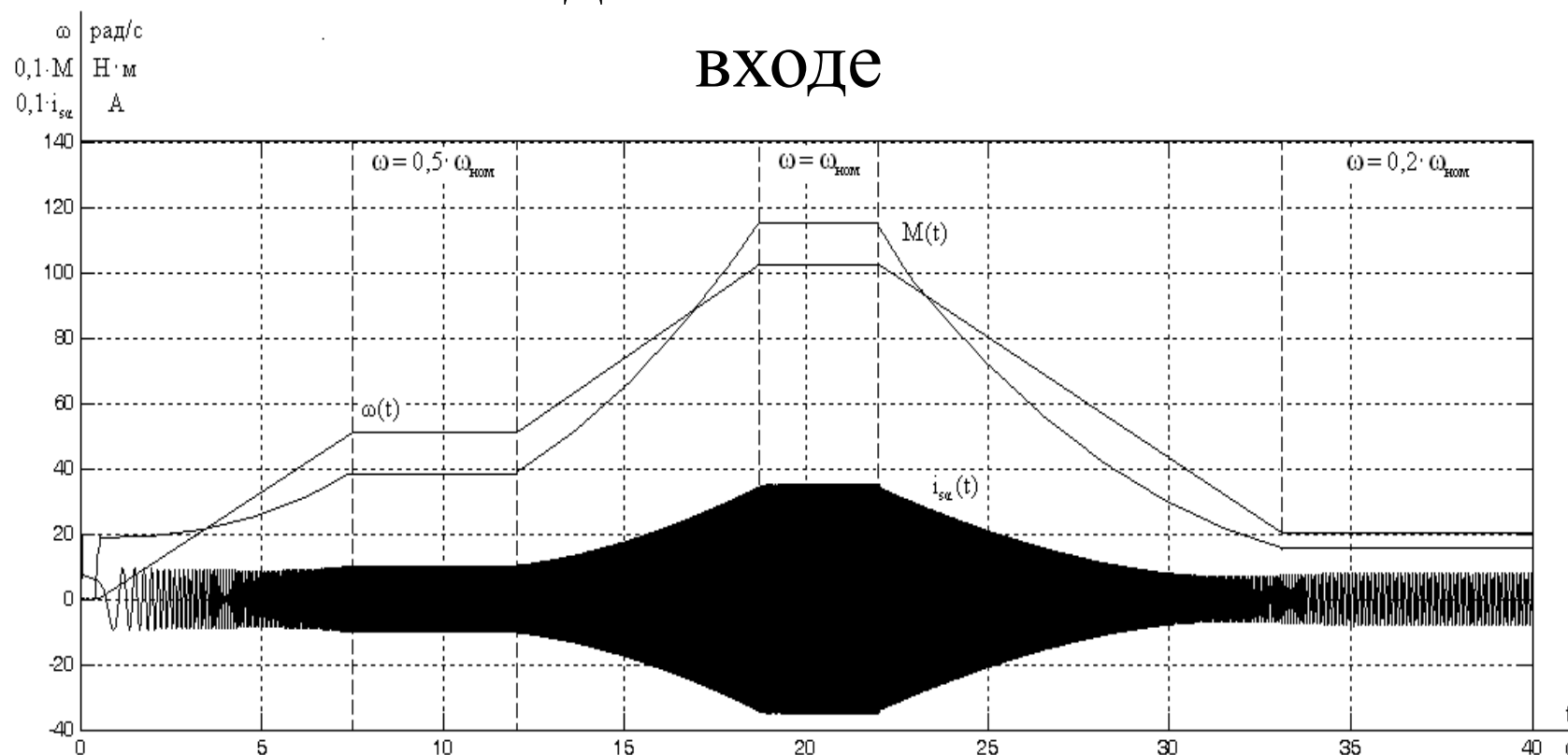
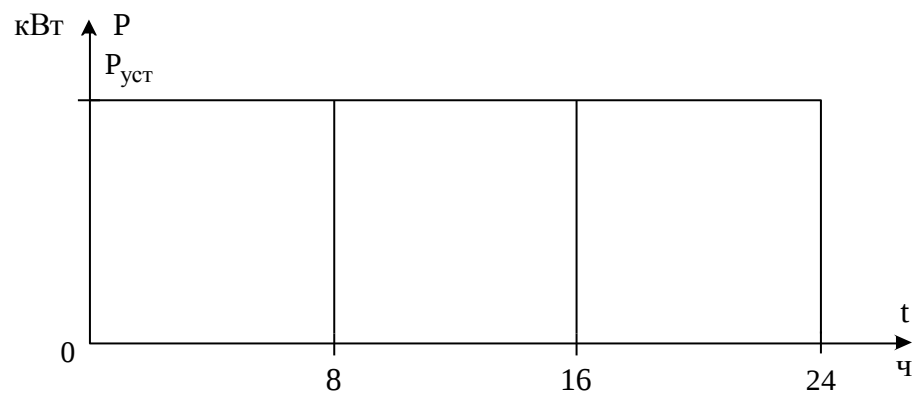
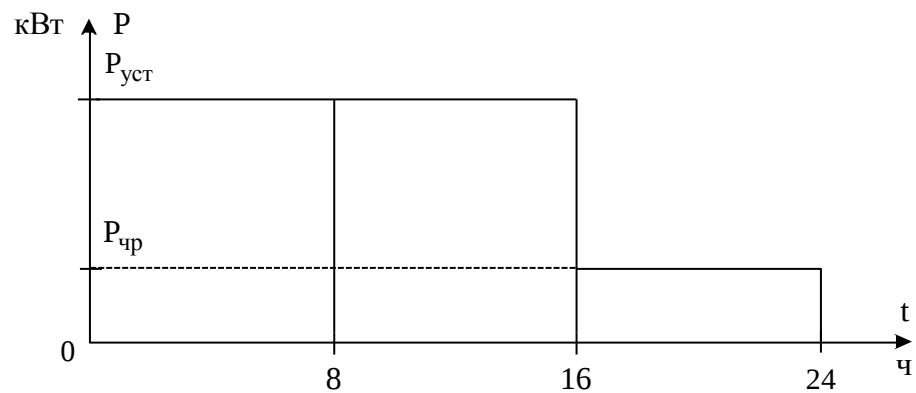


График энергопотребления вентиляторной установки при дросселировании (а) и частотном регулировании (б)



(а)



(б)