

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Инженерная школа энергетики
Направление подготовки – 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника
Отделение электроэнергетики и электротехники
Профиль – Энергосберегающие режимы работы электрических источников питания, комплексов и систем

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Асинхронный частотно-регулируемый электропривод испытательного стенда

УДК 62-83:523. 621.376.5

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5АМ6Л	Шенделёв Михаил Александрович		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Чернышев А. Ю.	к.т.н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП	Фигурко А.А.	к.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОКД ИШНКБ	Бородин Ю.В.	к.т.н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель отделения	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Руководитель ОЭЭ ИШЭ	Дементьев Ю.Н.	Ph.D.,к.т.н.		

Томск – 2018 г.

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Инженерная школа энергетики

Отделение электроэнергетики и электротехники

Направление подготовки: 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»

Профиль: «Энергосберегающие режимы источников питания, комплексов и систем»

УТВЕРЖДАЮ:

Рук. отделения

_____ Ю.Н. Дементьев

(Подпись)

(Дата)

(Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Магистерской диссертации

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

Студенту:

Группа	ФИО
5АМ6Л	Шенделёв Михаил Александрович

Тема работы:

**Асинхронный частотно-регулируемый электропривод испытательного
стенда**

Утверждена приказом директора (дата, номер)

приказ № 795 от 07.02.2018

Срок сдачи студентом выполненной работы:

13.06.2018

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>	<ul style="list-style-type: none">• обеспечить функционирование системы управления асинхронным электроприводом испытательного стенда синхронных генераторов;• разработать структурную схему электропривода стенда, составить имитационную модель испытательного стенда на базе системы «ПЧ-АД»;• провести сравнение линейной модели электропривода и нелинейной, полученной в ходе выполнения работы.
--	---

<p>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></p>	<p>Обзор технической литературы по теме асинхронного электропривода. Моделирование асинхронного электропривода. Технические решения по реализации управления электроприводом. Исследования асинхронного электропривода. Заключение</p>
--	--

<p>Перечень графического материала <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	<p>1. Структурная схема. 2. Имитационная модель. 3. Презентация.</p>
--	--

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
«Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»	Фигурко Аркадий Альбертович
«Социальная ответственность»	Бородин Юрий Викторович

<p>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</p>
<p>Введение; обзор литературы; объект и методы исследования; расчеты и аналитика; результаты проведенного исследования; заключение.</p>

<p>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</p>	<p>9.09.2016 г.</p>
--	---------------------

Задание выдал руководитель:				
Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Чернышев Александр Юрьевич	к.т.н.		

Задание принял к исполнению студент:			
Группа	ФИО	Подпись	Дата
5АМ6Л	Шенделёв Михаил Александрович		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа	ФИО
5АМ6Л	Шенделёв Михаил Александрович

Инженерная школа	ИШЭ	Отделение	Электроэнергетики и электротехники
Уровень образования	Магистр	Направление	Электроэнергетика и электротехника

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:	
1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	Стоимость материальных ресурсов определялась по средней стоимости по г. Томску Оклады в соответствии с окладами сотрудников НИ ТПУ
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	30 % премии 20 % надбавки 16% накладные расходы 30% районный коэффициент
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	27,1 отчисления на социальные нужды
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. <i>Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения</i>	Анализ конкурентных технических решений. Оценки перспективности проекта по технологии QuaD.
2. <i>Планирование и формирование бюджета научных исследований</i>	Формирование плана и графика разработки : - определение структуры работ; - определение трудоемкости работ; - разработка графика Ганта. Формирование бюджета затрат на научное исследование: - материальные затраты; - заработная плата (основная и дополнительная); - отчисления на социальные цели; - накладные расходы.
Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):	
1. <i>Оценка конкурентоспособности технических решений</i> 2. <i>Оценочная карта QuaD</i> 3. <i>SWOT-анализ</i> 4. <i>График Ганта</i> 5. <i>График проведения и бюджет НИ</i> <i>Определение ресурсоэффективности проекта</i>	

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Фигурко А.А.	К.Э.Н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5АМ6Л	Шенделёв М.А.		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

Группа	ФИО
5АМ6Л	Шенделёв Михаил Александрович

Институт	Инженерная школа энергетики (ИШЭ)	Отделение	
Уровень образования	Магистр	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	Объектом исследования является испытательный стенд генератора
--	---

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<p>1. Производственная безопасность</p> <p>1.1. Анализ выявленных вредных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения в следующей последовательности:</p> <ul style="list-style-type: none"> – физико-химическая природа вредности, её связь с разрабатываемой темой; – действие фактора на организм человека; – приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ); – предлагаемые средства защиты; – (сначала коллективной защиты, затем – индивидуальные защитные средства). <p>1.2. Анализ выявленных опасных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения в следующей последовательности:</p> <ul style="list-style-type: none"> – механические опасности (источники, средства защиты); – термические опасности (источники, средства защиты); – электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, молниезащита – источники, средства защиты); – пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения). 	<p>Вредные факторы:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Микроклимат 2. Шум и вибрация; 3. Воздух рабочей зоны, вентиляция; 4. Освещение рабочих мест; <p>Опасные факторы:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Опасность загораний (пожаров).
---	---

<p>2. Экологическая безопасность:</p> <ul style="list-style-type: none"> – защита селитебной зоны – анализ воздействия объекта на атмосферу (выбросы); – анализ воздействия объекта на гидросферу (сбросы); – анализ воздействия объекта на литосферу (отходы); – разработать решения по обеспечению экологической безопасности со ссылками на НТД по охране окружающей среды. 	<p>Описание проектируемой системы, утилизация электроустановок.</p>
<p>3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</p> <ul style="list-style-type: none"> – перечень 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. 	<p>Возможные ЧС: загорание (пожар), электропоражения. Соблюдения техники безопасности Следовать плану эвакуации, вызвать пожарных.</p>
<p>4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</p> <ul style="list-style-type: none"> – специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны. 	<p>Право на условие труда, отвечающие требованиям безопасности и гигиены.</p>

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОКД ИШНКБ	Бородин Юрий Викторович	к.т.н., доцент		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5АМ6Л	Шенделёв Михаил Александрович		

Реферат

Магистерская диссертация содержит текстового материала 138 страниц, 16 таблиц, 36 рисунков.

Ключевые слова: СКВАЖНЫЙ ПРИБОР, ИСПЫТАТЕЛЬНЫЙ СТЕНД, АСИНХРОННЫЙ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД, ВЕКТОРНОЕ УПРАВЛЕНИЕ, ОПТИМИЗАЦИЯ КОНТУРОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ, ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ, ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА РЕГУЛИРОВАНИЯ.

Магистерская диссертация посвящена вопросу разработки асинхронного частотно-регулируемого электропривода испытательного стенда генераторов скважного прибора.

В диссертации был выбран электродвигатель, преобразователь частоты. Разработана математическая модель асинхронного двигателя, построена имитационная модель асинхронного двигателя, на базе которой реализовано частотно-токовое векторное управление. Выполнен синтез и оптимизация контуров регулирования, разработана математическая модель системы управления и выполнены имитационные исследования нелинейных факторов, характерных для систем асинхронного электропривода.

Работа выполнена с использованием пакета программ: MS Office, MathCAD, MS Visio, Paint, Matlab 2012b.

Оглавление

Введение	9
1. Обзор литературы	11
2. Объект и методы исследования.....	16
3. Расчеты и аналитика.....	17
4. Результаты проведенного исследования	37
5. Имитационные исследования электропривода испытательного стенда.....	61
6. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение ...	66
7. Социальная ответственность	95
Заключение	109
Список публикаций студента	110
Список используемых источников	111
Приложение А	113

Введение

Глобальное энергопотребление определяют главным образом электромеханические системы с асинхронными двигателями, на которые приходится преобразование около 50% всей производимой в мире электроэнергии. Такое широкое применение асинхронного электропривода в промышленности, коммунальном и сельском хозяйстве обусловлено простотой изготовления и эксплуатации асинхронного двигателя, меньшими по сравнению с двигателем постоянного тока массой, габаритными размерами и стоимостью, а также высокой надежностью в работе. Современные тенденции развития электроприводов характеризуются массовым внедрением частотно – регулируемых асинхронных двигателей, заменой нерегулируемых приводов – регулируемыми, что позволяет экономить электроэнергию, повышать качество регулирования, что в конечном итоге ведет к повышению качества продукции и снижения её стоимости. Характерной тенденцией является замена электроприводов постоянного тока на электропривод переменного тока.

Большинство электроприводов, ЭП вентилятора, конвейера, компрессора, насоса требуют относительно узкий диапазон регулирования скорости (до 1:20) и относительно пониженное быстродействие, поэтому в основном, в таких системах используются стандартные системы скалярного управления. Для того, чтобы перейти на широкий диапазон регулирования скорости (например, 1:1000), необходимо применение более сложных систем управления, таких как векторные.

Испытательные стенды имеют широкое применение во многих отраслях промышленности. Повышение их качества и расширение функциональных возможностей позволяет повысить качество и надежность оборудования, поэтому к ним предъявляются высокие требования, выполнение которых во многих случаях невозможно без применения качественного и надежного электропривода. В том числе такие стенды широко используются в геологии и нефтегазодобывающей промышленности для тестирования оборудования.

Целью магистерской диссертации является проектирование стенда, для тестирования генераторов скважных приборов, используемых при бурении горизонтальных нефтяных скважин.

1. Обзор литературы

На сегодняшний день основной тенденцией в бурении является организация направленного бурения, которая в конечном счёте ведёт к снижению издержек на добычу нефти.

В настоящее время используется три разновидности профильных скважин:

1. Вертикальная;
2. Наклонная;
3. Горизонтальная.

Технические средства для проведения направленного бурения называются отклонителями. Кривой переводник является одним из самых применяемых отклонителей на сегодняшний день (рисунок 1.1). В общей сложности, данный переводник представляет из себя обычный переводник, у которого присоединительные резьбы находятся под углом $1-4^\circ$ друг к другу.

Кривой переводник нашел свое место в общей системе бурения между забойным двигателем и утяжеленной буровой трубой (УБТ). В связи с большей жесткостью УБТ, в забойном двигателе возникает изгиб, и на породоразрушающем инструменте, называемым долото, появляется отклоняющая сила, величина которой сильно зависит от таких параметров забойного двигателя, как длина и жесткость. Именно для этого кривые переводники используются с укороченными или односекционными турбобурами и винтовыми забойными двигателями.

В основном, от угла перекоса резьб, весовых, геометрических и жесткостных показателей компоновки зависит интенсивность искривления скважины, а также от режима бурения, фрезерующей способности долота, физико-механических свойств горных пород и зенитного угла скважины. В следствии чего данный показатель колеблется в широком диапазоне - от 1 до 6 град/ 10 м. При применении кривого

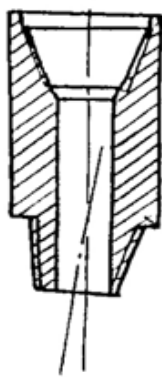


Рисунок 1.1
Кривой переводник

переводника с односекционным турбобуром максимальный зенитный угол, который можно достичь, составляет 40 - 45°. Если имеется необходимость в достижении больших зенитных углов, то нужно использовать укороченные или короткие забойные двигателя.

К преимуществам кривого переводника относится его простота, но при его использовании ухудшаются условия работы забойного двигателя за счёт упругой деформации, интенсивность искривления колеблется в широких пределах, породоразрушающий инструмент из-за наличия отклоняющей силы работает в более тяжёлых условиях.

Турбинный отклонитель серии ТО (рисунок 1.2а) состоит из турбинной 1 и шпindelной 2 секций. Корпуса секций соединяются между собой кривым переводником 3, позволяющим передавать кривую нагрузку. Крутящий момент от вала турбинной секции к валу шпинделя, располагающихся под углом друг к другу передается кулачковым шарниром 4.

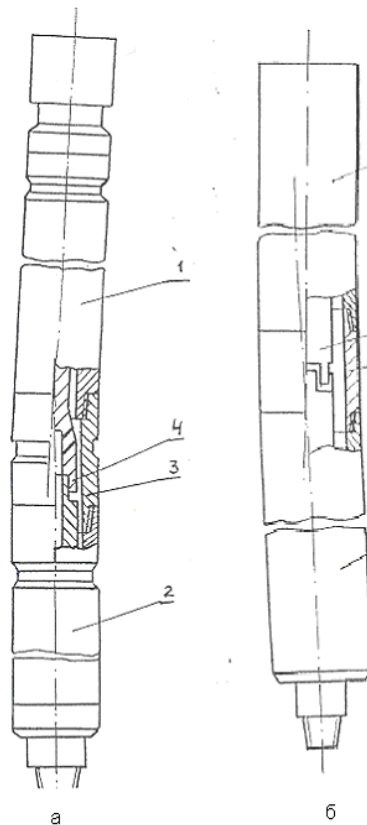


Рисунок 1.2- а- турбинный отклонитель, б- шпindel-отклонитель

Преимуществом турбинных отклонителей является приближение кривого проводника к забою скважины, в результате чего искривление проводника ствола имеет более стабильный характер, мало зависящий от физико-механических свойств пород и технологии бурения. Использование нескольких турбинных секций позволяет увеличить мощность и крутящий момент на долоте и применять такие отклонители в скважинах малого диаметра, т.е. там, где обычные кривые переводники не дают желаемого результата. Существенным недостатком турбинных отклонителей является малый моторесурс кулачкового шарнира.

Этого недостатка лишены шпindel отклонители (рисунок 1.2б), у которых кривой переводник 1 включён в разъёмный корпус 2 шпинделя, а вал изготавливается составным, соединённым кулачковыми полумуфтами 3. Такая конструкция отклонителя позволяет разгрузить полумуфты от гидравлических нагрузок и увеличить долговечность узлов по сравнению с турбинными отклонителями.

Анализ искривления скважин при бурении показывает, что:

1. В большинстве случаев скважины стремятся занять положение перпендикулярное слоистости горных пород.
2. Уменьшение зазора между стенками скважины и инструментом приводит к уменьшению искривления.
3. Места установки центрирующих инструментов и их диаметр существенно влияют на направление и интенсивность зенитного искривления.
4. Увеличение жёсткости инструмента уменьшает интенсивности инструмента, поэтому скважины большего диаметра искривляются меньше.
5. Увеличение осевой нагрузки приводит к увеличению интенсивности нагрузки
6. Направление и интенсивность искривления зависит от геологических факторов.

В процессе бурения положено постоянно контролировать положение оси скважины, потому что без этого невозможно построить геологический разрез и определить истинные глубины залегания пласта, а также определить местоположение забоя скважины, организовать попадание его в заданную точку.

Для этого необходимо знать точные зенитные и азимутальные углы скважины и глубины их измерения. Такие замеры производят специальные приборы, называемые инклинометрами.

По способу измерения и подачи информации на поверхность инклинометры разделяются на забойные, производящие замеры и передающие информацию в процессе бурения, автономные, опускаемые в колонну бурильных труб и выдающие информацию только после подъема на поверхность.

В первом случае информация от забойных датчиков по каналам связи передаётся на поверхность, где и расшифровывается. В настоящее время используются как проводные, так и беспроводные каналы связи. Проводной канал связи широко используется с электробурами, так как в этом случае возможна передача сигнала из забоя по силовому кабелю. Существуют системы со встроенными в каждую бурильную трубу кабелями, соединяемые разъёмами, линии с индуктивной связью и линии из цельно сбрасываемого кабеля. Такие линии связи имеют высокую передающую способность, но имеют ряд существенных минусов: они достаточно дороги, осложняют спускоподъемные операции, имеют низкую стойкость из-за износа кабеля, создают помехи при ликвидации обрыва труб.

К беспроводным каналам связи относятся гидравлический, электрический, акустический. Для сбора и передачи данных в этом случае используется скважный прибор (рисунок 1.3).



Рисунок 1.3 - Скважинный прибор

Принцип его действия заключается в следующем. Информация от первичных преобразователей азимута, зенитного угла и угла установки отклонителя, установленных в немагнитном корпусе скважинного прибора, преобразуется измерительным блоком в кодовую последовательность, которая вводится посредством разделителя и канала связи. На поверхности земли сигнал принимается как разность напряжения, возникающая вследствие растекания тока по породе вокруг разделителя, между бурильной колонной и бурильным штырем, который относится на расстояние 50 – 100 метров от буровой. В комплексе наземной аппаратуры принятый сигнал декодируется и отображается.

2 Объект и методы исследования

Таким образом, одним из важнейших элементов буровой установки является генератор (рисунок 1.3), служащий для питания датчиков и выработки напряжения, для создания сигналов связи. Успех процесса бурения во многом зависит от надёжности генератора. поэтому перед погружением и после ремонта генератор необходимо подвергнуть стендовым испытаниям во всех возможных режимах работы.

3 Расчеты и аналитика

Для проведения испытаний генераторов, использующихся в скважных приборах разрабатывается испытательный стенд, схематическая схема которого представлена на рисунке 3.1.

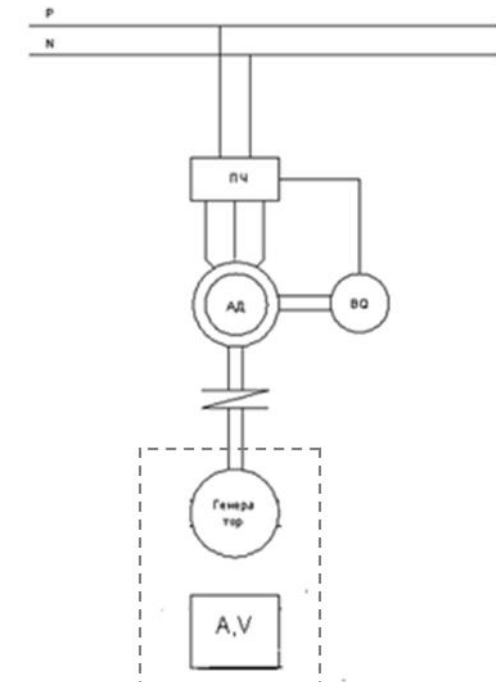


Рисунок 3.1 - Схема испытательного стенда

3.1 Выбор электродвигателя

Необходимую мощность двигателя определяем через подсчёт потерь мощности до генератора

$$P_{дв} = P_{ген} / \eta_{ген} = 350 / 0,85 = 411 \quad Вт, \quad (2.1)$$

где:

$P_{дв}$ - мощность двигателя;

$P_{ген}$ - мощность генератора;

$\eta_{ген}$ - КПД генератора.

Необходимая частота вращения 3000 об/мин.

По этим данным выбираем асинхронный двигатель RA71B2, паспортные данные которого приведены в таблице 2.1.

Таблица 3.1 – Паспортные данные двигателя RA71B2

$P_H=0,55$ кВт	номинальная мощность двигателя, кВт;
$U_H = 220$ В	номинальное линейное напряжение, В;
$n_H = 2815$	номинальная частота вращения, об/мин или
$S_H=6,2$	номинальное скольжение, %;
$\eta=74$	коэффициент полезного действия в режиме номинальной мощности (100% я нагрузка), %;
$\cos \varphi =0.82$	коэффициент мощности в режиме номинальной мощности, о.е.;
$I_{II}/I_H = k_I = 5$	кратность пускового тока, о.е.;
$M_{II}/M_H = k_n = 2,5$	кратность пускового момента, о.е.;
$M_{\max}/M_H = k_{\max} = 2,6$	кратность максимального момента, о.е.;

3.2 Расчёт параметров схемы замещения

Для расчета электромеханических и механических характеристик асинхронного двигателя необходимо воспользоваться его математической моделью, которая в общем случае представляется различными схемами замещения. Наиболее простой и удобной для инженерных расчетов асинхронного двигателя является Т-образная схема замещения, рисунок. 3.2.

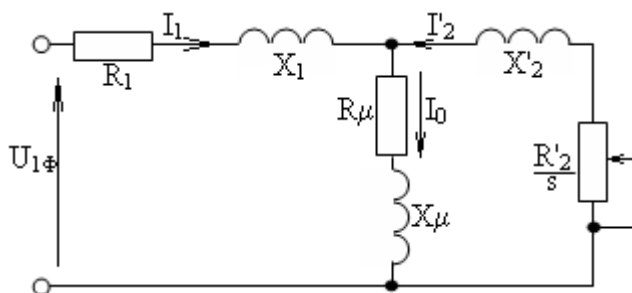


Рисунок 3.2 -Схема замещения асинхронного двигателя

Основные уравнения асинхронного двигателя, соответствующие принятой схеме замещения:

$$\bar{U}_{1\phi} - \bar{E}_1 - j \cdot X_1 \cdot \bar{I}_1 - R_1 \cdot \bar{I}_1 = 0;$$

$$\bar{E}_1 + j \cdot X'_2 \cdot \bar{I}'_2 + R'_2 \cdot \bar{I}'_2 / s = 0; \quad (2.2)$$

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

Векторная диаграмма токов, ЭДС и напряжений, удовлетворяющих вышеприведенным уравнениям изображена на рисунке 3.3.

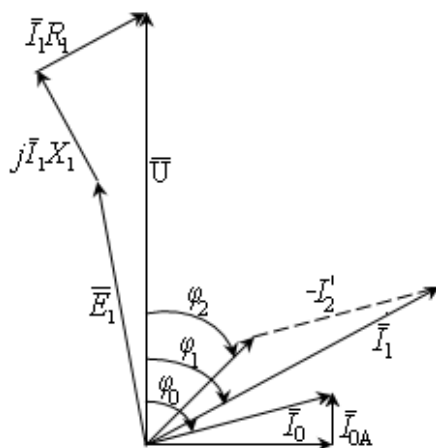


Рисунок 3.3- Векторная диаграмма асинхронной машины

Определим параметры Т-образной схемы замещения асинхронного двигателя по его каталожным данным. Каталожные данные позволяют определить параметры схемы замещения при следующих основных допущениях:

- магнитные и механические потери в двигателе составляют $0,02 P_H$;
- активные сопротивления статорной и роторной обмоток полагаются независимыми от режима работы двигателя, т.е. эффекты вытеснения не учитываются.

Ток холостого хода асинхронного двигателя

$$I_0 = \sqrt{\frac{I_{11}^2 - [p_* I_{1H} (1 - s_H) / (1 - p_* s_H)]^2}{1 - [p_* (1 - s_H) / (1 - p_* s_H)]^2}}, \quad (2.3)$$

где

$$I_{1H} = \frac{P_H}{\sqrt{3} \cdot U_{1H} \cdot \cos \varphi_H \cdot \eta_H} = \frac{550}{\sqrt{3} \cdot 220 \cdot 0.82 \cdot 0.74} = 2.379 \text{ A} - \text{номинальный ток статора}$$

двигателя;

$$I_{11} = \frac{p_* \cdot P_H}{\sqrt{3} \cdot U_{1H} \cdot \cos \varphi_{p_*} \cdot \eta_{p_*}} = \frac{0.727 \cdot 550}{\sqrt{3} \cdot 220 \cdot 0.8 \cdot 0.74} = 1.774 \text{ A}$$

- ток статора двигателя при частичной загрузке;

$$\cos \varphi_{p_*} = 0.975 \cdot 0.82 = 0.8 - \text{коэффициент мощности при частичной}$$

загрузке;

$$\eta_{p_*} = \eta_H = 0.74 - \text{КПД при частичной загрузке;}$$

$p_* = P/P_H = 0.727$ - коэффициент загрузки двигателя.

Подставив найденные величины, получим

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

$$= \sqrt{\frac{1.774^2 - \left[0.727 \cdot 2.379 \cdot \left(\frac{1 - 0.062}{1 - 0.727 \cdot 0.062} \right) \right]^2}{1 - \left[0.727 \cdot \left(\frac{1 - 0.062}{1 - 0.727 \cdot 0.062} \right) \right]^2}} = 0.729 \text{ A.} \quad (2.4)$$

Критическое скольжение

$$s_k = s_H \frac{k_{MAX} + \sqrt{(k_{MAX})^2 - [1 - 2 \cdot s_H \cdot \beta (k_{MAX} - 1)]}}{1 - 2 \cdot s_H \cdot \beta (k_{MAX} - 1)} =$$

$$= 0.062 \frac{2.6 + \sqrt{2.6^2 - [1 - 2 \cdot 0.062 \cdot 1 \cdot (2.6 - 1)]}}{1 - 2 \cdot 0.062 \cdot 1 \cdot (2.6 - 1)} = 0.414, \quad (2.5)$$

где

$\beta = R_1 / (C_1 \cdot R_2')$ - значение коэффициента β лежит в диапазоне 0,6 – 2,5, поэтому в первом приближении принимаем $\beta = 1$.

$$C_1 = 1 + (I_0 / (2 \cdot k_i \cdot I_{1H})) = 1 + \frac{0.729}{2 \cdot 5 \cdot 2.379} = 1.031. \quad (2.6)$$

Коэффициент

$$A_1 = m U_{1\phi}^2 (1 - s_H) / (2 \cdot C_1 \cdot k_{MAX} \cdot P_H) = \frac{3 \cdot 220^2 (1 - 0.062)}{2 \cdot 1.031 \cdot 2.6 \cdot 550} = 46.206. \quad (2.7)$$

Активное сопротивление ротора, приведенное к обмотке статора асинхронного двигателя

$$R_2' = A_1 / (\beta + 1 / s_k) C_1 = \frac{46.206}{\left(1 + \frac{1}{0.392} \right) \cdot 1.031} = 11.705 \text{ Ом.} \quad (2.8)$$

Активное сопротивление статорной обмотки

$$R_1 = C_1 R_2' \beta = 1.031 \cdot 11.705 \cdot 1 = 12.505 \text{ Ом.} \quad (2.9)$$

Параметр γ , который позволит найти индуктивное сопротивление короткого замыкания X_{KH}

$$\gamma = \sqrt{(1/s_k^2) - \beta^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{0.392^2}\right) - 1^2} = 2.348. (2.10)$$

Тогда

$$X_{кн} = \gamma C_1 R_2' = 2.348 \cdot 1.031 \cdot 11.705 = 30.542, \text{ Ом},$$

При помощи индуктивного сопротивления $X_{кн}$ можно получить сопротивления рассеяния фаз статора и ротора, необходимо воспользоваться соотношениями, которые справедливы для серийных асинхронных двигателей.

Индуктивное сопротивление роторной обмотки, приведенное к статорной

$$X_{2н}' = 0,58 X_{кн} / C_1 = 0,58 \cdot \frac{30.542}{1.031} = 17.188 \text{ Ом}. (2.11)$$

Индуктивное сопротивление статорной обмотки

$$X_{1н} = 0,42 X_{кн} = 0,42 \cdot 30.542 = 12.828 \text{ Ом}. (2.12)$$

По найденным значениям переменных C_1 , R_2' , R_1 и $X_{кн}$ определяется критическое скольжение

$$s_k = \frac{C_1 R_2'}{\pm \sqrt{R_1^2 + X_{кн}^2}} = \frac{1.031 \cdot 11.705}{\sqrt{12.505^2 + 30.542^2}} = 0.392. (2.13)$$

Согласно векторной диаграмме э.д.с. ветви намагничивания E_1 , наведенная потоком воздушного зазора в обмотке статора в номинальном режиме, равна

$$E_1 = \sqrt{(U_{1j} \cos \varphi_{1н} - R_1 I_{1н})^2 + (U_{1j} \sin \varphi_{1н} + X_1 I_{1н})^2} = \sqrt{(220 \cdot 0.82 - 12.505 \cdot 2.379)^2 + (220 \cdot 0.662 - 12.828 \cdot 2.379)^2} = 188.609 \text{ В}, (2.14)$$

Тогда индуктивное сопротивление намагничивания

$$X_{\mu н} = E_1 / I_0 = \frac{188.609}{0.729} = 258.74 \text{ Ом}. (2.15)$$

3.3 Расчёт естественной механической и электромеханической характеристик двигателя

Электромеханическая характеристика, определяющая зависимость приведенного тока ротора от скольжения:

$$I_2' = \frac{U_{1j}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + X_{\text{кн}}^2 f_{1*}^2 + \left(\frac{R_1 R_2'}{s X_{\text{мн}} f_{1*}}\right)^2}} =$$

$$= \frac{220}{\sqrt{\left(12.505 + \frac{11.705}{s}\right)^2 + 30.542^2 \cdot 1^2 + \left(\frac{12.505 \cdot 11.705}{s \cdot 258.74 \cdot 1}\right)^2}};$$
(2.16)

Полагая ток намагничивания асинхронного двигателя I_0 реактивным ($I_{0a} = 0$), ток статора I_1 через приведенный ток ротора I_2' можно найти по формуле

$$I_1 = \sqrt{I_0^2 + (I_2')^2 + 2 \cdot I_0 \cdot I_2' \cdot \sin \varphi_2} = \sqrt{0.729^2 + (I_2')^2 + 2 \cdot 0.729 \cdot I_2' \cdot \sin \varphi_2}, \quad (2.17)$$

$$\text{где } \sin \varphi_2 = \frac{X_{\text{кн}} f_{1*}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + X_{\text{кн}}^2 f_{1*}^2}} = \frac{30.542 \cdot 1}{\sqrt{\left(12.505 + \frac{11.705}{s}\right)^2 + 30.542^2 \cdot 1^2}}.$$

Задаваясь скольжением от (-2) до 2, строим естественные электромеханические характеристики асинхронного электродвигателя рисунок 3.4

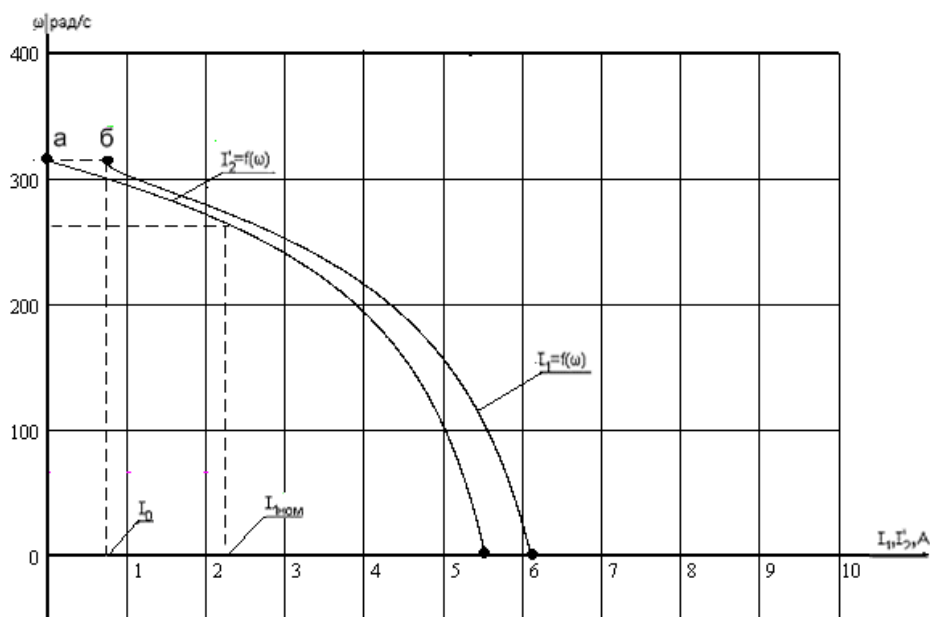


Рисунок 3.4- Естественные электромеханические характеристики асинхронного электродвигателя

Проведем анализ каждой электромеханической характеристики по двум точкам:

Характеристика $I_2' = f(\omega)$:

Точка а- $s = 0$, $\omega = \omega_0 = 314.159$ рад/с, $I_2' = 0$.

Точка в- $s = 1$, $\omega = 0$ рад/с, $I_2' = I_{2кз}' = 5.508$ А.

Характеристика $I_1 = f(\omega)$:

Точка б- $s = 0$, $\omega = \omega_0 = 314.159$ рад/с, $I_1 = I_0 = 0.729$ А.

Точка г- $s = 1$, $\omega = 0$ рад/с, $I_1 = I_{1кз} = 6.07$ А.

Также на рис. 3.4 видно, что $I_{1кз} > I_{2кз}'$, значит, данные электромеханические характеристики относятся к асинхронному двигателю с ненасыщенной магнитной системой.

Но $I_{1п} = I_{1кз} = 5 \cdot I_{1н} = 7 \cdot 2.379 = 11.865$ А. Неравенство расчетных и графически полученных значений связано с тем, что при построении электромеханических характеристик учитывалась частичная загрузка двигателя ($p_* = 0.75$).

Для расчета тока статора существует еще одна (приближенная) формула:

$$I_1 = \sqrt{I_0^2 + (I_2')^2 + (1 + 2\alpha)} = \sqrt{2.379^2 + (I_2')^2 + (1 + 2 \cdot 0.11)}, \quad (2.18)$$

где коэффициент $\alpha = 0.11 \div 0.13$.

Сравним электромеханические характеристики $I_1 = f(\omega)$, построенные по разным формулам (рисунок 3.5).

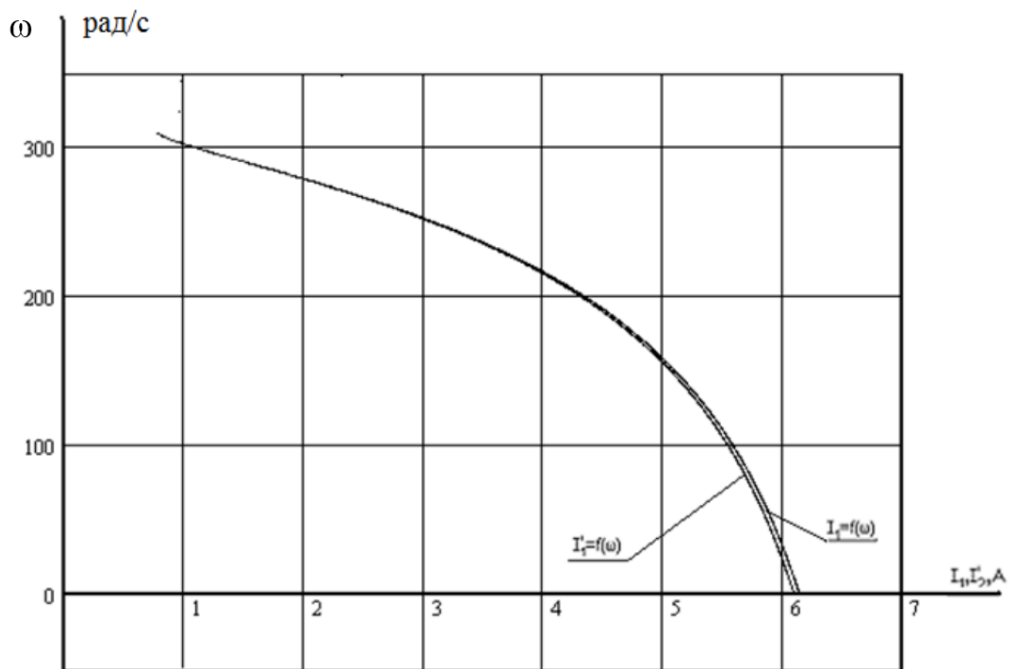


Рисунок 3.5 - Естественные электромеханические характеристики асинхронного электродвигателя: $I_1 = f(\omega)$ - построена по стандартной

формуле; $I_1' = f(\omega)$ - построена по приближенной формуле

Из рис.3.4 видно, что полученные характеристики не совпадают. Расчет тока статора по приближенной формуле дает погрешность.

Механическую характеристику асинхронного двигателя строим по формуле Клосса:

$$M = \frac{2 \cdot M_{кр} (1 + a \cdot s_{кр})}{\frac{s_{кр}}{s} + \frac{s}{s_{кр}} + 2 \cdot a \cdot s_{кр}} = \frac{2 \cdot 4.904 \cdot (1 + 1.031 \cdot 0.392)}{\frac{0.392}{s} + \frac{s}{0.392} + 2 \cdot 1.031 \cdot 0.392}, \text{Н} \cdot \text{м} \quad (2.19)$$

где критический момент двигателя

$$M_{кр} = \frac{m \cdot U_{1н}^2}{2 \cdot \omega_0 \cdot C_1 \cdot \left(R_1 + \sqrt{R_1^2 + (X_{1н} + X'_{2н})^2} \right)} =$$

$$= \frac{3 \cdot 220^2}{2 \cdot 314.159 \cdot 1.031 \cdot \left(12.505 + \sqrt{12.505^2 + (12.828 + 17.188)^2} \right)} = 4.904 \text{Н} \cdot \text{м}; \quad (2.20)$$

$$\text{коэффициент } a = \frac{R_1}{R_2'} = \frac{12.505}{11.705} = 1.031.$$

Задаваясь скольжением от 0 до 1, строим естественную механическую характеристику асинхронного электродвигателя (рис.3.6).

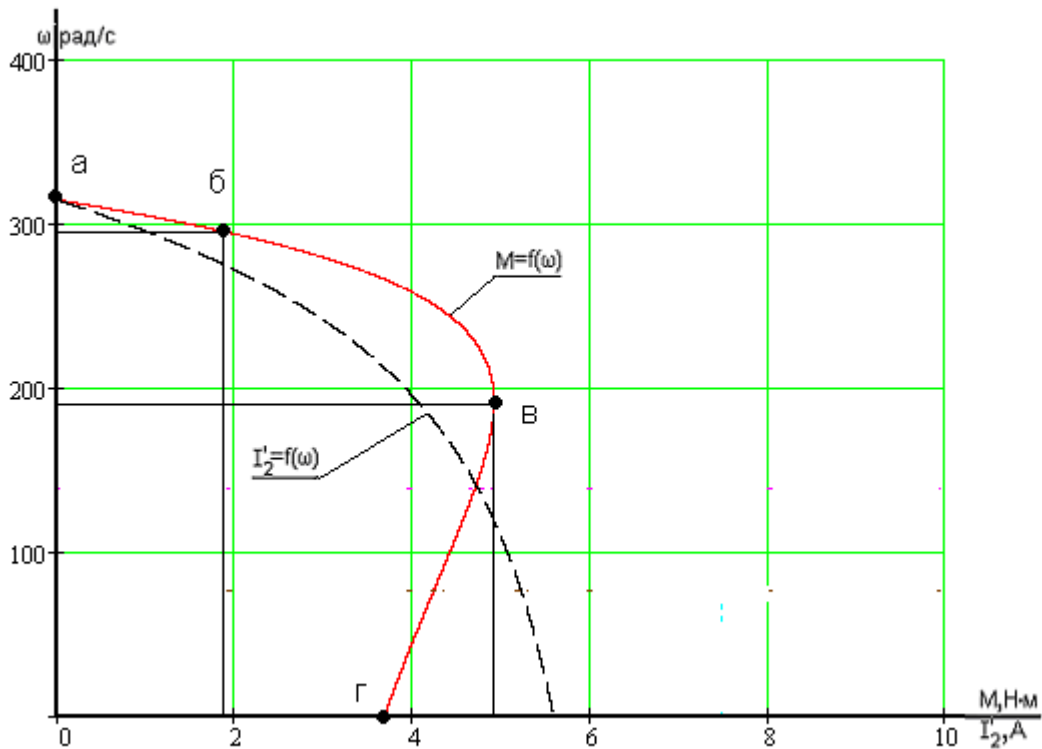


Рисунок 3.6 - Естественная механическая характеристика асинхронного двигателя

Анализ полученной механической характеристики будем проводить по характерным точкам:

Точка а- $s = 0$, $\omega = \omega_0 = 314.159$ рад/с, $M = 0$ Н·м.

Точка б- $s_{\text{НОМ}} = 0.062$, $\omega_{\text{НОМ}} = 294.681$ рад/с, $M_{\text{НОМ}} = 1.866$ Н·м.

Точка в- $s_{\text{кр}} = 0.392$, $\omega_{\text{кр}} = 191.056$ рад/с, $M_{\text{кр}} = 4.904$ Н·м.

Точка г- $s = 1$, $\omega = 0$ рад/с, $M_{\text{пуск}} = 3.67$ Н·м.

Точка д- $s = 1$, $\omega = 0$ рад/с, $M_{\text{кр.пасп.}} = 3.6777$ Н·м.

Контрольные точки можно также рассчитать по каталожным данным:

максимальный момент $M_{\text{макс}} = 2.6 \cdot M_{\text{НОМ}} = 2,6 \cdot 1.866 = 4.853$ Н·м;

пусковой момент $M_{\text{пуск}} = 2.5 \cdot M_{\text{НОМ}} = 2.5 \cdot 1.866 = 4.666 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

Пусковой момент, исходя из формулы Клосса:

$$M_{\text{пуск.расч.}} = \frac{2 \cdot M_{\text{кр}} \cdot (1 + a \cdot s_{\text{кр}})}{\frac{s_{\text{кр}}}{1} + \frac{1}{s_{\text{кр}}} + 2 \cdot a \cdot s_{\text{кр}}} = \frac{2 \cdot 4.904 \cdot (1 + 1,049 \cdot 0.392)}{\frac{0.392}{1} + \frac{1}{0.392} + 2 \cdot 1.031 \cdot 0.392} = 3.67 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (2.21)$$

Механическая характеристика соответствует асинхронному двигателю с ненасыщенной магнитной системой.

Для того, чтобы убедиться в устойчивости АД с найденными параметрами схемы замещения проведем имитацию его работы при помощи Matlab Simulink в динамике. На рисунке 3.7 изображена имитационная модель асинхронного двигателя.

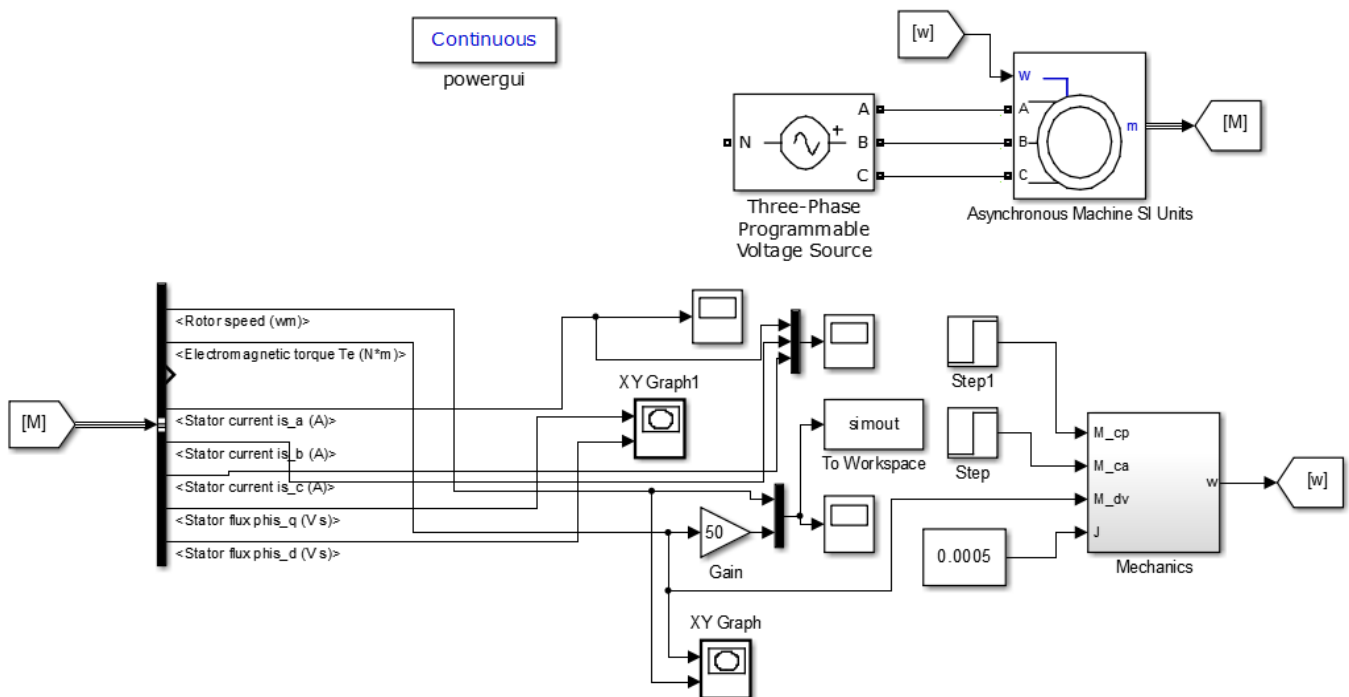


Рисунок 3.7 - Схема имитационной модели АД

Переходные процессы, полученные при помощи данной модели, представлены на рисунке 3.8.

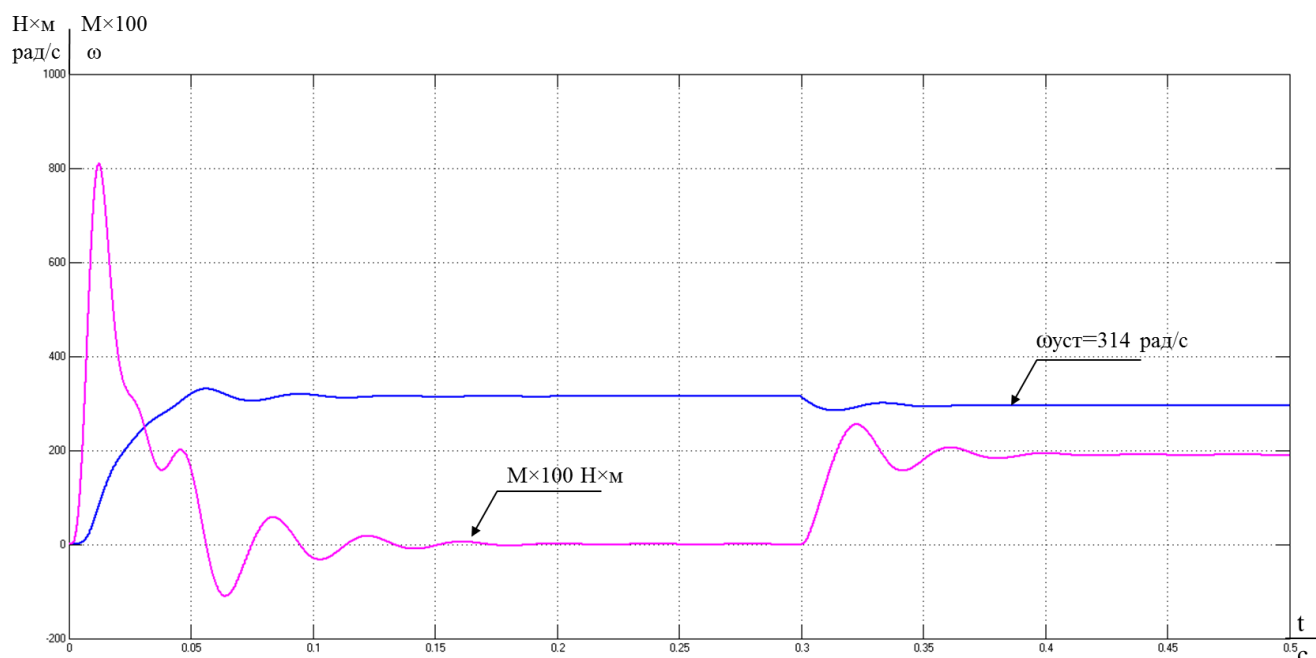


Рисунок 3.8- Переходные процессы пуска АД

Переходный процесс при прямом пуске АД устойчив, поэтому АД можно использовать для контура системы ПЧ-АД с векторным управлением.

3.4 Пуск двигателя при помощи системы ТРН-АД

Выполним плавный пуск АД при помощи тиристорного пускового устройства, имитационное моделирование, а также исследуем переходные процессы на предмет потерь мощностей.

Основной принцип работы устройства плавного пуска асинхронного двигателя заключается в следующем: напряжение, которое подается от сети через тиристорное пусковое устройство (ТПУ) на обмотки статора асинхронного двигателя, ограничивается при помощи силовых ключей – параллельно включенных тиристоров $VS1-VS6$ (рисунок 3.9). В результате напряжение на нагрузке можно изменять по закону, определяемому задатчиком интенсивности.

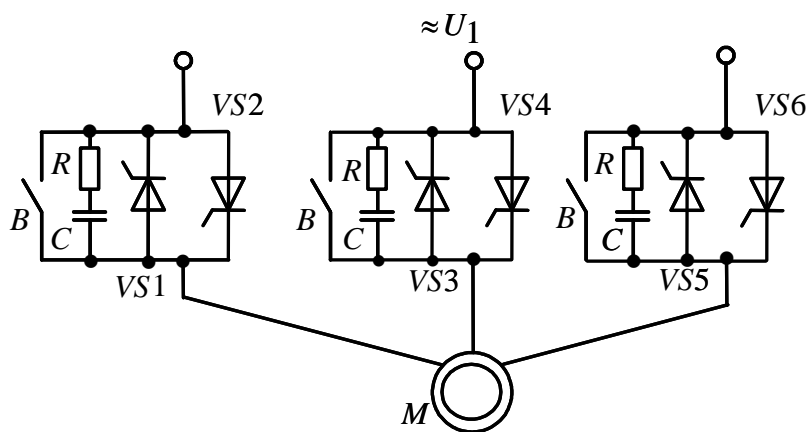


Рисунок 3.9 - Схема силовых цепей нереверсивного тиристорного регулятора напряжения

Два антипараллельных тиристора в каждой фазе тиристорного пускового устройства (ТПУ) шунтированы RC цепочками. RC цепочки ставятся для того, чтобы исключить самопроизвольное включение тиристоров из-за эффекта dU/dt при подачи силового напряжения на ТПУ скачком. В некоторых схемах ТПУ по окончании переходных процессов пуска электропривода антипараллельные тиристоры шунтируются механическими контактами B .

Задача ТПУ - плавно увеличивая напряжение на обмотках статора асинхронного двигателя M , добиться заданного изменения тока статора двигателя и его момента по заданному закону. Отличаясь простотой схемы, низкими массогабаритными показателями и стоимостью, ТПУ позволяют ограничить ток и момент асинхронного двигателя при пусках, торможениях, а реверсивные ТПУ и при реверсах двигателя. При прямых пусках асинхронного двигателя на его валу возникают ударные динамические моменты, превосходящие номинальный момент двигателя в 5 – 6 раз, что выводит из строя, как кинематику производственного механизма, так и сам двигатель. Целью настоящей работы является исследование асинхронного электропривода с тиристорным пусковым устройством с целью выявления затрат электрической энергии ТПУ при пуске асинхронного двигателя и установления особенностей его работы.

Все исследования асинхронного электропривода в динамике при пуске прямым включением в сеть и плавном пуске через тиристорное пусковое устройство проведем в программной среде *MatLab-Simulink*. Все мощности и потери мощности за цикл работы будем так же определять в программной среде *MatLab-Simulink* за цикл работы путем их интегрирования и отображения с помощью цифрового индикатора (*Display*). Схема силовой цепи для одной из фаз ТПУ в программной среде *MatLab-Simulink* приведена на рисунке 3.10.

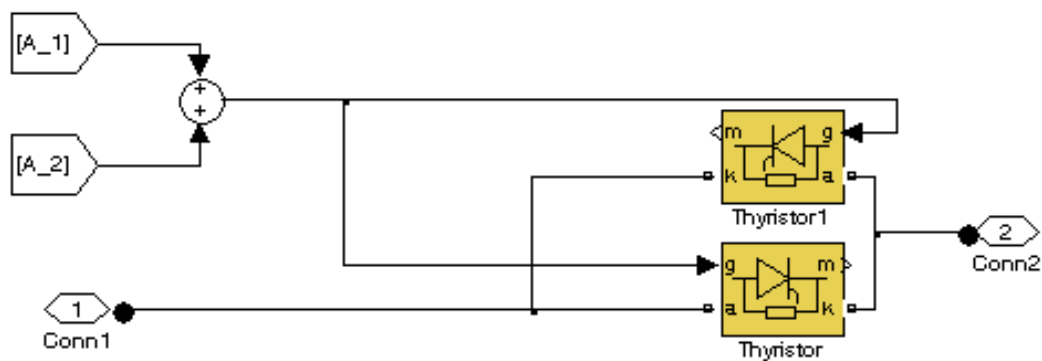
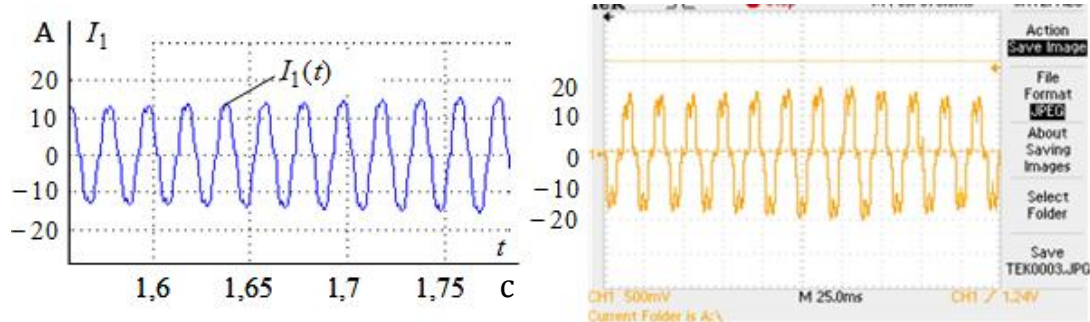


Рисунок 3.10 - Схема силовой цепи одной фазы тиристорного пускового устройства в программной среде *MatLab-Simulink*

С целью выявления соответствия процессов, протекающих при исследовании ТПУ на имитационной модели и реальном электроприводе с ТПУ, были сняты графики токов статора. Результаты исследований приведены на рисунке 3.11.

Анализ токов статора имитационной модели и реального электропривода, приведенных на рисунке 3.11, показывает их совпадение. Поэтому будем предполагать, что совпадут и другие физические величины, полученные на имитационной модели и в реальном электроприводе с ТПУ.



а)

б)

Рисунок 3.11 - Осциллограммы токов статора асинхронного двигателя, полученные на имитационной модели, а) и реальном электроприводе с ТПУ б)

Проведем анализ потерь в асинхронном двигателе при пуске прямым включением в сеть и с применением тиристорного пускового устройства. Для сравнительного анализа в одинаковом цикле работы двигателя будем определять мощность, потребляемой двигателем из сети P_s , мощность на валу двигателя P_m , потери мощности в двигателе ΔP_s и потери мощности в двигателе при нагреве активных сопротивлений статора P_{1a} [1].

Расчет мгновенного значения мощности, потребляемой двигателем из сети при его работе во всех режимах, будем находить из выражения:

$$P_s = u_{1a} \cdot i_{1a} + u_{1b} \cdot i_{1b} + u_{1c} \cdot i_{1c}, \quad (1)$$

где u_{1a} , u_{1b} , u_{1c} – мгновенные значения фазных напряжений двигателя;

i_{1a} , i_{1b} , i_{1c} – мгновенные значения фазных токов.

Мгновенное значение мощности на валу двигателя будем определять по уравнению:

$$P_m = M \cdot \omega \quad (2)$$

где M – мгновенное значение момента асинхронного двигателя, Н · м;

ω – скорость двигателя, рад/с ;

Потери мощности в двигателе определяются как разница мощности, потребляемой двигателем из сети, и механической мощности на его валу:

$$\Delta P_s = P_s - P_m. \quad (3)$$

Потери мощности на активных сопротивлениях статора, от протекающего тока:

$$P_{1a} = 3 \cdot i_{1a}^2 \cdot R_1, \quad (4)$$

где R_1 – активное сопротивление фазы статора.

Моделирование процессов в электроприводе произведено для асинхронного двигателя серии АИР90S2, имеющего следующие каталожные данные: номинальная мощность $P_H = 3,4$ кВт; номинальное фазное напряжение $U_{1H} = 220$ В; номинальная синхронная скорость $\omega_{0H} = 314,15$ рад/с, номинальную скорость $\omega_H = 290,0$ рад/с, номинальный к.п.д. $\eta_H = 0,76$ о.е.; номинальный коэффициент мощности $\cos\varphi_H = 0,72$ о.е.; кратность пускового тока $k_i = I_{п}/I_H = 6,0$ о.е.; кратность максимального момента $k_{max} = M_{п}/M_H = 2,2$ о.е. Эти данные позволяют рассчитать параметры Т-образной схемы замещения двигателя.

В результате моделирования пуска асинхронного двигателя прямым включением в сеть получены графики переходных процессов скорости $\omega(t)$ и момента $M(t)$ рисунке 3.12, а также графики мощностей и потерь мощности в двигателе рисунке 3.12, б.

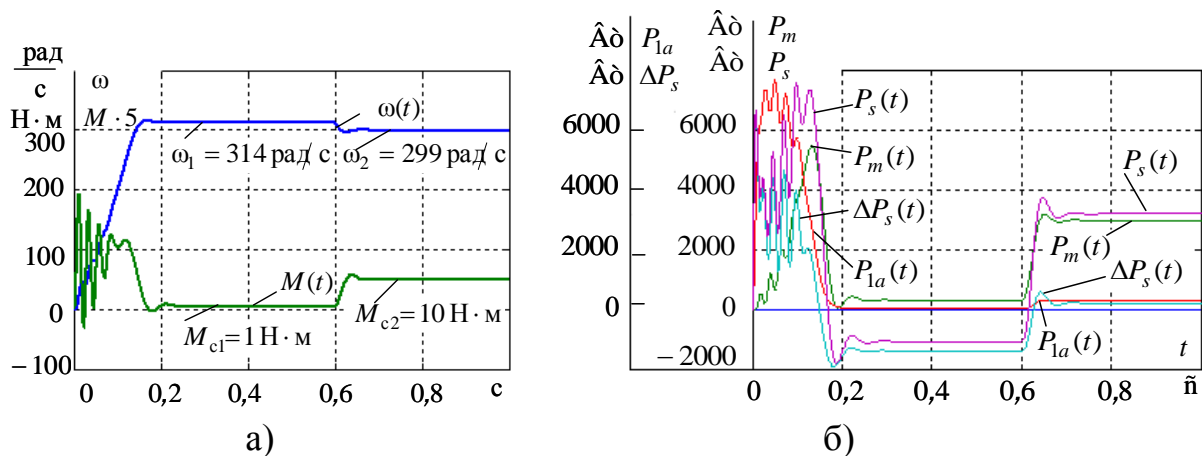


Рисунок 3.12 - Графики переходных процессов при пуске асинхронного двигателя прямым включением в сеть

В результате исследований установлено, что при прямом пуске асинхронного двигателя с моментом сопротивления $M_{c1} = 1 \text{ Н} \cdot \text{м}$ его установившаяся скорость $\omega_1 = 314 \text{ рад/с}$, при набросе нагрузки до $10 \text{ Н} \cdot \text{м}$ его установившаяся скорость $\omega_1 = 299 \text{ рад/с}$. Ударный динамический момент достигает $40 \text{ Н} \cdot \text{м}$, что практически в 4 раза превышает номинальный момент двигателя АИР90S2, равный $10,8 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

Из приведенных графиков переходных процессов мощностей и потерь мощности в двигателе получаем следующие данные: мощность, потребляемая двигателем от ТПУ за цикл работы $P_s = 1796 \text{ Вт}$, мощность на валу двигателя за цикл работы $P_m = 1677 \text{ Вт}$, потери мощности в двигателе $\Delta P_s = 119 \text{ Вт}$.

В результате имитационного моделирования пуска асинхронного двигателя через ТПУ получены графики переходных процессов скорости $\omega(t)$ и момента $M(t)$ рисунке 3.13, а также графики мощностей и потерь мощности в двигателе рисунке 3.13, б.

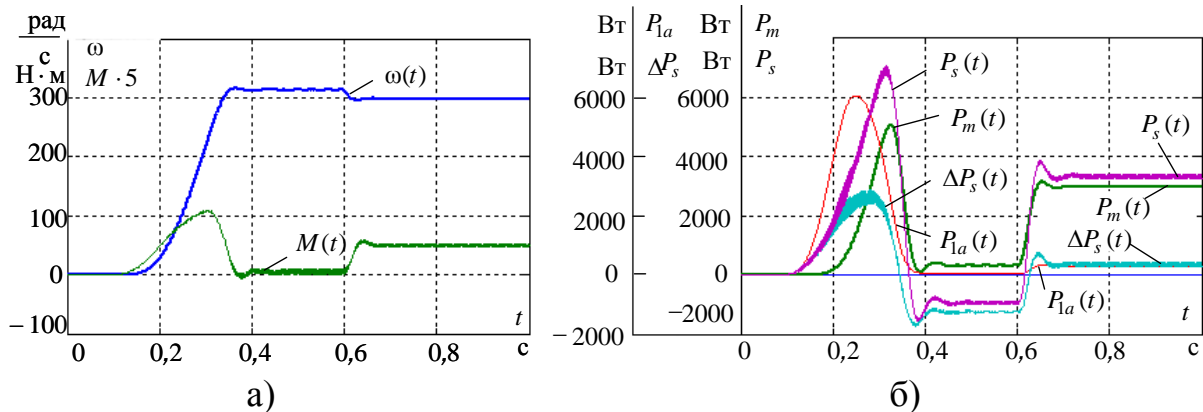


Рисунок 3.13 - Графики переходных процессов при пуске асинхронного двигателя через тиристорное пусковое устройство

Анализ переходных процессов, приведенных на рисунке 3.13, показывает, что ударные динамические моменты при пуске и набросе нагрузки отсутствуют, двигатель разгоняется плавно. Потребляемые мощности: $P_s = 1784 \text{ Вт}$, $P_m = 1635 \text{ Вт}$, потери мощности в двигателе $\Delta P_s = 149 \text{ Вт}$.

Выводы:

- При пуске асинхронного двигателя через тиристорное пусковое устройство устраняются ударные динамические моменты.
- Потери электрической энергии в электроприводе с ТПУ возрастают в установившихся режимах. Для уменьшения потерь в установившихся режимах все три фазы ТРН следует шунтировать контактами дополнительного контактора [1].

Система ТРН-АД несомненно хорошее решение для пуска, реверса и останова двигателя. Но необходим более широкий диапазон регулирования, поэтому в следующем пункте подберем преобразователь частоты для электропривода испытательного стенда и построим имитационную модель системы ПЧ-АД.

3.5 Выбор преобразователя частоты и способа управления

Выбор способа управления

При выборе способа регулирования скорости вращения асинхронного двигателя в системе частотный преобразователь – асинхронный двигатель воспользуемся качественным анализом. Для наглядности способы управления сведены в таблицу 3.2.

Таблица 3.2 – Способы управления в системе ПЧ–АД и их показатели

№	Способ управления	Диапазон регулирования скорости D_{ω}		Вывод
		Максимальный	Реальный	
1	Скалярное управление: закон управления $U_1/f_1=\text{const}$; IR-компенсация; без датчика скорости	до 10	до 5	По точности не удовлетворяет даже на верхней характеристике
2	Скалярное управление: закон управления $U_1/f_1=\text{const}$; с датчиком скорости	до 100	до 70	Не удовлетворяет по диапазону регулирования
3	Векторное управление без датчика скорости	до 120	менее 100	Не удовлетворяет по диапазону регулирования
5	Векторное управление с датчиком скорости	10000		Удовлетворяет всем

				требованиям
--	--	--	--	-------------

По результатам анализа выбор сделан в пользу частотно-токового векторного управления.

Выбор преобразователя частоты

КЕВ COMBIVERT представляет собой преобразователь частоты с промежуточным звеном постоянного тока. Он работает на принципе широтно-импульсной модуляции и предназначен исключительно для бесступенчатого регулирования скорости вращения трехфазных двигателей переменного тока. Этот преобразователь был разработан с учетом соблюдения соответствующих норм безопасности и изготовлен с высокими требованиями к качеству.

При выборе частотного преобразователя следует ориентироваться на следующие параметры:

1. Определить полную выходную мощность преобразователя, ориентируясь на номинальную мощность электродвигателя.

2. Определить номинальный выходной ток преобразователя, который необходимо выбирать равным номинальному току электродвигателя.

Ориентируясь на эти данные, выбрал преобразователь КЕВ 07F4C3D1240 с параметрами, приведёнными в таблице 3.3.

Таблица 3.3 Параметры преобразователя частоты КЕВ COMBIVERT

Типоразмер		07
Ном. выходная мощность	кВт	1,6
Мак с. мощность двигателя	кВт	0,75
Номин. Выходной ток,	А	4
Макс. Кратковременный ток 1)	А	7,2
Ток срабатывания защиты	А	8,8
Номинальный входной ток	А	8
Исполнение корпуса		D
Ном. тактовая частота 2)	кГц	16
Макс, тактовая частота	кГц	16
Мощность потерь в ном .режиме		65
Макс, ток покоя при 8кГц.	А	-
Макс, ток покоя при 16кГц.	А	-
Макс. Темпер. Радиатора ТОН		85
Макс, допуст.предохран. (медл)	А	20
Сечение кабеля	мм	2,5

Мин. тормозной резистор	Ом	56
Ном. тормозной резистор	Ом	180
Макс, ток торможения	А	7
Характерист. перегруза		
Момент затяжки клемм	Нм	0.5
Напряжение сети [V]	180...260 +/- 0 (230V)	
Количество фаз	1	
Частота в сети	Гц	50...60 +/-2
Выходное напряжение (U_H =сети)	$3 \times 0 \dots U_H$	
Выходная частота	Гц	0...409
Длина экранирующего кабеля до эл/дв.	м	30
Температура хранения	°C	-25...70
Рабочая температура	°C	-10...45
Заявленное исполнение	IP20	
Относительная влажность (без росы)	95	
Испытан по нормам	EN 61800 - 3	
Климатическая категория (EN 50178)	3К3	

Схема подключения силовой цепи представлена на рисунке 3.14.

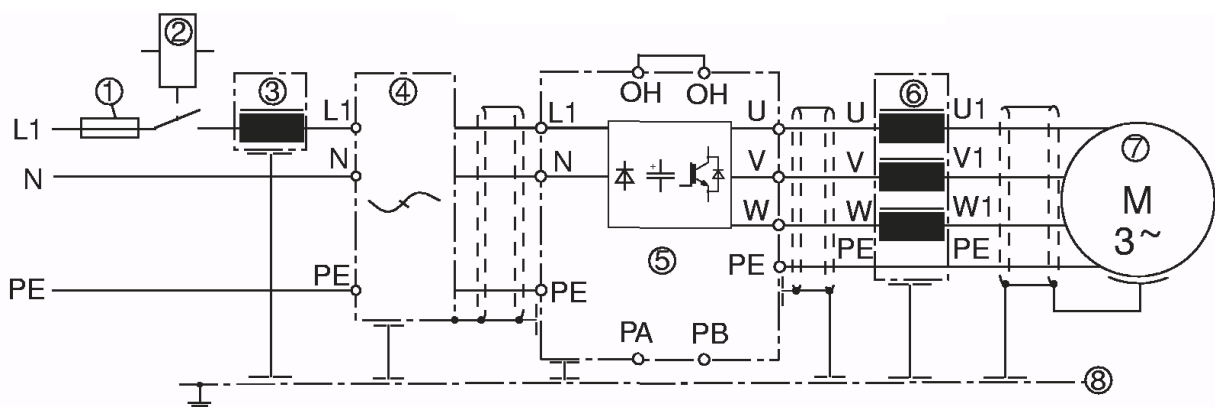


Рисунок 3.14 Схема подключения преобразователя

1- сетевой предохранитель, 2-главный пускатель, 3-сетевой дроссель, 4- сетевой фильтр, 5- KEB COMBIVERT, 6-выходной дроссель или фильтр, 7- электродвигатель, 8 – монтажная панель.

Внешний вид преобразователя частоты представлен на рисунке 3.15.



Рисунок 3.15 - Внешний вид преобразователя частоты

4 Результаты проведенного исследования

Известно, что в векторных системах управление наиболее просто реализуется с регуляторами во вращающейся системе координат. Однако такая реализация требует введения дополнительных блоков преобразования координат из вращающейся системы x, j_y в неподвижную a, j_b (прямое преобразование) и наоборот из неподвижной a, j_b во вращающуюся x, j_y (обратное преобразование).

Функциональная схема векторной системы управления АД с косвенной ориентацией по полю с регуляторами, выполненными во вращающейся системе координат, представлена на рисунке 4.1.

На функциональной схеме приняты следующие обозначения:

- М - асинхронный двигатель;
- АИН - автономный инвертор напряжения;
- Ф - фильтр подавления помех. Подавляет возмущения и пульсации входных сигналов.
- АЦП - аналого-цифровой преобразователь;
- ВQ - импульсный датчик положения;
- БРС - блок расчёта скорости
- БРСК - расчётный блок. Вычисляет значение скорости вращения вектора потокосцепления ω_k при косвенной ориентации по полю
$$\omega_k = \omega z_p + \beta = \omega z_p + \frac{I_{1y}}{I_{1x}} \cdot \frac{R_2}{L_2}$$
- БРП - блок расчёта потокосцепления Ψ_{2x} ;
- БУП - блок углового преобразования. Вычисляет угловое положение вектора потокосцепления;
- БК - блок компенсации ЭДС двигателя;
- БРЗП - блок расчёта задания магнитного потока. Формирует $U_{3\psi}$ в зависимости от величины заданной скорости;
- РС - регулятор скорости (ПИ-регулятор);
- Р Ψ - регулятор потокосцепления;

- PT_x - регулятор тока в контуре намагничивания (ПИ-регулятор);
- PT_y — регулятор тока (ПИ-регулятор)

Также в схеме предусмотрены блоки, осуществляющие координатные преобразования:

- А, В, С - а, б - преобразователь координат. Формирует составляющие токи статора I_{1a} , I_{1b} эквивалентной двухфазной машины в неподвижной системе координат аjb;
- а,б-х,у - преобразователь координат, осуществляющий обратное преобразование токов I_{1a} , I_{1b} неподвижной системы координат а jb во вращающуюся хjу.

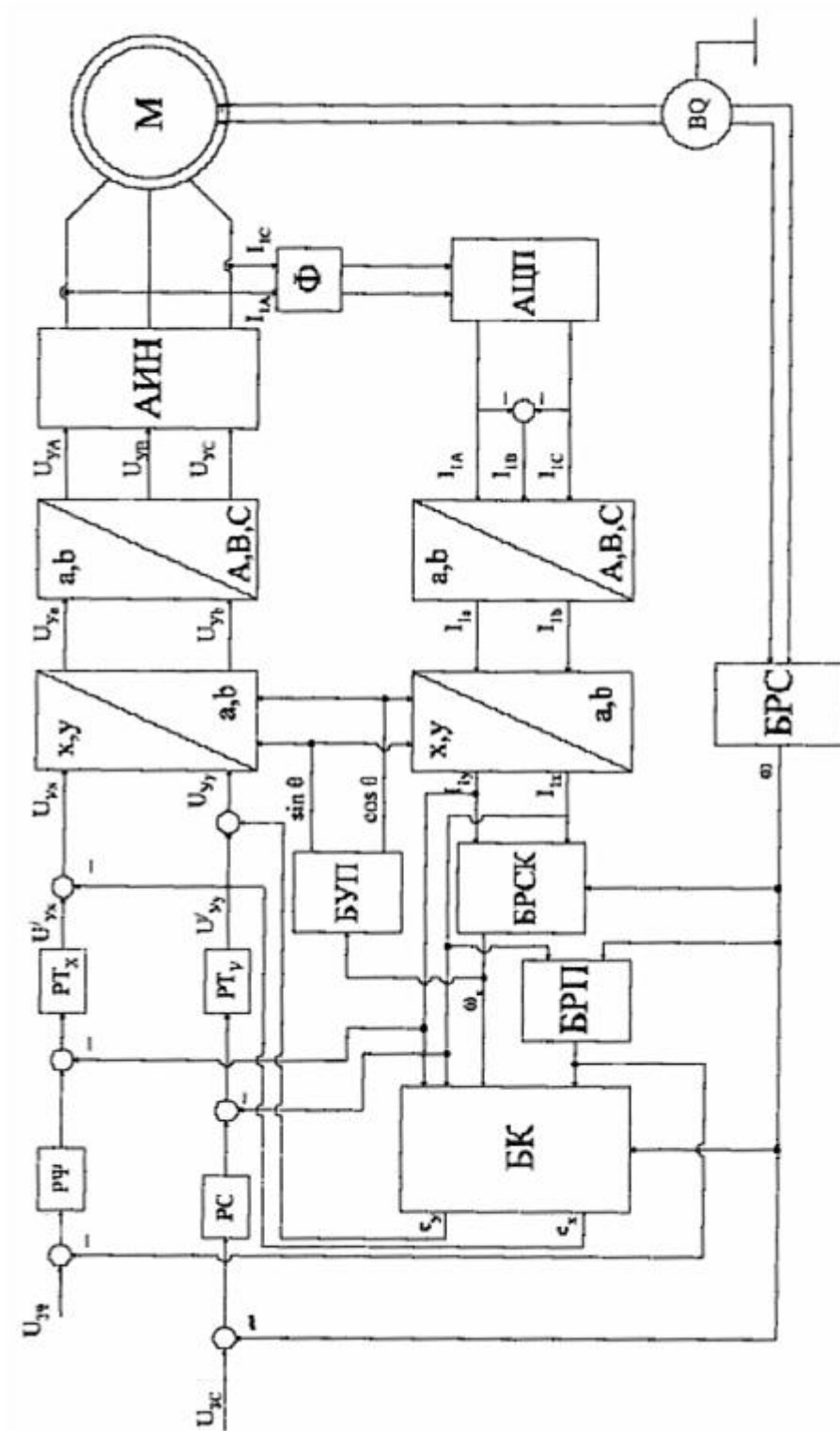


Рисунок 4.1 - Функциональная схема векторной системы управления АД с косвенной ориентацией по полю с регуляторами, выполненными во вращающейся системе координат

4.1 Разработка математической модели асинхронного двигателя

При разработке математической модели асинхронного двигателя считаем, что параметры и переменные, относящиеся к обмоткам ротора, приведены к числу витков обмотки статора.

Состояние многофазной машины переменного тока в стационарном и переходных режимах описывается потокоцеплениями обмоток статора и ротора и угловой скоростью ротора. Потокоцепления являются направленными величинами, вращающимися в плоскости, перпендикулярной оси двигателя. Если считать эту плоскость комплексной, то потокоцепления могут быть представлены векторами:

$$\bar{\Psi}_1 = \bar{I}_1 \cdot L_1 + \bar{I}_2 \cdot L_m \quad (4.1)$$

$$\bar{\Psi}_2 = \bar{I}_2 \cdot L_2 + \bar{I}_1 \cdot L_m. \quad (4.2)$$

Каждый вектор тока и пропорциональный ему вектор потока равен геометрической сумме компонент, образуемых в отдельных фазах. Для трёхфазной обмотки, оси которой смещены в пространстве на 120° , Результирующий вектор тока:

$$I = \frac{2}{3} \cdot (I_a + I_b \cdot e^{j120^\circ} + I_c \cdot e^{j240^\circ}).$$

Токи в фазах можно определить, как проекции вектора тока на соответствующие оси обмоток.

В неподвижной системе координат:

$$\bar{U}_1 = \bar{I}_1 \cdot R_1 + \frac{d\bar{\Psi}_1}{dt}; \quad (4.3)$$

$$\bar{U}_2 = \bar{I}_2 \cdot R_2 + \frac{d\bar{\Psi}_2}{dt}. \quad (4.4)$$

Во вращающейся системе координат

$$\bar{U}_1 = \bar{I}_1 \cdot R_1 + \frac{d\bar{\Psi}_1}{dt} + j \cdot \omega_\kappa \cdot \bar{\Psi}_1 \quad (4.5)$$

$$\bar{U}_2 = \bar{I}_2 \cdot R_2 + \frac{d\bar{\Psi}_2}{dt} + j \cdot (\omega_\kappa - z_p \cdot \omega) \cdot \bar{\Psi}_2. \quad (4.6)$$

Из уравнений (3.1) и (3.2) выразим:

$$\bar{I}_2 = \frac{1}{L_2} \cdot \bar{\Psi}_2 - \frac{L_m}{L_2} \cdot \bar{I}_1; \quad (4.7)$$

$$\bar{\Psi}_1 = \bar{I}_1 \cdot L'_1 + \bar{\Psi}_2 \cdot \frac{L_m}{L_2}. \quad (4.8)$$

С учётом (4.8) уравнение (4.5) примет вид:

$$\bar{U}_1 = (R' + p \cdot L'_1) \cdot \bar{I}_1 - R_2 \cdot \frac{L_m}{L_2} \cdot \bar{\Psi}_2 - j \cdot \frac{L_m}{L_2} \cdot (\omega_\kappa - z_p \cdot \omega) \cdot \bar{\Psi}_2 + j \cdot \omega_\kappa \cdot \left(L'_1 \cdot \bar{I}_1 + \frac{L_m}{L_2} \cdot \bar{\Psi}_2 \right)$$

Выражая векторы через составляющие по осям x , y вращающейся системы координат, т.е. выделяя вещественную и мнимую части, имеем:

$$U_{1x} = (R' + pL'_1) \cdot I_{1x} - R_2 \cdot \frac{L_m}{L_2} \cdot \Psi_{2x} - L'_1 \cdot \omega_\kappa \cdot I_{1y} - z_p \cdot \frac{L_m}{L_2} \cdot \omega \cdot \Psi_{2y}; \quad (4.9)$$

$$U_{1y} = (R' + pL'_1) \cdot I_{1y} - R_2 \cdot \frac{L_m}{L_2} \cdot \Psi_{2y} + L'_1 \cdot \omega_\kappa \cdot I_{1x} + z_p \cdot \frac{L_m}{L_2} \cdot \omega \cdot \Psi_{2x}. \quad (4.10)$$

Вообще говоря $U = e_{\partial s} + i \cdot R + L \cdot \frac{di}{dt}$, поэтому в формулах (4.9) и (4.10)

можно выделить соответствующие внутренней ЭДС двигателя по осям x и y :

$$e_{\partial ax} = - \left[R_2 \cdot \frac{L_m}{L_2} \cdot \Psi_{2x} - L_1 \cdot \omega_\kappa \cdot I_{1y} - \frac{L_m}{L_2} \cdot z_p \cdot \omega \cdot \Psi_{2y} \right];$$

$$e_{\partial ay} = - \left[R_2 \cdot \frac{L_m}{L_2} \cdot \Psi_{2y} + L_1 \cdot \omega_\kappa \cdot I_{1x} + \frac{L_m}{L_2} \cdot z_p \cdot \omega \cdot \Psi_{2x} \right].$$

Подставив, получим:

$$\bar{U}_2 = \left(\frac{R_2}{L_2} + p \right) \cdot \bar{\Psi}_2 - R_2 \cdot \frac{L_m}{L_2} \cdot \bar{I}_1 + j \cdot (\omega_\kappa - z_p \cdot \omega) \cdot \bar{\Psi}_2.$$

Раскладывая вектор на скаляры в системе x , y , получим:

$$U_{2x} = \left(\frac{R_2}{L_2} + p \right) \cdot \Psi_{2x} - R_2 \cdot \frac{L_m}{L_2} \cdot I_{1x} - (\omega_\kappa - z_p \cdot \omega) \cdot \Psi_{2y}; \quad (4.11)$$

$$U_{2y} = \left(\frac{R_2}{L_2} + p \right) \cdot \Psi_{2y} - R_2 \cdot \frac{L_m}{L_2} \cdot I_{1y} + (\omega_\kappa - z_p \cdot \omega) \cdot \Psi_{2x}. \quad (4.12)$$

Уравнения (4.9) - (4.12) – уравнения электрического равновесия цепей статора и ротора – дополним уравнением электромагнитного момента:

$$M = \frac{3}{2} \cdot z_p \cdot \frac{L_m}{L_2} \cdot (\Psi_{2x} \cdot I_{1y} - \Psi_{2y} \cdot I_{1x}) \quad (4.13)$$

и уравнением движения

$$M - M_c = J \cdot \frac{d\omega}{dt} \quad (4.14)$$

Уравнения (4.9) - (4.14) позволяют построить математическую модель асинхронной машины в общем случае в системе координат, вращающейся с произвольной скоростью ω_k . Для асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором $U_{2x} = U_{2y} = 0$.

Математическая модель асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором может быть реализована либо путём численного решения дифференциальных уравнений, либо путём имитационного моделирования по структурной схеме.

Система дифференциальных уравнений в системе координат, вращающейся с произвольной скоростью ω_k , имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dI_{1x}}{dt} &= \frac{1}{L'_1} \cdot U_{1x} - \frac{R'_1}{L'_1} \cdot I_{1x} + \frac{R_2}{L'_1} \cdot \frac{L_m}{L_2} \cdot \Psi_{2x} + \omega_k \cdot I_{1y} + \frac{L_m}{L'_1 \cdot L_2} \cdot z_p \cdot \omega \cdot \Psi_{2y} \\ \frac{dI_{1y}}{dt} &= \frac{1}{L'_1} \cdot U_{1y} - \frac{R'_1}{L'_1} \cdot I_{1y} + \frac{R_2}{L'_1} \cdot \frac{L_m}{L_2} \cdot \Psi_{2y} - \omega_k \cdot I_{1x} - \frac{L_m}{L'_1 \cdot L_2} \cdot z_p \cdot \omega \cdot \Psi_{2x} \\ \frac{d\Psi_{2x}}{dt} &= -\frac{R_2}{L_2} \cdot \Psi_{2x} + R_2 \cdot \frac{L_m}{L_2} \cdot I_{1x} + (\omega_k - z_p \cdot \omega) \cdot \Psi_{2y} \\ \frac{d\Psi_{2y}}{dt} &= -\frac{R_2}{L_2} \cdot \Psi_{2y} + R_2 \cdot \frac{L_m}{L_2} \cdot I_{1y} - (\omega_k - z_p \cdot \omega) \cdot \Psi_{2x} \\ \frac{d\omega}{dt} &= \frac{1}{J} \cdot \left[\frac{3}{2} \cdot \frac{L_m}{L_2} \cdot z_p (\Psi_{2x} \cdot I_{1y} - \Psi_{2y} \cdot I_{1x}) - M_c \right] \end{aligned} \right\} \cdot (4.15)$$

При $\omega_k=0$ система (4.15) представляет собой математическую модель АД в неподвижной системе координат.

С помощью расчётных параметров двигателя, а также решения системы дифференциальных уравнений математической модели асинхронного двигателя осуществим прямой пуск двигателя в среде MathCAD.

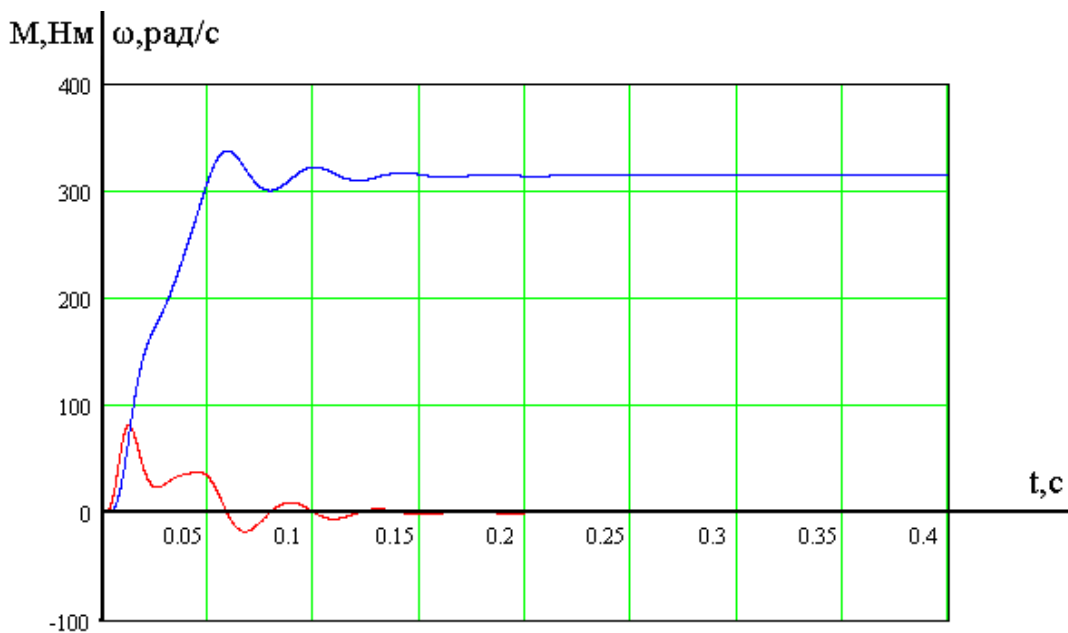


Рисунок 4.2 – Переходные процессы прямого пуска двигателя $\omega(t)$ и $M(t)$

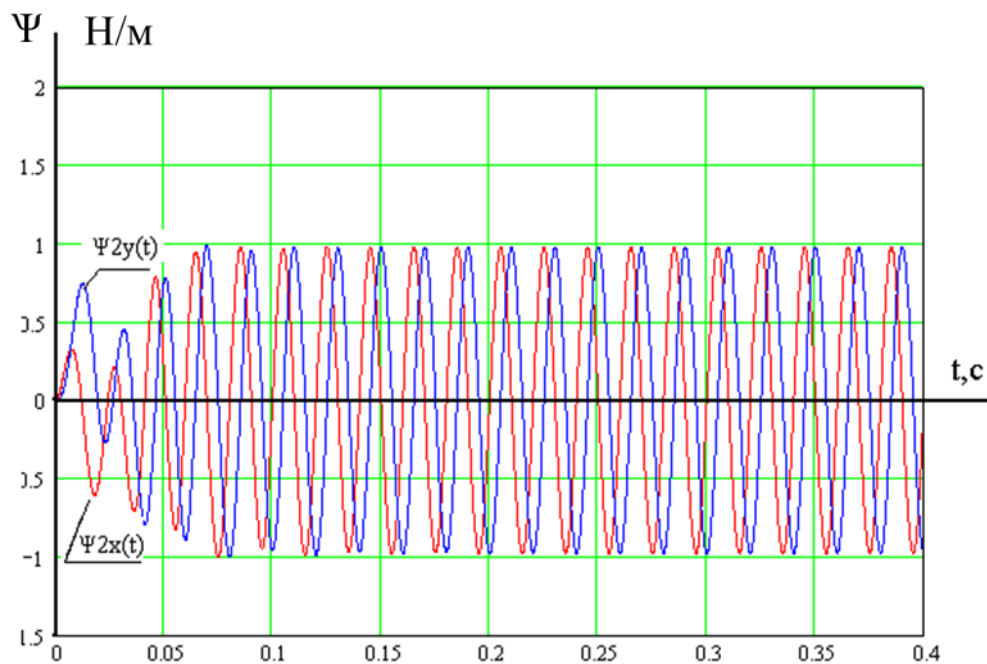


Рисунок 4.3 – Переходные процессы прямого пуска двигателя $\Psi_{2x}(t)$ и $\Psi_{2y}(t)$

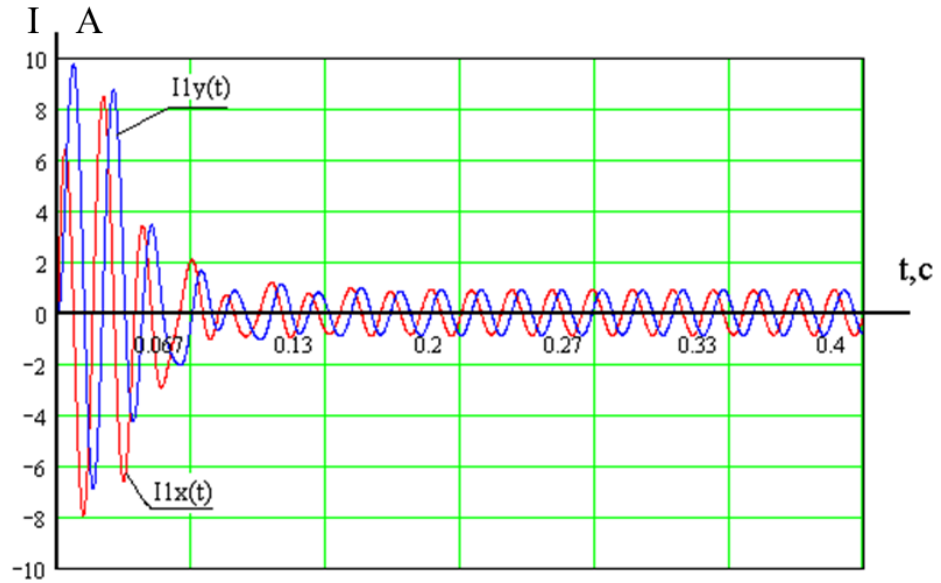


Рисунок 4.4 – Переходные процессы прямого пуска двигателя

$$I_{1x}(t) \text{ и } I_{1y}(t)$$

Система уравнений для составления структурной схемы АД с короткозамкнутым ротором в системе координат, вращающейся со скоростью ω_k , имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} U_{1x} &= R' \cdot (T_1 \cdot p + 1) \cdot I_{1x} - \frac{K_2}{T_2} \cdot \Psi_{2x} - L_1' \cdot \omega_k \cdot I_{1y} - \frac{L_m}{L_2} \cdot z_p \cdot \omega \cdot \Psi_{2y} \\ U_{1y} &= R' \cdot (T_1 \cdot p + 1) \cdot I_{1y} - \frac{K_2}{T_2} \cdot \Psi_{2y} + L_1' \cdot \omega_k \cdot I_{1x} + \frac{L_m}{L_2} \cdot z_p \cdot \omega \cdot \Psi_{2x} \\ 0 &= (T_2 \cdot p + 1) \cdot \Psi_{2x} - L_m \cdot I_{1x} - T_2 \cdot (\omega_k - z_p \cdot \omega) \cdot \Psi_{2y} \\ 0 &= (T_2 \cdot p + 1) \cdot \Psi_{2y} - L_m \cdot I_{1y} + T_2 \cdot (\omega_k - z_p \cdot \omega) \cdot \Psi_{2x} \\ M &= \frac{3}{2} \cdot K_2 \cdot z_p \cdot (\Psi_{2x} \cdot I_{1y} - \Psi_{2y} \cdot I_{1x}) \\ p \cdot \omega &= \frac{1}{J} \cdot (M - M_c) \end{aligned} \right\}, \quad (4.16)$$

где $K_2 = \frac{L_m}{L_2}$; $T_2 = \frac{L_2}{R_2}$; $T_1 = \frac{L_1'}{R'} = \frac{\sigma \cdot L_1}{R'}$; $R' = R_1 + R_2 \cdot \frac{L_m^2}{L_2^2}$; $\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_1 \cdot L_2}$; $L' = \sigma \cdot L_1$.

Структурная схема двигателя во вращающейся системе координат приведена на рисунке 4.5.

Если во вращающейся системе координат совместить ось x с вектором потокосцепления ротора, то $|\overline{\Psi}_2| = \Psi_{2x}$, $\Psi_{2y} = 0$ и система (17) приобретает вид:

$$\left. \begin{aligned}
 I_{1x} &= \frac{1/R'}{T_1 \cdot p + 1} \cdot \left[U_{1x} + \frac{K_2}{T_2} \cdot \Psi_{2x} + L_1' \cdot \omega_\kappa \cdot I_{1y} \right] \\
 I_{1y} &= \frac{1/R'}{T_1 \cdot p + 1} \cdot \left[U_{1y} - K_2 \cdot z_p \cdot \omega \cdot \Psi_{2x} - L_1' \cdot \omega_\kappa \cdot I_{1x} \right] \\
 \Psi_{2x} &= \frac{L_m}{T_2 \cdot p + 1} \cdot I_{1x} \\
 \omega_\kappa &= z_p \cdot \omega + \frac{L_m}{T_2} \cdot \frac{I_{1y}}{\Psi_{2x}} \\
 M &= \frac{3}{2} \cdot K_2 \cdot z_p \cdot \Psi_{2x} \cdot I_{1y} \\
 \omega &= \frac{1}{J \cdot p} \cdot (M - M_c)
 \end{aligned} \right\} \quad (4.17)$$

В этом случае структурная схема приобретает вид, представленный на рисунке 4.6

Параметры структурной схемы приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Параметры структурной схемы

$R', \text{ Ом}$	$L', \text{ Гн}$	$T_1, \text{ с}$	$T_2, \text{ с}$	K_2	z_p
22.741	0.087	0,00384	0.067	0.93517	1

В структурной схеме на рисунке 4.4 можно выделить 2 канала регулирования:

- потокосцепления $\Psi_{2x} (U_{1x} \rightarrow \Psi_{2x})$;
- тока $(U_{1y} \rightarrow I_{1y})$.

Как видно из структурной схемы рис 4.5 и выражений 4.4, если скомпенсировать составляющие ЭДС двигателя по осям x и y

$$e_{\text{оax}} = -\frac{K_2}{T_2} \cdot \Psi_{2x} - L_1 \cdot \omega_\kappa \cdot I_{1y};$$

$$e_{\text{оay}} = K_2 \cdot z_p \cdot \omega \cdot \Psi_{2x} + L_1 \cdot \omega_\kappa \cdot I_{1x},$$

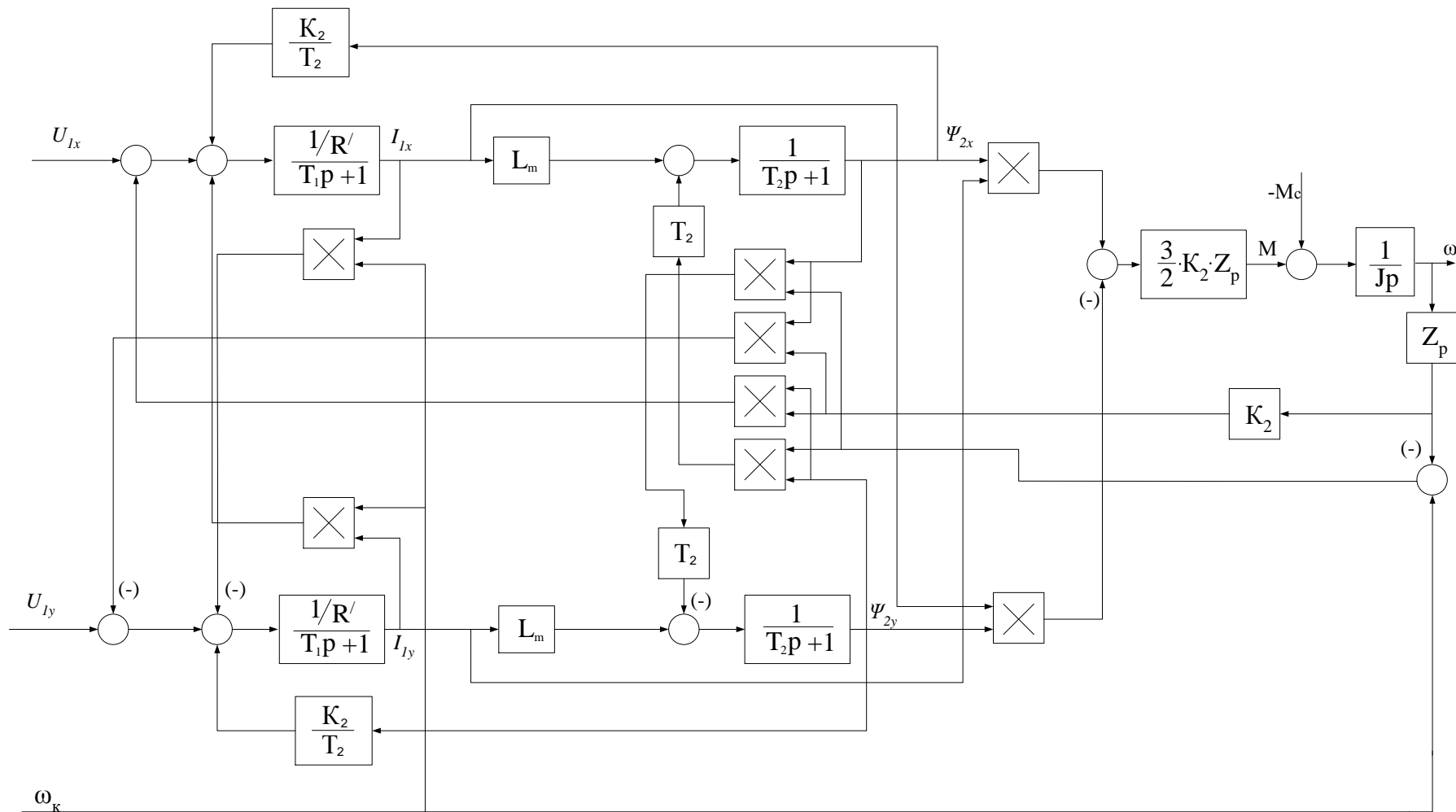


Рисунок 4.5– Структурная схема двигателя во вращающейся с произвольной скоростью ω_k системе координат

то структурная схема силового канала может быть представлена, как показано на рисунке 4.5. Тогда систему автоматического управления можно представить в виде двух подсистем: САУ потокосцепления и САУ скорости.

При этих допущениях структурную схему САУ можно рассматривать в виде двух независимых САУ: САУ потокосцепления и САУ скорости. Структурная схема системы автоматического управления приведена на рисунке 4.6.

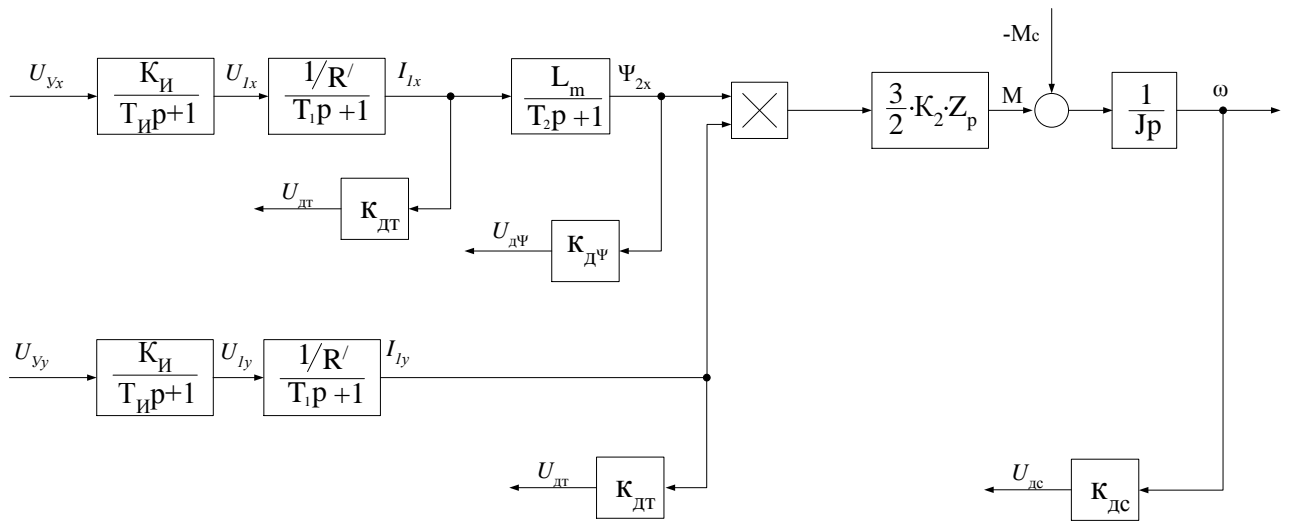


Рисунок 4.6 – Структурная схема силовой цепи

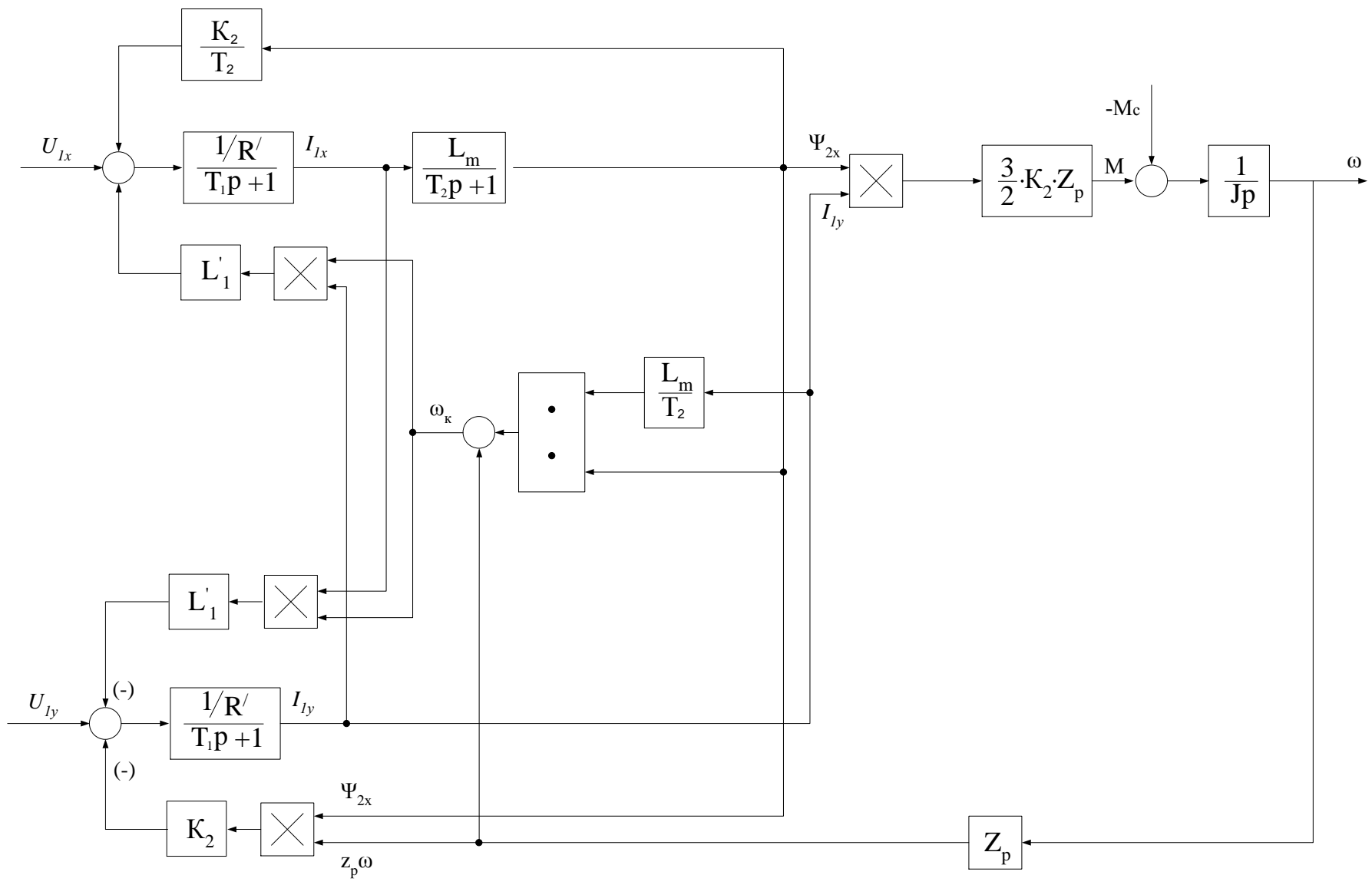


Рисунок 4.7 – Структурная схема двигателя в системе координат, вращающейся со скоростью $\omega_k = \omega_p$

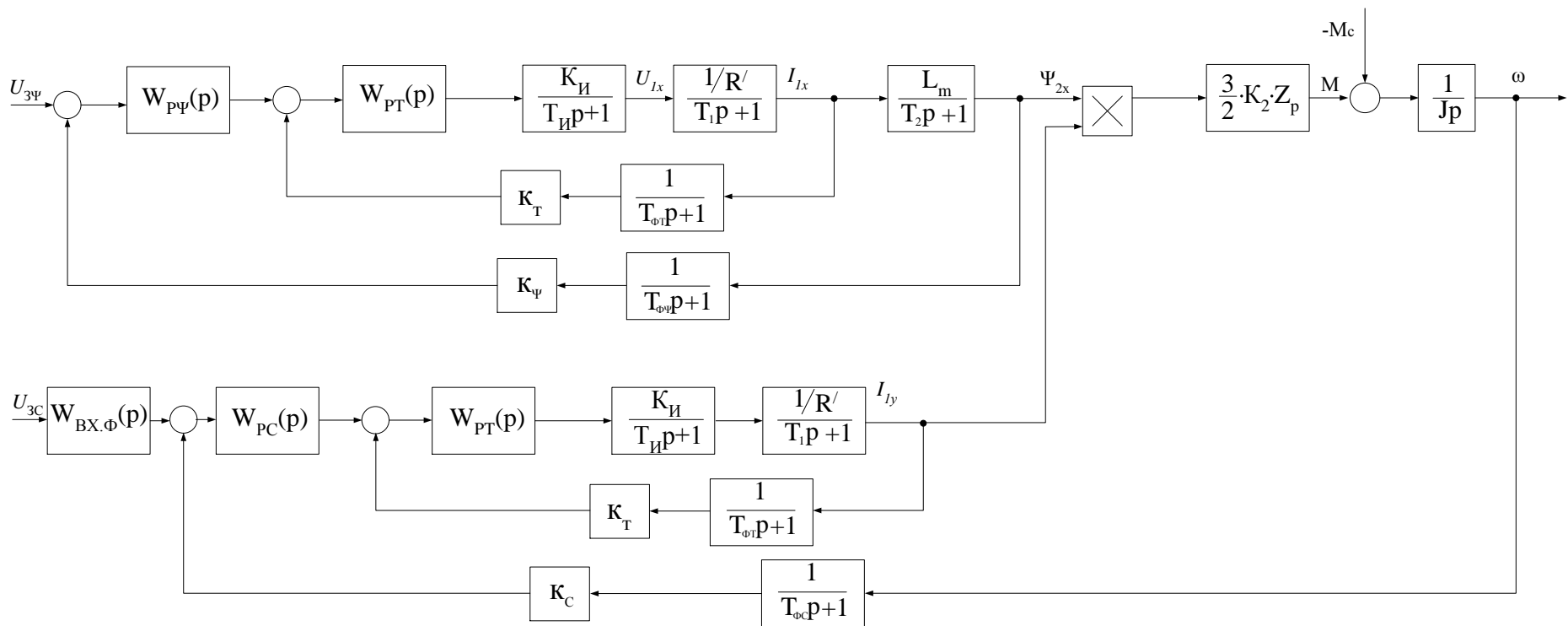


Рисунок 4.8 – Структурная схема системы автоматического регулирования

Структурная схема линеаризованной двухконтурной САР потокосцепления приведена на рисунке 4.9.

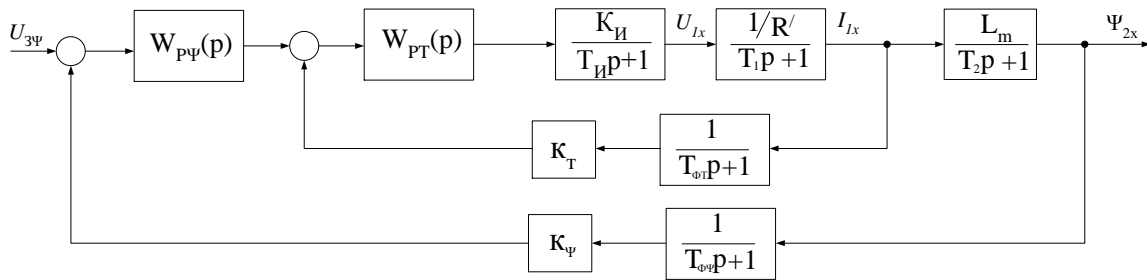


Рисунок 4.9 – Структурная схема линеаризованной двухконтурной САР потокосцепления

Оптимизация контура тока

Структурная схема контура приведена на рисунке 4.10.

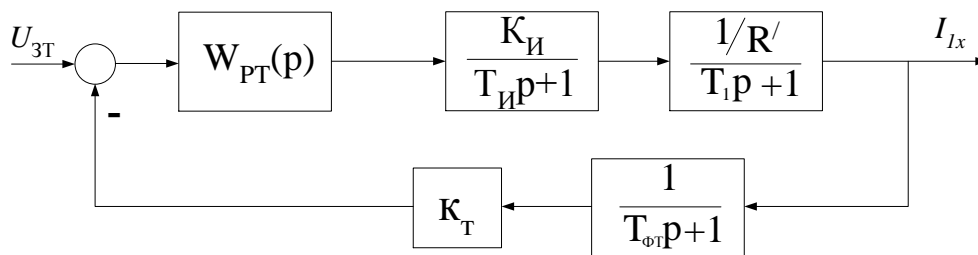


Рисунок 4.10 – Структурная схема контура тока

Контур содержит:

- аperiodическое звено с большой постоянной времени

$$T_1 = 0.00384 \text{ с ;}$$

- аperiodическое звено с малой постоянно времени в прямом канале

$$T_{И} = \frac{0.5}{f_{инв}} = \frac{0.5}{8 \cdot 10^3} = 0.0000625 \text{ с ,}$$

где $f_{инв} = 8 \text{ кГц}$ – частота инвертора;

- аperiodическое звено с малой постоянной времени в цепи обратной связи

$$T_{ФТ} = \frac{T_{P.KT}}{3} = \frac{0.001}{3} = 0.000333 \text{ с}$$

где $T_{p,KT}$ – время обчёта токового контура [5].

В качестве малой некомпенсируемой постоянной времени принимаем $T_{\mu T} = T_H + T_{\phi T} = 0,0000625 + 0,000333 = 0,000395 \text{ с}$

Для оптимизации по модульному оптимуму (МО) принимаем ПИ – регулятор тока с передаточной функцией

$$W_{pT}(p) = k_{pT} \cdot \frac{T_{pT} \cdot p + 1}{T_{pT} \cdot p},$$

где $T_{pT} = T_1 = 0,00384 \text{ с}$ – постоянная времени регулятора;

$$k_{pT} = \frac{T_1 \cdot R'}{k_H \cdot k_T \cdot a_T \cdot T_{\mu T}} = \frac{0,00384 \cdot 22.741}{31,1 \cdot 1.389 \cdot 2 \cdot 0,00395} = 2,557 \quad \text{– коэффициент усиления}$$

регулятора;

$$k_T = \frac{U_{зт.макс}}{I_{макс}} = \frac{10}{7,2} = 1.389 \frac{\text{В}}{\text{А}} \quad \text{– коэффициент обратной связи по току;}$$

$U_{зт.макс}$ – максимальное напряжение задания на ток $U_{зт.макс} = 10 \text{ В}$;

$a_T = 2$ – коэффициент оптимизации контура тока по МО.

$I_{макс} = 7,2 \text{ А}$ – максимальный кратковременный ток преобразователя (см. таблицу 2.4).

Ожидаемые показатели работы замкнутого контура тока:

$\sigma = 4,3\%$ – перерегулирование;

$$t_{py1}^{(5)} = 4,1 \cdot T_{\mu T} = 4,1 \cdot 0,000395 = 0,0016195 \text{ с} \quad \text{– время первого}$$

согласования;

$$t_{py2}^{(5)} = 4,1 \cdot T_{\mu T} = 4,1 \cdot 0,000395 = 0,0016195 \text{ с} \quad \text{– время переходного}$$

процесса при отработке ступенчатого управляющего задания;

$$\omega_n^{(м)} = \omega_n^{(\phi)} = \frac{0,71}{T_{\mu T}} = \frac{0,71}{0,000395} = 1797,47 \frac{\text{рад}}{\text{с}} \quad \text{– полоса пропускания по}$$

модулю и фазе. $f_n^{(м)} = f_n^{(\phi)} = 286 \text{ Гц}$

Передаточная функция разомкнутого контура тока:

$$W_{раз.Т}(p) = \frac{1}{a_T \cdot T_{II} \cdot T_{\phi T} \cdot (T_{II} + T_{\phi T}) \cdot p^3 + a_T \cdot (T_{II} + T_{\phi T}) \cdot p^2 + a_T \cdot (T_{II} + T_{\phi T}) \cdot p}$$

Передаточная функция замкнутого контура тока:

$$W_{зам.Т}(p) = \frac{1/\kappa_T \cdot (T_{\phi T} \cdot p + 1)}{a_T \cdot T_{II} \cdot T_{\phi T} \cdot (T_{II} + T_{\phi T}) \cdot p^3 + a_T \cdot (T_{II} + T_{\phi T}) \cdot p^2 + a_T \cdot (T_{II} + T_{\phi T}) \cdot p + 1}$$

При установке на входе контура фильтра с передаточной функцией:

$$W_{\phi.ВХ.Т}(p) = \frac{1}{T_{\phi.ВХ.Т} \cdot p + 1}$$

и выборе $T_{\phi.ВХ.Т} = T_{\phi T}$

$$W_{зам.Т}(p) = \frac{1/\kappa_T}{a_T \cdot T_{II} \cdot T_{\phi T} \cdot (T_{II} + T_{\phi T}) \cdot p^3 + a_T \cdot (T_{II} + T_{\phi T}) \cdot p^2 + a_T \cdot (T_{II} + T_{\phi T}) \cdot p + 1} \approx$$

$$\approx \frac{1/\kappa_T}{a_T \cdot (T_{II} + T_{\phi T}) \cdot p + 1} = \frac{1/\kappa_T}{T_{ТЭ} \cdot p + 1},$$

где $T_{ТЭ} = a_T \cdot (T_{II} + T_{\phi T}) = 2 \cdot (0,0000625 + 0,000333) = 0,00079$ с

По структурной схеме контура тока составляется имитационная модель, представленная на рисунке 4.11.

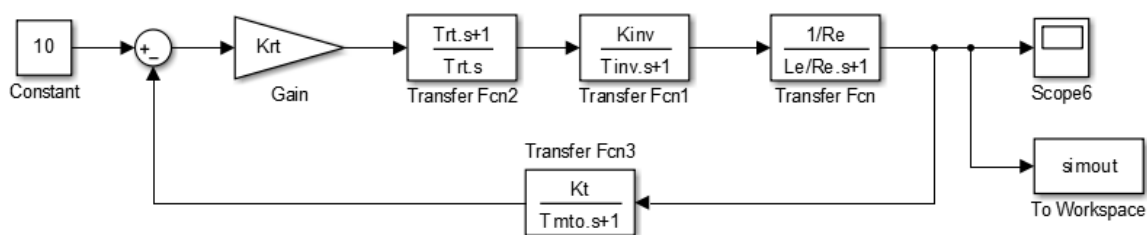


Рисунок 4.11 - Имитационная модель контура тока

Расчёт параметров имитационной модели структурной схемы (рис.4.11).

```
%Параметры двигателя
f=50;
Rs=12.505;
Rr=11.705;
```

```

Ls_=12.828/(2*pi*f);
Lr_=17.188/(2*pi*f);
Lm=258.74/(2*pi*f);
p=4;
J=0.02;
Ls=Ls_+Lm;
Lr=Lr_+Lm;
zp=p/2;

Kr=Lm/Lr;
Re=Rs+Rr*Kr^2;
Le=Ls-Lm^2/Lr;
Uamp=220*sqrt(2);
Ar=Rr/Lr;
Wref=2*pi*f;

%ОПТИМИЗАЦИЯ
Kinv=31.1;
finv=8000;
Tinv=0.5/finv;
Tmto=0.000312;
Kt=10/5.6;
Te=Le/Re;
Krt=(Te*Re)/(Kinv*Kt*2*(Tmto+Tinv));
Trt=Te;
Tmto=0.0025;
Kp=10;
Krp=(Kt)/(Kp*Kr*Rr*2*(Tmto+2*(Tmto+Tinv)));
Trp=1/Ar;
Kc=10/148.627;
Tmco=0.0012;
Krc=(J*Kt)/(2*(Tmco+2*(Tmto+Tinv))*Kc*Kr*zp^3/2);
Trc=2*2*(Tmco+2*(Tmto+Tinv));

```

Результаты моделирования переходных процессов в контуре тока, настроенного на модульном оптимуме при обработке ступенчатого входного воздействия $U_{ст} = 10$ В приведены в виде переходной характеристики $i(t)$ на рисунке 4.12.

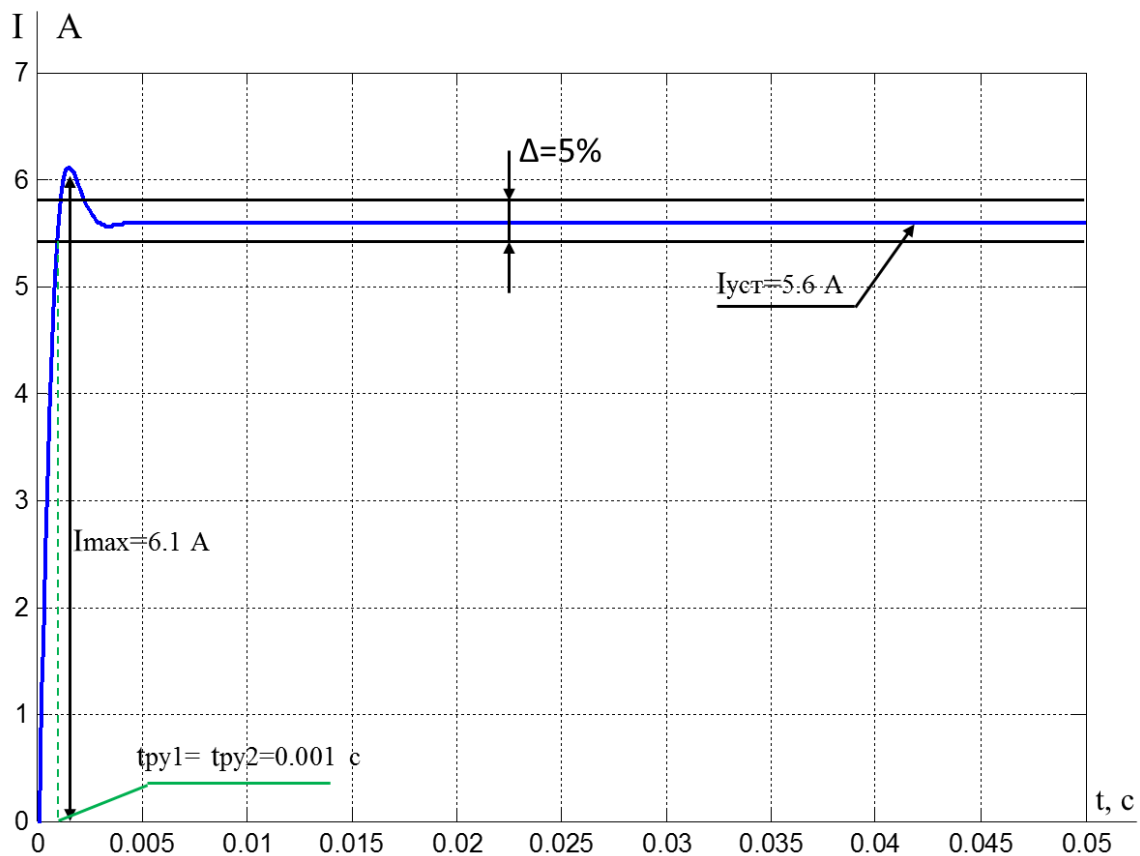


Рисунок 4.12 - Переходная характеристика $i(t)$ контура тока

Для наглядности сведем результаты моделирования в таблицу 4.2.

Таблица 4.2 – Показатели работы контура тока

Показатели	Ожидаемые	Полученные
$\sigma, \%$	4,3	2,8
$t_{py1}^{(5)} = t_{py2}^{(5)}, c$	0,0016195	0,001

Анализ полученных результатов моделирования показывает, что переходные процессы тока при пуске не превышают ожидаемые показатели, что соответствует правилам настройки асинхронных приводов с векторным управлением.

Оптимизация контура потокосцепления

Структурная схема контура потокосцепления приведена на рисунке 4.13.

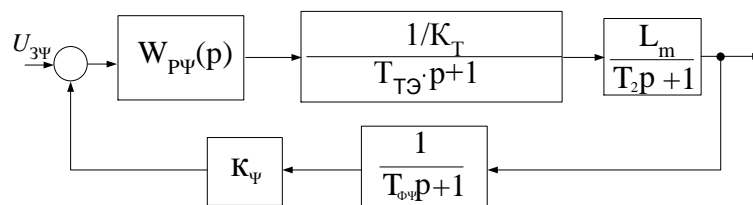


Рисунок 4.13 – Структурная схема контура потокосцепления

Для усреднения результатов расчета потокосцепления в цепи обратной связи контура установлен фильтр с передаточной функцией [5]

$$W_{\Phi\Psi}(p) = \frac{1}{T_{\Phi\Psi} \cdot p + 1} = \frac{1}{0,000333 \cdot p + 1} ,$$

$$T_{\Phi\Psi} = T_{\Phi T} = \frac{T_{P.K\Psi}}{3} = \frac{0,001}{3} = 0,000333 \text{ с} - \text{ постоянная времени фильтра,}$$

где $T_{P.K\Psi}$ – время обсчёта контура [5].

Контур содержит:

- апериодическое звено с большой постоянной времени $T_2 = 0,067 \text{ с}$;
- апериодическое звено в цепи обратной связи с малой постоянной

$$\text{времени } T_{\Phi\Psi} = T_{\Phi T} = \frac{T_{P.K\Psi}}{3} = \frac{0,001}{3} = 0,000333 \text{ с} ;$$

- апериодическое звено второго порядка, представляющее замкнутый оптимизированный контур тока, которое в первом приближении представим инерционным звеном первого порядка с малой постоянной времени $a_T \cdot T_{\text{ит}} = T_{ТЭ} = 0,00079 \text{ с}$.

В качестве малой некомпенсируемой постоянной времени принимаем

$$T_{\text{ит}} = T_{ТЭ} + T_{\Phi\Psi} = 0,00079 + 0,000333 = 0,001123 \text{ с} .$$

Коэффициент обратной связи по потокосцеплению

$$k_{\Psi} = \frac{U_{\text{з}\Psi \text{ макс}}}{\Psi_{2\text{ макс}}} = \frac{U_{\text{з}\Psi \text{ макс}}}{\frac{\sqrt{2} \cdot U_H}{2 \cdot \pi \cdot f_H}} = \frac{10}{1} = 10 \frac{B}{Bб} .$$

Контур потокосцепления настраиваем на МО. С учетом параметров контура выбираем ПИ – регулятор с передаточной функцией

$$W_{p\Psi}(p) = k_{p\Psi} \cdot \frac{T_{p\Psi} \cdot p + 1}{T_{p\Psi} \cdot p},$$

где

$$k_{p\Psi} = \frac{\kappa_T \cdot T_2}{\kappa_\Psi \cdot L_m \cdot a_c \cdot T_{\mu\Psi}} = \frac{1,389 \cdot 0,067}{10 \cdot 0,7365 \cdot 2 \cdot 0,001123} = 5,626 \text{ – коэффициент регулятора}$$

потокосцепления;

$T_{p\Psi} = T_2 = 0,067 \text{ с}$ – постоянная времени регулятора потокосцепления.

Передаточная функция разомкнутого контура потокосцепления:

$$W_{\text{раз.}\Psi}(p) = \frac{1}{a_C \cdot a_T \cdot T_{\mu\Psi} \cdot T_{\mu T} \cdot T_{\Phi\Psi} \cdot p^3 + a_C \cdot T_{\mu\Psi} \cdot (a_T \cdot T_{\mu T} + T_{\Phi\Psi}) \cdot p^2 + a_C \cdot T_{\mu\Psi} \cdot p}$$

Передаточная функция замкнутого контура потокосцепления:

$$W_{\text{замк.}\Psi}(p) = \frac{1/\kappa_\Psi \cdot (T_{\Phi\Psi} \cdot p + 1)}{a_C \cdot a_T \cdot T_{\mu\Psi} \cdot T_{\mu T} \cdot T_{\Phi\Psi} \cdot p^3 + a_C \cdot T_{\mu\Psi} \cdot (a_T \cdot T_{\mu T} + T_{\Phi\Psi}) \cdot p^2 + a_C \cdot T_{\mu\Psi} \cdot p + 1}$$

При установке на входе фильтра с передаточной функцией

$$W_{\Phi.BX.\Psi}(p) = \frac{1}{T_{\Phi.BX.\Psi} \cdot p + 1} = \frac{1}{T_{\Phi\Psi} \cdot p + 1}$$

Передаточная функция замкнутого контура потокосцепления будет

иметь

вид:

$$W_{\text{замк.}\Psi}(p) = \frac{1/\kappa_\Psi}{a_C \cdot a_T \cdot T_{\mu\Psi} \cdot T_{\mu T} \cdot T_{\Phi\Psi} \cdot p^3 + a_C \cdot T_{\mu\Psi} \cdot (a_T \cdot T_{\mu T} + T_{\Phi\Psi}) \cdot p^2 + a_C \cdot T_{\mu\Psi} \cdot p + 1}$$

Ожидаемые показатели работы замкнутого контура скорости,

настроенного на МО

$\sigma = 8,1\%$ - перерегулирование;

$t_{\text{py1}}^{(5)} = 7 \cdot T_{\mu\Psi} = 7 \cdot 0,001123 = 0,007861 \text{ с}$ - время первого согласования;

$t_{\text{py2}}^{(5)} = 12 \cdot T_{\mu\Psi} = 12 \cdot 0,001123 = 0,013476 \text{ с}$ - время переходного процесса

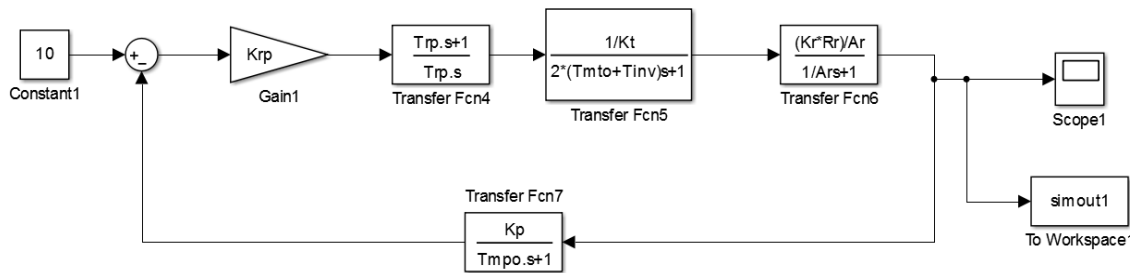
при отработке ступенчатого управляющего задания;

$$\omega_{\Pi}^{(M)} = \frac{0,5}{T_{\mu\Psi}} = \frac{0,5}{0,001123} = 445,23 \frac{\text{рад}}{\text{с}} \quad \text{- полоса пропускания по модулю;}$$

$$f_{\Pi}^{(M)} = 71,23 \text{ Гц}$$

$$\omega_{\Pi}^{(\Phi)} = \frac{0,35}{T_{\mu\Psi}} = \frac{0,35}{0,001123} = 311,665 \frac{\text{рад}}{\text{с}} \quad \text{-полоса пропускания по фазе.}$$

По структурной схеме контура скорости (см. рисунок 4.6) составляется имитационная модель, представленная на рисунке 4.14.



Рисунке 4.14 - Имитационная модель контура потокосцепления.

Результаты моделирования переходных процессов в контуре потокосцепления, настроенном на модульный оптимум, при отработке ступенчатого входного воздействия $U_{3\Psi} = 0,1 \text{ В}$ приведены в виде переходных характеристик $\Psi(t)$ и $I(t)$ на рисунке 4.15.

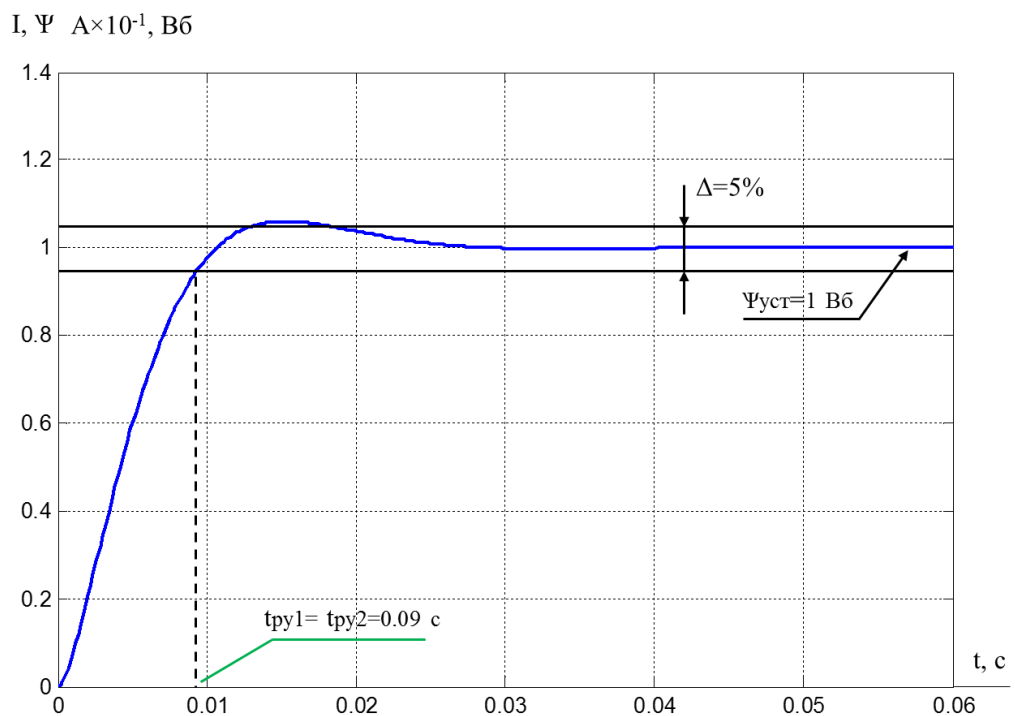


Рисунок 4.15 – Переходные характеристики $\Psi(t)$ и $i(t)$
контура потокосцепления

Таблица 4.3 – Показатели работы замкнутого контура скорости

Показатели	Ожидаемые	Полученные
$\sigma, \%$	8,1	5,1
$t_{пу1}^{(5)}, c$	0,0078361	0,003
$t_{пу2}^{(5)}, c$	0,01374	0,003

Анализ ПП в контуре потокосцепления показывает, что разница экспериментальных и ожидаемых параметров связана с наличием апериодического звена первого порядка в цепи обратной связи контура и на его входе.

Оптимизация САР скорости

Структурная схема линейризованной САР скорости приведена на рисунке 4.16.

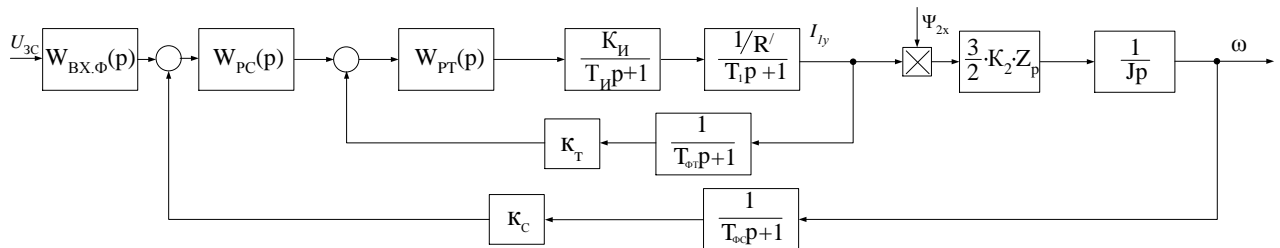


Рисунок 4.16 – Структурная схема контура скорости

Контур скорости настраиваем на СО. С учетом параметров контура выбираем ПИ – регулятор с передаточной функцией

$$W_{pc}(p) = k_{pc} \frac{T_{pc} \cdot p + 1}{T_{pc} \cdot p}, \quad \text{где } k_{pc} \text{ - коэффициент усиления регулятора.}$$

$a_c = 2$ – коэффициент оптимизации контура скорости по МО;

$T_{\mu c} = a_c \cdot T_{\mu T} + T_{\omega c} = 2 \cdot 0,000395 + 0,000333 = 0,001123 c$ – малая постоянная времени контура скорости.

$$k_c = \frac{U_{3c \text{ макс}}}{\omega_{\text{ макс}}} = \frac{10}{314,136} = 0,032 \frac{B \cdot c}{\text{рад}} \text{ – коэффициент обратной связи по скорости;}$$

$$U_{зс макс} = 10 \text{ В.}$$

$$T_{PC} = \nu_C \cdot a_C \cdot T_{\mu C} = 2 \cdot 2 \cdot 0,001123 = 0,004492 \text{ с - постоянная времени}$$

регулятора скорости;

$$K_{PC} = \frac{\kappa_T \cdot J_{\text{ЭП}}}{\frac{3}{2} \cdot K_2 \cdot Z_P \cdot K_C \cdot \Psi_{2x} \cdot a_C \cdot T_{\mu C}} = \frac{1.389 \cdot 0,0071}{\frac{3}{2} \cdot 0.93517 \cdot 1 \cdot 0.032 \cdot 1 \cdot 2 \cdot 0,001123} = 97,818$$

– коэффициент усиления регулятора скорости

$$T_{\phi C} = 0,001 \text{ с - постоянная времени фильтра в обратной связи контура.}$$

Ожидаемые показатели работы замкнутого контура скорости, настроенного на СО

$$\sigma = 6,2 \% \text{ - перерегулирование;}$$

$$t_{\text{py1}}^{(5)} = 13,6 \cdot T_{\mu T} = 13,6 \cdot 0,001123 = 0,0152728 \text{ с - время первого}$$

согласования;

$$\omega_{\text{п}}^{(M)} = \frac{0,284}{T_{\mu C}} = \frac{0,284}{0,001123} = 252,89 \frac{\text{рад}}{\text{с}} \text{ - полоса пропускания по модулю;}$$

$$f_{\text{п}}^{(M)} = 40,5 \text{ Гц}$$

$$\omega_{\text{п}}^{(\phi)} = \frac{0,18}{T_{\mu T}} = \frac{0,18}{0,001123} = 160,28 \frac{\text{рад}}{\text{с}} \text{ - полоса пропускания по фазе.}$$

$$f_{\text{п}}^{(\phi)} = 25,6 \text{ Гц}$$

По структурной схеме контура скорости строится имитационная модель, представленная на рисунке 4.17.

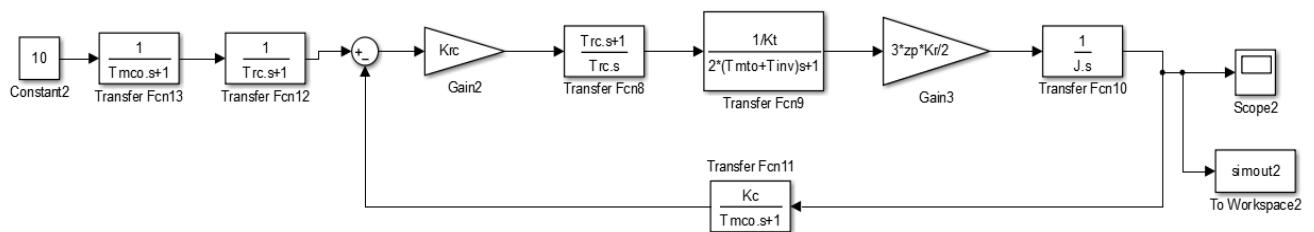


Рисунок 4.17 - Имитационная модель контура скорости

Результаты моделирования переходных процессов в контуре потокосцепления приведены на рисунке 4.18.

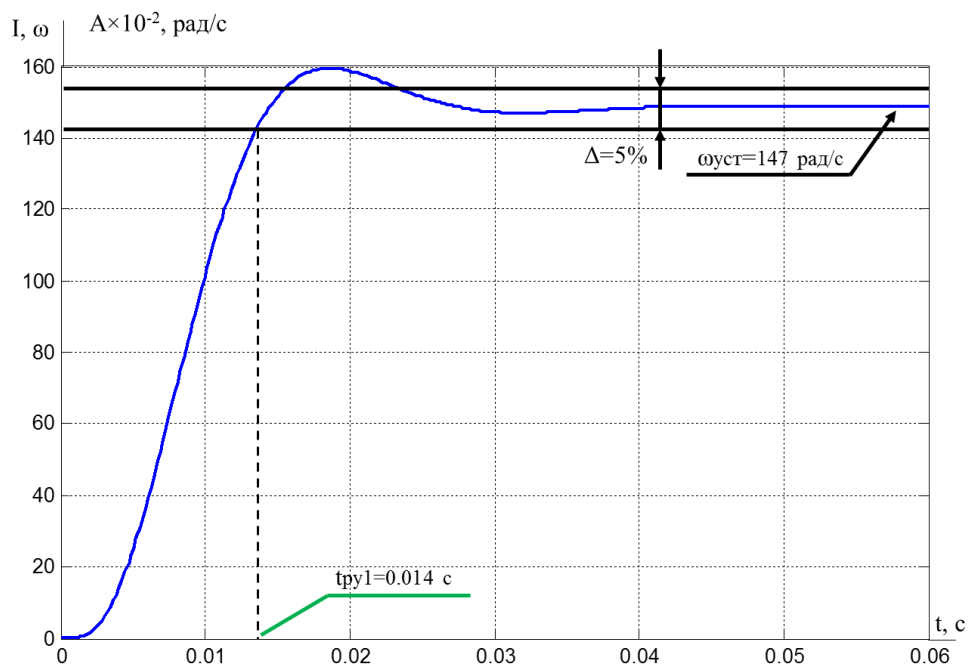


Рисунок 4.18 - Переходные характеристики $\omega(t)$ и $i(t)$
контура скорости

Таблица 4.4 – Показатели работы замкнутого контура скорости

Показатели	Ожидаемые	Полученные
$\sigma, \%$	6,2	3,1
$t_{пу1}^{(5)}, с$	0,0152728	0,014

Анализ ПП в САР скорости показывает, что имеется разница между ожидаемым и полученным результатом. Это связано с наличием апериодического звена в обратной связи и 2-х звеньев апериодического звена в цепи задания.

5 Имитационные исследования электропривода испытательного стенда

Рассмотрим векторное управление электроприводом линейной и нелинейной моделей.

На основании структурной схемы, приведённой на рисунке 4.9, в Matlab Simulink создается имитационная модель стенда с векторным линейным управлением, показанная на рисунке 5.1.

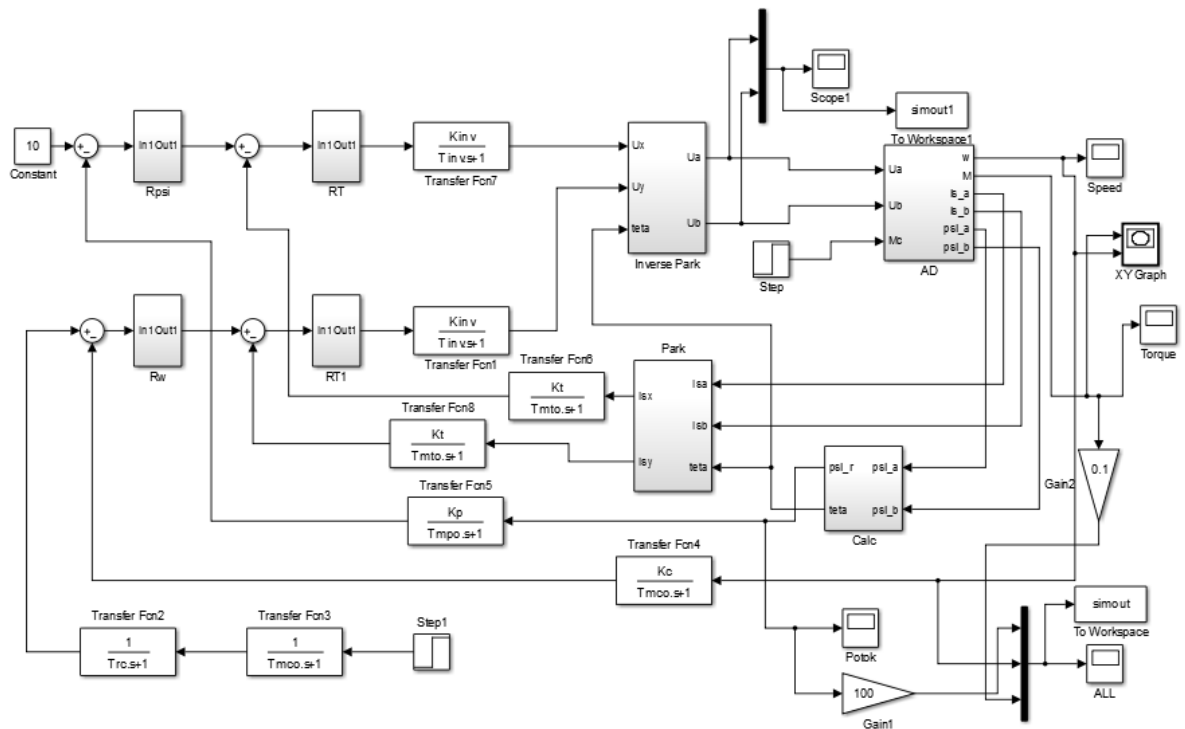


Рисунок 5.1 - Имитационная модель электропривода испытательного стенда генератора

Учтены следующие нелинейности:

- Ограничение выходного напряжения инвертора;
- Реактивный характер нагрузки $M_c \text{sign}(\omega)$
- Программа исследований включает:
 - Пуск на минимальную скорость
 - Пуск на максимальную скорость

Переходные процессы приведены на рисунке 5.2 и 5.3.

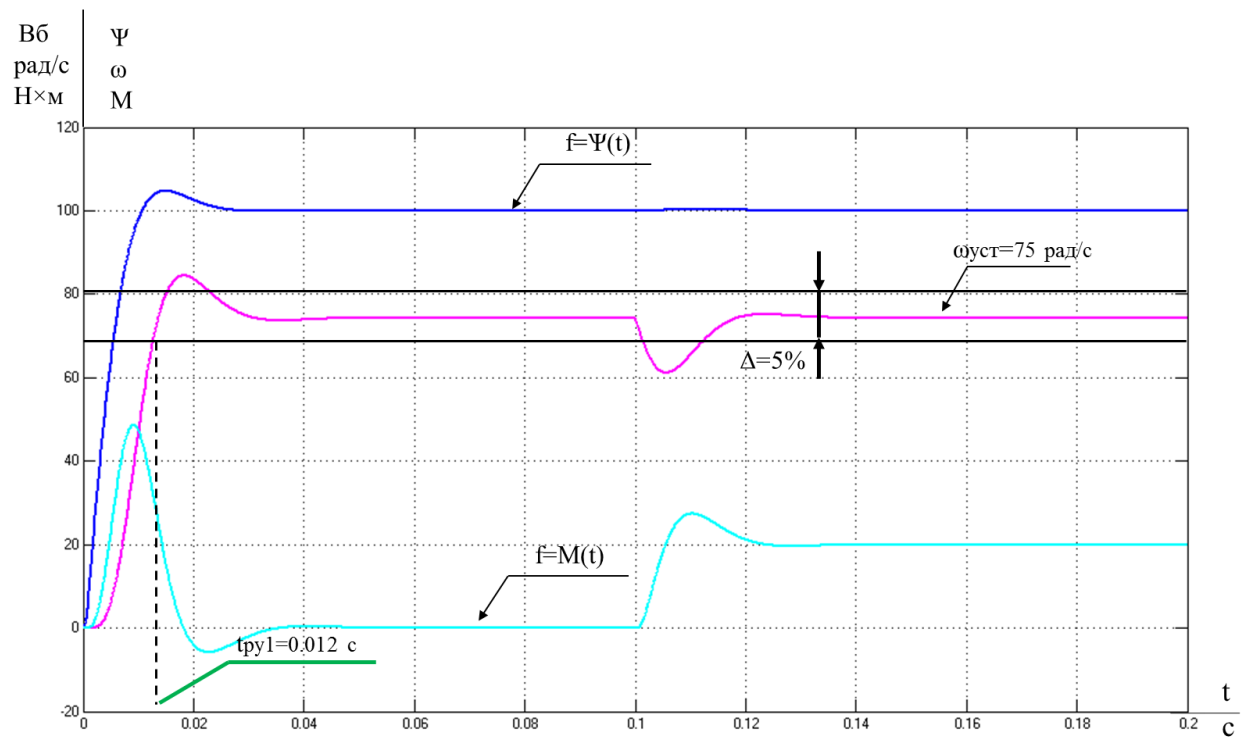


Рисунок 5.2 - Переходные процессы $\omega(t)$, $I(t)$
пуска при минимальной скорости

Анализ переходных процессов пуска при минимальной скорости показывает, что время переходного процесса составило 0.05 с, скорость вращения двигателя вышла на установившееся значение и составляет 75 рад/с.

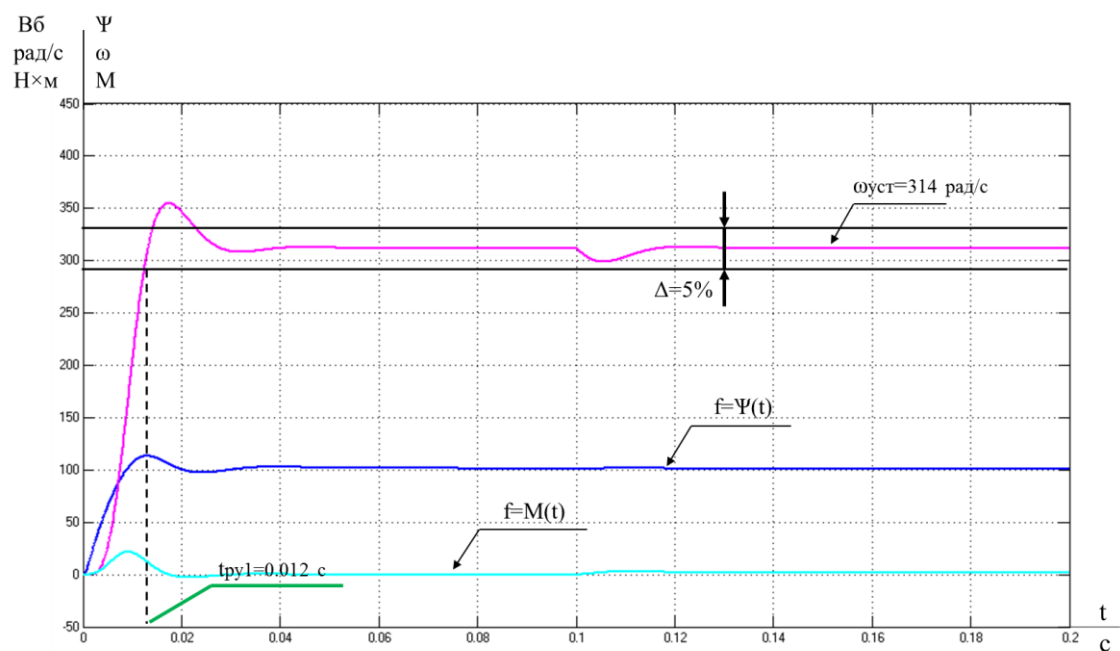


Рисунок 5.3- Переходные процессы $\omega(t)$, $I(t)$

пуска на максимальную скорость

Анализ ПП пуска на максимальную скорость показывает, что время переходного процесса составило 0.05 с, скорость вращения двигателя вышла на установившееся значение и составило 314 рад/с, что паспортным данным двигателя, представленным в таблице 2.1.

Далее произведен имитацию электропривода с векторным нелинейным управлением и произведем анализ ПП. Схема имитационной модели с векторным нелинейным управлением представлена на рисунке 5.4.

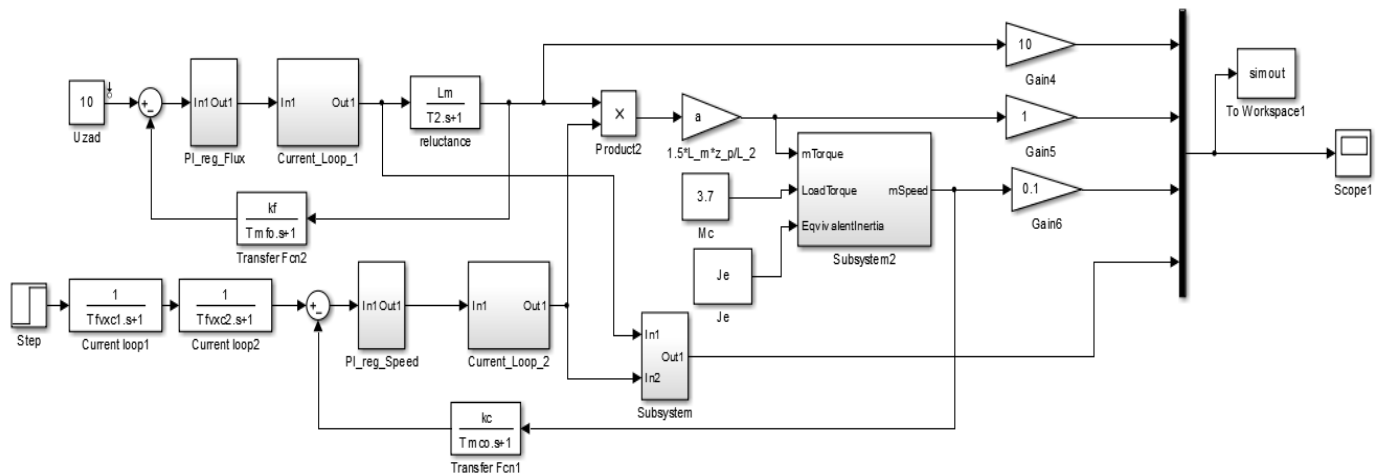


Рисунок 5.4- Имитационная модель станда с векторным нелинейным управлением

Получаем следующие графики переходных процессов, изображенных на рисунке 5.5.

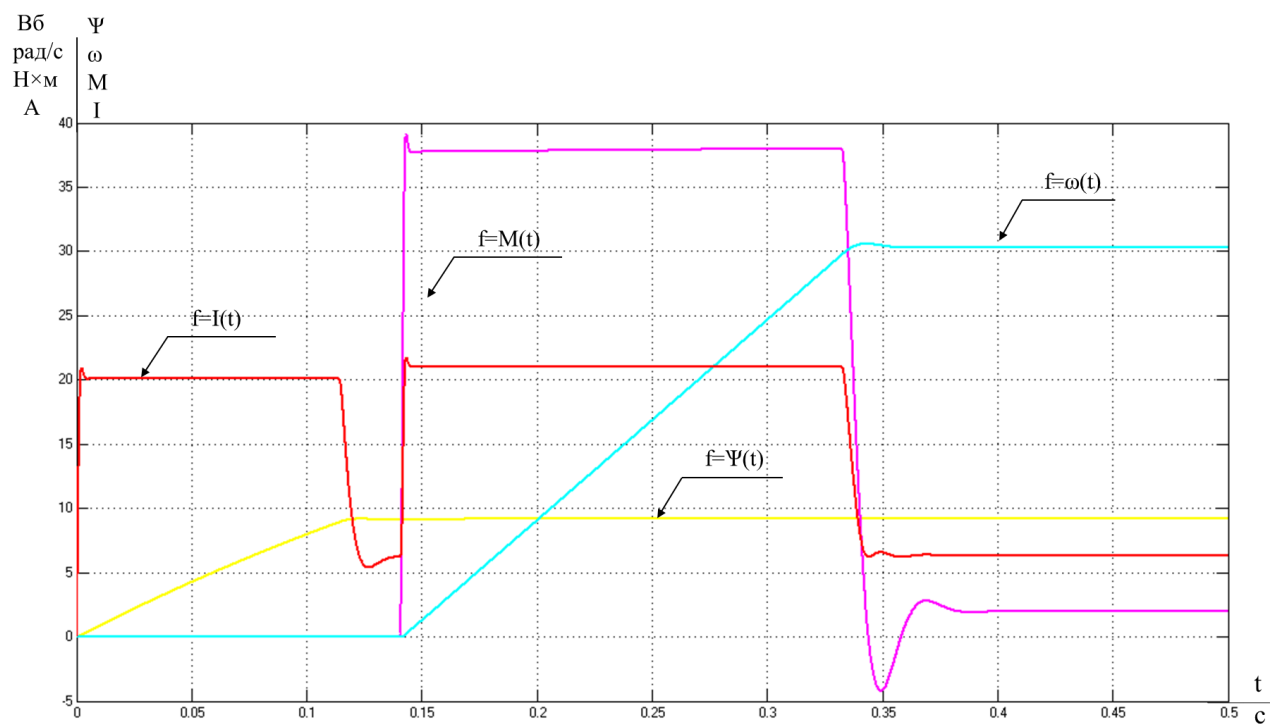


Рисунок 5.5 – График переходных процессов при максимальной скорости

Анализ ПП пуска на максимальную скорость при векторном нелинейном управлении показывает, что подача напряжения была с задержкой в 0.14 с, в начальный момент времени запуска АД произошел скачок тока, пуск плавный из-за использования системы ПЧ-АД, которая позволяет осуществлять запуск и работу двигателя плавно, без перепадов, что положительно сказывается на долговечности двигателя. Время переходного процесса составило 0.02 с. Скорость вращения двигателя вышла на установившееся значение и составило 314 рад/с, что соответствует паспортным данным двигателя, представленным в таблице 2.1.

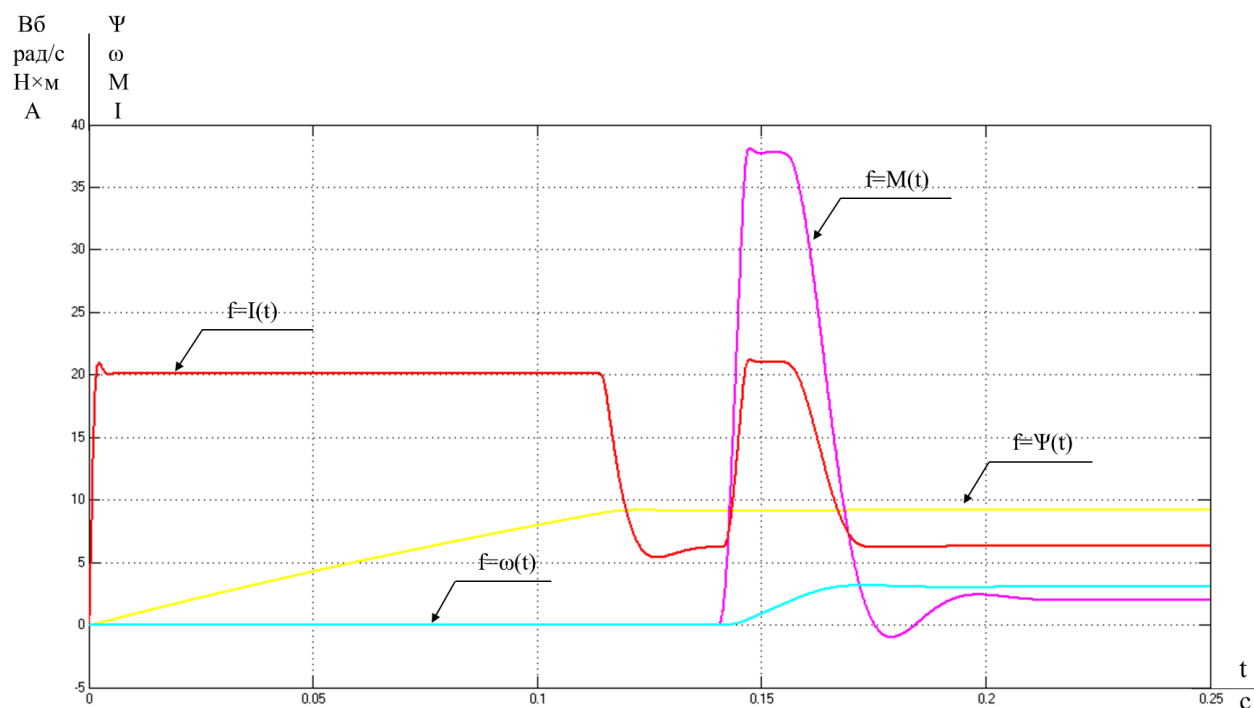


Рисунок 5.6 – График переходных процессов при минимальной скорости

Анализ ПП пуска на минимальной скорости при векторном нелинейном управлении показывает, что подача напряжения была с задержкой в 0.14 с, в начальный момент времени запуска АД произошел скачок тока, пуск плавный, скорость вращения возрастает постепенно, без колебаний из-за использования системы ПЧ-АД, которая позволяет осуществлять запуск и работу двигателя плавно, без перепадов, что положительно сказывается на долговечности двигателя. Время переходного процесса составило 0.02 с. Скорость вращения двигателя вышла на установившееся значение.

Сравнив результаты моделирования различных систем управления, делаем вывод, что броски тока и момента при пуске и в момент наброса нагрузки значительно меньше при системе с векторным управлением, что значительно увеличивает срок службы двигателя, положительно сказывается на долговечности электропривода в целом и, в свою очередь, упрощает управление двигателем, т.е. запуском, остановом, т.к. эти процессы проходят без значительных скачков при ее использовании.

6 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

В настоящее время перспективность научного исследования определяется не столько масштабом открытия, оценить которое на первых этапах жизненного цикла высокотехнологического и ресурсоэффективного продукта бывает достаточно трудно, сколько коммерческой ценностью разработки. Оценка коммерческой ценности разработки является необходимым условием при поиске источников финансирования для проведения научного исследования и коммерциализации его результатов. Это важно для разработчиков, которые должны представлять состояние и перспективы проводимых научных исследований [7, 8, 9].

Необходимо понимать, что коммерческая привлекательность научного исследования определяется не только превышением технических параметров над предыдущими разработками, но и тем, насколько быстро разработчик сумеет найти ответы на такие вопросы – будет ли продукт востребован рынком, какова будет его цена, каков бюджет научного проекта, какой срок потребуется для выхода на рынок и т.д.

Таким образом, целью раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» является определение перспективности и успешности научно-исследовательского проекта, направленного на повышение надежности испытательного стенда генератора на базе асинхронного двигателя скважного прибора. В связи с тем, что процесс бурения требует высокой точности, в скважном приборе применяются различные датчики и устройства, передающие сигнал на поверхность для корректировке угла бурения. В этом процессе участвует генератор, служащий для питания датчиков и связующих устройств. Поэтому так важно, чтобы генератор прошел все необходимые испытания и на протяжении всего своего срока службы выполнял свою работу согласно всем требованиям. Именно для

испытаний генераторов скважного прибора и применяется исследуемый испытательный стенд.

Достижение цели обеспечивается решением задач:

- оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований;
- определение возможных альтернатив проведения научных исследований, отвечающих современным требованиям в области ресурсоэффективности и ресурсосбережения;
- планирование научно-исследовательских работ;
- определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования.

С учетом решения данных задач была сформирована структура и содержание раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение».

6.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

Потенциальные потребители результатов исследования

Для анализа потребителей результатов исследования необходимо рассмотреть целевой рынок и провести его сегментирование.

В данном случае сегментирования целесообразно провести по критерию точности, т.к. требуется точное регулирование скорости двигателя для испытания генераторов скважных приборов.

А также следует выделить сегменты рынка:

- по разработке, проектированию и производству;
- по установке и пуско-наладке;

- по дальнейшему обслуживанию и ремонту.

Исходя из сегмента рынка, будет произведено сегментирование коммерческих организаций по отраслям. Сегментирование приведено в таблице 1.

Таблица 1 – Карта сегментирования рынка разработок для ЭП

	Нерегулируемый электропривод	Электропривод с тиристорным регулятором напряжения	Электропривод с преобразователем частоты
Проектирование и производство			
Окончание таблицы 7			
Установка и пуско-наладка			
Обслуживание и ремонт			
Фирма А		Фирма Б	

Результаты сегментирования:

- Основными сегментами рынка являются все виды деятельности для нерегулируемых электроприводов и электроприводов с тиристорным регулятором напряжения;
 - Наиболее сильно предприятие должно быть ориентировано на сегменты рынка связанные с проектированием и производством, установкой и пуско-наладкой электроприводов с преобразователем частоты;
 - Наиболее привлекательными сегментами рынка являются отрасли, связанные с проектированием и производством, установкой и пуско-наладкой электроприводов с преобразователем частоты.

Технология QuaD

Технология QuaD (QUality ADvisor) представляет собой гибкий инструмент измерения характеристик, описывающих качество новой разработки и ее перспективность на рынке и позволяющие принимать решение целесообразности вложения денежных средств в научно-исследовательский проект.

В основе технологии QuaD лежит нахождение средневзвешенной величины следующих групп показателей:

1) Показатели оценки коммерческого потенциала разработки:

- влияние нового продукта на результаты деятельности компании;
- перспективность рынка;
- пригодность для продажи;
- перспективы конструирования и производства;
- финансовая эффективность.
- правовая защищенность и др.

2) Показатели оценки качества разработки:

- динамический диапазон;
- вес;
- ремонтпригодность;
- энергоэффективность;
- долговечность;
- эргономичность;
- унифицированность;
- уровень материалоемкости разработки и др.

Показатели оценки качества и перспективности новой разработки подбираются исходя из выбранного объекта исследования с учетом его технических и экономических особенностей разработки, создания и коммерциализации.

Для упрощения процедуры проведения QuaD оценка проводится в табличной форме (таблица 2).

В соответствии с технологией QuaD каждый показатель оценивается экспертным путем по стобалльной шкале, где 1 – наиболее слабая позиция, а 100 – наиболее сильная. Веса показателей, определяемые экспертным путем, в сумме должны составлять 1.

Таблица 2 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (разработок)

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы		Максимальный балл	Относительное значение (3/5) (4/5)		Средневзвешенное значение (6x2)x100 (7x2)x100	
		3	4		6	7	8	9
Показатели оценки качества разработки								
1. Повышение производительности труда пользователя	0,08	93	90	100	0,93	0,9	7,44	7,2
2. Удобство в эксплуатации (соответствует требованиям потребителей)	0,1	90	87	100	0,9	0,87	9	8,7
3. Помехоустойчивость	0,05	88	85	100	0,88	0,85	4,4	4,25
4. Энергоэкономичность	0,12	93	90	100	0,93	0,9	11,1	10,8
5. Надежность	0,07	95	91	100	0,95	0,91	6,65	6,37
6. Уровень шума	0,05	85	80	100	0,85	0,8	4,25	4
7. Безопасность	0,02	85	81	100	0,85	0,81	1,7	1,62
8. Потребность в ресурсах памяти	0,03	75	77	100	0,75	0,77	2,25	2,31
9. Функциональная мощность (предоставляемые возможности)	0,05	83	81	100	0,83	0,81	4,15	4,05

10. Простота эксплуатации	0,04	97	93	100	0,97	0,93	3,88	3,72
11. Качество интеллектуального интерфейса	0,04	95	95	100	0,95	0,95	3,8	3,8
12. Возможность подключения в сеть ЭВМ	0,06	99	97	100	0,99	0,97	5,94	5,82
Показатели оценки коммерческого потенциала разработки								
1. Конкурентоспособность продукта	0,03	92	89	100	0,92	0,89	2,76	2,67
2. Уровень проникновения на рынок	0,03	65	67	100	0,65	0,67	2,85	2,01
3. Цена	0,08	70	65	100	0,7	0,65	5,6	5,2
4. Предполагаемый срок эксплуатации	0,05	92	90	100	0,92	0,9	4,6	4,5
5. Послепродажное обслуживание	0,02	92	90	100	0,92	0,9	1,84	1,8

Окончание таблицы 8

6. Финансирование научной разработки	0,03	80	78	100	0,8	0,78	2,4	2,34
7. Срок выхода на рынок	0,02	75	73	100	0,75	0,73	1,5	1,46
8. Наличие сертификации разработки	0,03	85	84	100	0,85	0,84	2,55	2,52
Итого	1						88,7	85,1

Оценка качества и перспективности по технологии QuaD определяется по формуле:

$$P_{cp} = \sum B_i \cdot B_i = 0,08 \cdot 93 + 0,1 \cdot 90 + \dots + 0,03 \cdot 85 = 88,7,$$

где P_{cp} – средневзвешенное значение показателя качества и перспективности научной разработки;

B_i – вес показателя (в долях единицы);

B_i – средневзвешенное значение i -го показателя.

Значение P_{cp} получилось равным 88,7, что говорит о том, что данная разработка является перспективной.

SWOT-анализ

SWOT – Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности) и Threats (угрозы) – представляет собой комплексный анализ научно-исследовательского проекта. SWOT-анализ применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта.

Он проводится в несколько этапов.

Первый этап заключается в описании сильных и слабых сторон проекта, в выявлении возможностей и угроз для реализации проекта, которые проявились или могут появиться в его внешней среде. Дадим трактовку каждому из этих понятий.

1. **Сильные стороны.** Сильные стороны – это факторы, характеризующие конкурентоспособную сторону научно-исследовательского проекта. Сильные стороны свидетельствуют о том, что у проекта есть отличительное преимущество или особые ресурсы, являющиеся особенными с точки зрения конкуренции. Другими словами, сильные стороны – это ресурсы или возможности, которыми располагает руководство проекта и которые могут быть эффективно использованы для достижения поставленных целей. При этом важно рассматривать сильные стороны и с точки зрения руководства проекта, и с точки зрения тех, кто в нем еще задействован. При этом рекомендуется задавать следующие вопросы:

- Какие технические преимущества вы имеете по сравнению с конкурентами?
- Что участники вашего проекта умеют делать лучше всех?
- Насколько ваш проект близок к завершению по сравнению с конкурентами?

2. **Слабые стороны.** Слабость – это недостаток, упущение или ограниченность научно-исследовательского проекта, которые препятствуют достижению его целей. Это то, что плохо получается в рамках проекта или где он располагает недостаточными возможностями или ресурсами по

сравнению с конкурентами. Чтобы прояснить в каких аспектах вас, возможно, превосходят конкуренты, следует спросить:

- Что можно улучшить?
- Что делается плохо?
- Чего следует избегать?

3. **Возможности.** Возможности включают в себя любую предпочтительную ситуацию в настоящем или будущем, возникающую в условиях окружающей среды проекта, например, тенденцию, изменение или предполагаемую потребность, которая поддерживает спрос на результаты проекта и позволяет руководству проекта улучшить свою конкурентную позицию. Формулирование возможностей проекта можно упростить, ответив на следующие вопросы:

- Какие возможности вы видите на рынке? Проводите поиск свободных ниш, но помните, что свободными они остаются недолго. Благоприятная возможность, увиденная сегодня, может перестать существовать уже через три месяца. Благоприятные возможности могут возникать в силу действия следующих факторов:
 - изменения в технологической сфере и на рынке – как мирового, так и регионального масштаба;
 - изменения правительственной политики в отношении отрасли, где проводится научное исследование;
 - изменения социальных стандартов, профиля населения, стиля жизни и т.д.
- В чем состоят благоприятные рыночные возможности?
- Какие интересные тенденции отмечены?
- Какие потребности, пожелания имеются у покупателя, но не удовлетворяются конкурентами?

4. *Угроза* представляет собой любую нежелательную ситуацию, тенденцию или изменение в условиях окружающей среды проекта, которые имеют разрушительный или угрожающий характер для его конкурентоспособности в настоящем или будущем. В качестве угрозы может выступать барьер, ограничение или что-либо еще, что может повлечь за собой проблемы, разрушения, вред или ущерб, наносимый проекту. Для выявления угроз проекта рекомендуется ответить на следующие вопросы:

- Какие вы видите тенденции, которые могут уничтожить ваш научно-исследовательский проект или сделать его результаты устаревшими?
- Что делают конкуренты?
- Какие препятствия стоят перед вашим проектом (например, изменения в законодательстве, снижение бюджетного финансирования проекта, задержка финансирования проекта и т.п.)?
- Изменяются ли требуемые спецификации или стандарты на результаты научного исследования?
- Угрожает ли изменение технологии положению вашего проекта?
- Имеются ли у руководства проекта проблемы с материально-техническим обеспечением?

Результаты первого этапа SWOT-анализа представляем в табличной форме (таблица 3).

Таблица 3 – Матрица SWOT

	<p>Сильные стороны научно-исследовательского проекта:</p> <p>С1. Заявленная экономичность и энергоэффективность технологии.</p> <p>С2. Экологичность технологии.</p> <p>С3. Более низкая стоимость производства по сравнению с другими технологиями.</p> <p>С4. Повышение производительности труда.</p> <p>С5. Квалифицированный персонал.</p> <p>С6. Высокий срок</p>	<p>Слабые стороны научно-исследовательского проекта:</p> <p>Сл1. Отсутствие у потенциальных потребителей квалифицированных кадров по работе с научной разработкой</p> <p>Сл2. Большой срок выхода на рынок</p> <p>Сл3. Высокая стоимость лицензионного программного обеспечения</p>
--	---	--

	эксплуатации. С7.Надежность данной системы по сравнению с другими. С8. Высокое качество продукции. С9. Универсальность схемы управления	
Возможности: В1.Использование инновационной инфраструктуры ТПУ В2.Появление дополнительного спроса на новый продукт В3. Снижение стоимости на электроэнергию и материалы, используемые при научных исследованиях В4. Повышение стоимости конкурентных разработок В5. Развитие технологий в данной отрасли		
Угрозы: У1. Отсутствие спроса на новые технологии производства. У2. Развитая конкуренция технологий производства У3. Введения дополнительных государственных требований к сертификации продукции		

Окончание таблицы 3

У4.Экономическая ситуация в стране, влияющая на спрос. У5. Появление новых конкурентных разработок.		
--	--	--

Описание сильных и слабых сторон научно-исследовательского проекта, его возможностей и угроз должно происходить на основе результатов анализа, проведенного в предыдущих разделах бакалаврской работы.

После того как сформулированы четыре области SWOT переходим к реализации второго этапа.

Второй этап состоит в выявлении соответствия сильных и слабых сторон научно-исследовательского проекта внешним условиям окружающей среды. Это соответствие или несоответствие должны помочь выявить степень необходимости проведения стратегических изменений.

В рамках данного этапа необходимо построить интерактивную матрицу проекта. Ее использование помогает разобраться с различными комбинациями взаимосвязей областей матрицы SWOT. Возможно использование этой матрицы в качестве одной из основ для оценки вариантов стратегического выбора. Каждый фактор помечается либо знаком «+» (означает сильное соответствие сильных сторон возможностям), либо знаком «-» (что означает слабое соответствие); «0» – если есть сомнения в том, что поставить «+» или «-». Полученная интерактивная матрица проекта представлена в таблице 4.

Таблица 4 – Интерактивная матрица проекта

		Сильные стороны проекта								
		C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
Возможности проекта	B1	0	+	0	0	+	0	+	+	+
	B2	+	+	+	+	-	+	+	+	+
	B3	+	-	+	+	-	+	+	0	+
	B4	+	-	-	0	+	+	+	+	+
	B5	+	0	+	+	+	+	+	+	+

Результаты анализа таблицы:

B2B3B4C1C6C7C9

B1C2C5C7C8C9

B4C1C5C6C7C8C9

B5C1C3C4C5C6C7C8C9

Продолжение таблицы 4

Слабые стороны проекта			
Возможности		Сл1	Сл2
			Сл3

проекта	B1	-	-	-
	B2	-	-	-
	B3	-	-	-
	B4	-	-	0
	B5	+	0	+

Результаты анализа таблицы:

B5Cл1Cл3

Продолжение таблицы 4

Сильные стороны проекта										
Угрозы		C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
	У1	-	-	-	-	+	-	-	-	-
	У2	0	0	-	-	-	-	-	-	+
	У3	+	0	+	+	-	+	0	0	0
	У4	-	-	-	0	-	-	-	-	-
	У5	0	-	-	-	+	-	-	-	-

Результаты анализа таблицы:

У1C5

У3C1C3C4C6

У2C9

У5C5

Окончание таблицы 4

Слабые стороны проекта				
Угрозы		Сл1	Сл2	Сл3
	У1	+	0	0
	У2	-	0	+
	У3	+	+	+
	У4	+	-	+
	У5	+	0	+

Результаты анализа таблицы:

У1Сл1

У2Сл3

У3Сл1Сл2Сл3

У4У5Сл1Сл3

В рамках третьего этапа составляем итоговую матрицу SWOT-анализа

(таблица 5).

Таблица 5 – Итоговая матрица SWOT-анализа

	Сильные стороны научно-исследовательского проекта: С1. Заявленная экономичность и энергоэффективность технологии. С2. Экологичность технологии. С3. Более низкая стоимость производства по сравнению с другими технологиями. С4.Повышение производительности труда. С5. Квалифицированный персонал.	Слабые стороны научно-исследовательского проекта: Сл1. Отсутствие у потенциальных потребителей квалифицированных кадров по работе с научной разработкой Сл2. Большой срок выхода на рынок Сл3. Высокая стоимость лицензионного обеспечения
Возможности: В1.Использование инновационной инфраструктуры ТПУ В2.Появление дополнительного спроса на новый продукт В3. Снижение стоимости на электроэнергию и материалы, используемые при научных исследованиях В4. Повышение стоимости конкурентных разработок В5. Развитие технологий в данной отрасли	B2B3B4C1C6C7C9 B1C2C5C7C8C9 B4C1C5C6C7C8C9 B5C1C3C4C5C6C7C8C9	B5Cл1Cл3
Угрозы: У1. Отсутствие спроса на новые технологии производства. У2. Развитая конкуренция технологий производства У3. Введения дополнительных государственных требований к сертификации продукции	У1С5 У3С1С3С4С6 У2С9 У5С5	У1Сл1 У2Сл3 У3Сл1Сл2Сл3 У4У5Сл1Сл3

Окончание таблицы 5

Угрозы: У4.Экономическая ситуация в стране, влияющая на спрос. У5. Появление новых конкурентных разработок.		
--	--	--

Результаты SWOT-анализа учитываются при разработке структуры работ, выполняемых в рамках научно-исследовательского проекта.

Определение возможных альтернатив проведения научных исследований

В предыдущем разделе были описаны методы, которые позволяют выявить и предложить возможные альтернативы проведения исследования и доработки результатов. К их числу относятся технология QuaD, SWOT-анализ. К ним можно добавить ФСА-анализ, метод Кано, оценку конкурентных инженерных решений. Однако, в большей степени все приведенные методы ориентированы на совершенствование результатов научного исследования, находящегося на стадии создания макета, модели системы, прототипа, конечного продукта. Если разработка находится на перечисленных стадиях жизненного цикла нового продукта, можно предложить не менее двух–трех основных вариантов совершенствования разработки или основных направлений научного исследования.

Разработка относится к вышеописанным стадиям, поэтому нет необходимости использовать морфологический подход.

Планирование комплекса предполагаемых работ осуществляется в следующем порядке:

- определение структуры работ в рамках научного исследования;
- определение участников каждой работы;
- установление продолжительности работ;
- построение графика проведения научных исследований.

Для выполнения научных исследований формируется рабочая группа, в состав которой могут входить научные сотрудники и преподаватели, инженеры, техники и лаборанты, численность групп может варьироваться. По каждому виду запланированных работ устанавливается соответствующая должность исполнителей.

Составляем перечень этапов и работ в рамках проведения научного исследования, проводим распределение исполнителей по видам работ. Результат представлен в таблице 6.

Таблица 6 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель темы
Выбор направления исследований	2	Подбор и изучение материалов по теме	Инженер
	3	Описание объекта автоматизации (модернизации)	Инженер
	4	Календарное планирование работ по теме	Руководитель
Теоретические и экспериментальные исследования	5	Разработка структурной (принципиальной) схемы ЭП	Инженер
	6	Расчет параметров двигателя и модели	Инженер
	7	Выбор способа регулирования скорости	Инженер
	8	Расчет предельных характеристик системы «преобразователь–электродвигатель»	Инженер
	9	Разработка математической модели системы АУ ЭП	Инженер
	10	Оптимизация САР электропривода	Инженер
	11	Разработка программы имитационного моделирования	Инженер
Обобщение и оценка результатов	12	Оценка эффективности полученных результатов	Руководитель

Окончание таблицы 6

<i>Проведение ОКР</i>			
Разработка технической документации и проектирование	13	Технико-экономические расчеты	Инженер
	14	Вопросы безопасности и экологичности проекта	Инженер
	15	Составление пояснительной записки (эксплуатационно-технической документации)	Инженер

Определение трудоемкости выполнения работ

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

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

$$t_{ожі} = \frac{3t_{\min i} + 2t_{\max i}}{5}, \quad (1)$$

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

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

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

Исходя из ожидаемой трудоемкости работ, определяется продолжительность каждой работы в рабочих днях T_p , учитывающая параллельность выполнения работ несколькими исполнителями. Такое вычисление необходимо для обоснованного расчета заработной платы, так как удельный вес зарплаты в общей сметной стоимости научных исследований составляет около 65 %.

$$T_{pi} = \frac{t_{ожі}}{Ч_i}, \quad (2)$$

где T_{pi} – продолжительность одной работы, раб. дн.;

$t_{ожі}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, чел.-дн.

$Ч_i$ – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел.

Разработка графика проведения научного исследования

При выполнении дипломных работ студенты в основном становятся участниками сравнительно небольших по объему научных тем. Поэтому наиболее удобным и наглядным является построение ленточного графика проведения научных работ в форме диаграммы Ганта.

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

Для удобства построения графика, длительность каждого из этапов работ из рабочих дней следует перевести в календарные дни. Для этого необходимо воспользоваться следующей формулой:

$$T_{ки} = T_{pi} \cdot k_{кал} , \quad (3)$$

где $T_{ки}$ – продолжительность выполнения i -й работы в календарных днях;

T_{pi} – продолжительность выполнения i -й работы в рабочих днях;

$k_{кал}$ – коэффициент календарности.

Коэффициент календарности определяется по следующей формуле:

$$k_{кал} = \frac{T_{кал}}{T_{кал} - T_{вых} - T_{пр}} , \quad (4)$$

где $T_{кал}$ – количество календарных дней в году;

$T_{вых}$ – количество выходных дней в году;

$T_{пр}$ – количество праздничных дней в году.

Рассчитанные значения в календарных днях по каждой работе T_{ki} необходимо округлить до целого числа.

Все рассчитанные значения сводим в таблицу (таблица 7).

Пример расчета (составление и утверждение технического задания):

$$t_{ож} = \frac{3 \cdot t_{\min} + 2 \cdot t_{\max}}{5} = \frac{3 \cdot 1 + 2 \cdot 2}{5} = 1,4 \approx 2 \text{ чел-дней};$$

$$T_p = \frac{t_{ож}}{Ч} = \frac{2}{1} = 2 \text{ дня};$$

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}} = \frac{365}{365 - 116 - 14} = 1,553;$$

$$T_k = T_p \cdot k_{\text{кал}} = 2 \cdot 1,553 = 3,106 \approx 4 \text{ дня}.$$

Таблица 7 – Временные показатели проведения научного исследования

Название работы	Трудоёмкость работ									Длительность работ в рабочих днях T_{pi}			Длительность работ в календарных днях T_{ki}		
	t_{\min} , чел-дни			t_{\max} , чел-дни			$t_{ожi}$, чел-дни								
	Исп.1	Исп.2	Исп.3	Исп.1	Исп.2	Исп.3	Исп.1	Исп.2	Исп.3	Исп.1	Исп.2	Исп.3	Исп.1	Исп.2	Исп.3
Составление и утверждение технического задания	2	2	1	4	4	2	3	3	2	3	3	2	5	5	4
Подбор и изучение материалов по теме	6	7	5	10	11	9	8	9	7	8	9	7	13	14	11

Окончание таблицы 7

Описание объекта автоматизации (модернизации)	4	3	3	7	6	5	6	5	4	6	5	4	10	8	7
Календарное планирование работ по теме	3	4	3	5	6	5	4	5	4	4	5	4	7	8	7
Разработка структурной (принципиальной)	4	6	5	8	12	10	6	9	7	6	9	7	10	14	11

схемы ЭП															
Расчет параметров двигателя и модели	4	5	3	8	9	7	6	7	5	6	7	5	10	11	8
Выбор способа регулирования скорости	5	4	3	9	8	7	7	6	5	7	6	5	11	10	8
Расчет предельных характеристик системы «преобразователь–электродвигатель»	3	3	2	6	6	4	5	5	3	5	5	3	8	8	5
Разработка математической модели системы АУ ЭП	5	4	3	9	8	7	7	6	5	7	6	5	11	10	8
Оптимизация САР электропривода	5	4	5	9	8	9	7	6	7	7	6	7	11	10	11
Разработка программы имитационного моделирования	3	4	4	7	8	8	5	6	6	5	6	6	8	10	10
Оценка эффективности полученных результатов	1	2	2	3	4	4	2	3	3	2	3	3	4	5	5
Технико-экономические расчеты	3	3	4	6	7	7	5	5	6	5	5	6	8	8	10
Вопросы безопасности и экологичности проекта	4	4	3	7	7	5	6	6	4	6	6	4	10	10	7
Составление пояснительной записки	1	2	1	3	4	3	2	3	2	2	3	2	4	5	4

Итого длительность работ в календарных днях при использовании

- Первого варианта – 130 календарных дней.
- Второго варианта – 136 календарных дней.
- Третьего варианта – 116 календарных дней.

На основе таблицы 14 строим календарный план-график. График строится для максимального по длительности исполнения работ в рамках научно-исследовательского проекта с разбивкой по месяцам и декадам (10 дней) за период времени дипломирования. При этом работы на графике выделяем различной штриховкой в зависимости от исполнителей, ответственных за ту или иную работу.

Календарный план-график построенный для максимального по длительности третьего варианта исполнения работ рамках научно-исследовательского проекта приведен в таблице 8.

Таблица 8 – Календарный план-график проведения НИОКР по теме

№ ра бо т	Вид работ	Исполн ители	T_{ki} , кал. дн.	Продолжительность выполнения работ													
				фев.		март			апрель			май			июнь		
				2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	
1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель	4														
2	Подбор и изучение материалов по теме	Инженер	11														
3	Описание объекта автоматизации (модернизации)	Инженер	7														
4	Календарное планирование работ по теме	Руководитель	7														
5	Разработка структурной (принципиальной) схемы ЭП	Инженер	11														
6	Расчет параметров двигателя и модели	Инженер	8														
7	Выбор способа регулирования скорости	Инженер	8														
8	Расчет предельных характ. системы «преобр.– электродвиг.»	Инженер	5														

Окончание таблицы 8

9	Разработка математической модели системы АУ ЭП	Руководитель	8														
10	Оптимизация САР электропривода	Инженер	11														

- накладные расходы.

Все необходимое оборудование и материалы имеются в лаборатории, поэтому расчет материальных затрат проводить не будем.

6.3.4.1. Основная заработная плата исполнителей темы

В настоящую статью включается основная заработная плата научных и инженерно-технических работников, рабочих макетных мастерских и опытных производств, непосредственно участвующих в выполнении работ по данной теме. Величина расходов по заработной плате определяется исходя из трудоемкости выполняемых работ и действующей системы окладов и тарифных ставок. В состав основной заработной платы включается премия, выплачиваемая ежемесячно из фонда заработной платы в размере 20 –30 % от тарифа или оклада.

Статья включает основную заработную плату работников, непосредственно занятых выполнением НТИ, (включая премии, доплаты) и дополнительную заработную плату:

$$Z_{зп} = Z_{осн} + Z_{доп}, \quad (8)$$

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

$Z_{доп}$ – дополнительная заработная плата (12-20 % от $Z_{осн}$).

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

$$Z_{осн} = Z_{дн} \cdot T_p, \quad (9)$$

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

T_p – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн. (таблица 13);

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

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{он}} = \frac{Z_m \cdot M}{F_d} = \frac{34725 \cdot 10,4}{237} = 1523 \text{ руб.},$$

где Z_m – месячный должностной оклад работника, руб.;

M – количество месяцев работы без отпуска в течение года:

при отпуске в 24 раб. дня $M = 11,2$ месяца, 5-дневная неделя;

при отпуске в 48 раб. дней $M = 10,4$ месяца, 6-дневная неделя;

F_d – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн. (таблица 9).

Таблица 9 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Инженер
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней		
- выходные дни	52	52
- праздничные дни	14	14
Потери рабочего времени		
- отпуск	48	48
- невыходы по болезни	14	14
Действительный годовой фонд рабочего времени	237	237

Месячный должностной оклад работника:

$$Z_m = Z_{\text{ТС}} \cdot (1 + k_{\text{пр}} + k_d) \cdot k_p = 17808 \cdot (1 + 0,3 + 0,2) \cdot 1,3 = 34725 \text{ руб}$$

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

$k_{\text{пр}}$ – премиальный коэффициент, равный 0,3 (т.е. 30% от $Z_{\text{ТС}}$);

k_d – коэффициент доплат и надбавок составляет примерно 0,2 – 0,5 (в НИИ и на промышленных предприятиях – за расширение сфер обслуживания, за профессиональное мастерство, за вредные условия: 15-20 % от $Z_{\text{ТС}}$);

k_p – районный коэффициент, равный 1,3 (для Томска).

Заработная плата руководителя:

$$Z_{\text{м.рук.}} = t_{\text{раб.}} \cdot T_{\text{рук}} = 24 \cdot 300 = 7200 \text{ руб}$$

где $T_{\text{рук}}$ – тарифная оплата руководителя (час), руб.;

$t_{\text{раб}}$ – время работы руководителя.

Расчёт основной заработной платы приведён в таблице 10.

Таблица 10 – Расчёт основной заработной платы

Исполнители	$Z_{\text{тс}}$, руб.	$k_{\text{пр}}$	$k_{\text{д}}$	$k_{\text{р}}$	$Z_{\text{м}}$, руб	$Z_{\text{дн}}$, руб.	$T_{\text{р}}$, раб. дн.	$Z_{\text{осн}}$, руб.	
Руководитель								7200	
Инженер	17808	0,3	0,2	1,3	34725	1523	92	140116	
Итого $Z_{\text{осн}}$									147316

6.3.4.2. Дополнительная заработная плата исполнителей темы

Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы учитывают величину предусмотренных Трудовым кодексом РФ доплат за отклонение от нормальных условий труда, а также выплат, связанных с обеспечением гарантий и компенсаций (при исполнении государственных и общественных обязанностей, при совмещении работы с обучением, при предоставлении ежегодного оплачиваемого отпуска и т.д.).

Расчет дополнительной заработной платы ведется по следующей формуле:

$$Z_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} \cdot Z_{\text{осн}} = 0,13 \cdot 140116 = 18215 \text{ руб}$$

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

6.3.4.3. Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

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

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$Z_{внеб} = k_{внеб} \cdot (Z_{осн} + Z_{доп}) = 0,271 \cdot (140116 + 18215) = 42907 \text{ руб}$$

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

На 2015 г. в соответствии с Федеральным законом от 24.07.2009 №212-ФЗ установлен размер страховых взносов равный 30%. На основании пункта 1 ст.58 закона №212-ФЗ для учреждений осуществляющих образовательную и научную деятельность в 2015 году водится пониженная ставка – 27,1%.

Отчисления во внебюджетные фонды рекомендуется представляем в табличной форме (таблица 11).

Таблица 11 – Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнитель	Основная заработная плата, руб.			Дополнительная заработная плата, руб.		
	Исп.1	Исп.2	Исп.3	Исп.1	Исп.2	Исп.3
Руководитель	8100	8400	7200			
Инженер	156869	164484	140116	20393	21383	18215
Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды	0,271					
Итого						
Исполнение 1	48038					
Исполнение 2	50369					
Исполнение 3	42907					

6.3.4.4. Накладные расходы

Накладные расходы учитывают прочие затраты организации, не попавшие в предыдущие статьи расходов: печать и ксерокопирование материалов исследования, оплата услуг связи, электроэнергия, почтовые и телеграфные расходы, размножение материалов и т.д. Их величина определяется по следующей формуле:

$$Z_{накл} = (\text{сумма статей } 1 \div 7) \cdot k_{нр} = (Z_{осн} + Z_{доп} + Z_{внеб}) \cdot 0,16 = \\ = (147316 + 18215 + 42907) = 33350$$

где $k_{нр}$ – коэффициент, учитывающий накладные расходы.

Величину коэффициента накладных расходов можно взять в размере 16%.

Расчет величины накладных расходов приведен в таблице 11

Таблица 11 – Накладные расходы

	$Z_{\text{накл}}$, руб.
Исполнение 1	37343
Исполнение 2	39141
Исполнение 3	33350

6.3.4.5. Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта

Рассчитанная величина затрат научно-исследовательской работы (темы) является основой для формирования бюджета затрат проекта, который при формировании договора с заказчиком защищается научной организацией в качестве нижнего предела затрат на разработку научно-технической продукции.

Определение бюджета затрат на научно-исследовательский проект по каждому варианту исполнения приведен в таблице 12.

Таблица 12 – Расчет бюджета затрат НИИ

Наименование статьи	Сумма, руб.			Примечание
	Исп.1	Исп.2	Исп.3	
1. Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	164969	172884	147316	Пункт 3.4.1
2. Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	20392	21382	18215	Пункт 3.4.2
3. Отчисления во внебюджетные фонды	48038	50369	42907	Пункт 3.4.3
4. Накладные расходы	37343	39141	33350	16 % от суммы ст. 1-5
5. Бюджет затрат НИИ	270742	283776	241788	Сумма ст. 1- 6

Определение ресурсоэффективности проекта

Определение эффективности происходит на основе расчета интегрального показателя эффективности научного исследования. Его нахождение связано с определением двух средневзвешенных величин: финансовой эффективности и ресурсоэффективности.

Интегральный показатель финансовой эффективности научного исследования получают в ходе оценки бюджета затрат трех (или более) вариантов исполнения научного исследования. Для этого наибольший интегральный показатель реализации технической задачи принимается за базу расчета (как знаменатель), с которым соотносятся финансовые значения по всем вариантам исполнения.

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{\text{фин}}^{\text{исп.}i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}},$$

где $I_{\text{фин}}^{\text{исп.}i}$ – интегральный финансовый показатель разработки;

Φ_{pi} – стоимость i -го варианта исполнения;

Φ_{max} – максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта (в т.ч. аналоги).

Полученная величина интегрального финансового показателя разработки отражает соответствующее численное увеличение бюджета затрат разработки в размах (значение больше единицы), либо соответствующее численное удешевление стоимости разработки в размах (значение меньше единицы, но больше нуля).

Расчёт интегрального финансового показателя приведен в таблице 13.

Таблица 13 – Расчёт интегрального финансового показателя конкурентных технических решений

	$I_{\text{фин}}^{\text{исп.}i}$
Исполнение 1	0,98
Исполнение 2	1

Исполнение 3	0,87
--------------	------

Величина интегрального финансового показателя разработки схемы 3 (преобразователь частоты) отражает соответствующее численное удешевление стоимости электропривода при одинаковой мощности. Схема 3 имеет наименьший интегральный показатель среди трёх конкурентных технических решений, и, следовательно, вариант схемы является наиболее финансово эффективным, что является определяющим критерием.

Определение ресурсоэффективности проекта схемы 3 можно оценить с помощью интегрального критерия ресурсоэффективности:

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

где I_{pi} – интегральный показатель ресурсоэффективности;

a_i – весовой коэффициент разработки;

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

Расчёт интегрального показателя ресурсоэффективности схем проводим в виде табличной формы (таблица 14).

Таблица 14 – Сравнительная оценка характеристик проекта

Критерии	Весовой коэффициент	Нерегулируемый электропривод	Электропривод с тиристорным регулятором напряжения	Электропривод с преобразователем частоты
1. Безопасность	0,2	5	5	5
2. Удобство в эксплуатации	0,15	4	4	5
3. Помехоустойчивость	0,10	4	4	4
4. Энергосбережение	0,15	3	4	5
5. Надёжность	0,25	5	5	5
6. Материалоёмкость	0,15	4	4	4
Итого:	1,00	4,3	4,45	4,75

Рассчитываем показатель ресурсоэффективности:

$$I_p = 0,2 \cdot 5 + 0,15 \cdot 5 + 0,1 \cdot 4 + 0,15 \cdot 5 + 0,25 \cdot 5 + 0,15 \cdot 4 = 4,75.$$

Показатель ресурсоэффективности проекта имеет достаточно высокое значение, что говорит об эффективности использования технического проекта.

Таким образом, применение нерегулируемых электроприводов и электроприводов с тиристорным регулятором напряжения и сейчас остается эффективным. Переход к электроприводу с преобразователем частоты, целесообразен в момент реструктуризации производства, или в тех производственных процессах, когда применение других представленных схем не целесообразно.

В ходе выполнения данной части выпускной работы была доказана конкурентоспособность данного технического решения, был произведен SWOT-анализ, планирование, которое ограничило выполнение работы в 116 дней. Также был посчитан бюджет НИИ равный 241788 руб, основная часть которого приходится на зарплаты сотрудников.

7 Социальная ответственность

Данный раздел посвящен вопросам обеспечения безопасных условий труда, экологической и пожарной безопасности в соответствии с действующими нормативными документами, а также вопросам экологической безопасности и обеспечение безопасности в ЧС.

Безопасность труда – состояние условий труда, при котором исключено воздействие на работающих опасных и вредных производственных факторов.

7.1. Производственная безопасность

Технологический процесс исследования и проверки стенда заключается в следующем:

1. Ознакомление и анализ литературы (статьи, диссертации, учебные пособия и монографии) по данной тематике;
2. Исследование работы испытательного стенда;
3. Выбор необходимого оборудования;
4. Изучение, усовершенствование модели электропривода и анализ его работы;
5. Проверка работоспособности посредством математической модели асинхронного двигателя;
6. Анализ полученных результатов.

В описанном технологическом процессе основным оборудованием является:

- монитор;
- компьютер;
- источник напряжения, необходимый для работы оборудования;
- исследуемая установка испытательного стенда;

7.2 Анализ опасных производственных факторов и обоснование мероприятий по их устранению

Проведем анализ опасных производственных факторов в вышеописанном технологическом процессе исследования и проверки испытательного стенда.

Основным опасным фактором является возможность поражения человека электрическим током, так как работа производится с рабочими электрическими установками, в частности двигателями. Для снижения уровня опасности проводится заземление электроустановок и полное или частичное ограждение токоведущих частей. Данные операции должны производиться на основании [1-5].

Следующая опасность заключается в том, что работа проводится с рабочим двигателем, соответственно вал двигателя находится в движении, что может привести к механическим повреждениям частей тела человека. Однако, благодаря конструкции двигателей, опасность представляют лишь выходные концы валов и места соединений. Для снижения риска устанавливают кожухи или защитные экраны в местах открытых движущихся механических частей.

Опасность может представлять повышенный уровень вибрации, который возникает во время работы исследуемого двигателя при нагрузках выше номинальной. Для избегания влияния вибраций на человека необходимо провести мероприятия на основании [6], а именно, жесткая фиксация рабочих механизмов на своих местах с использованием виброгасящих материалов.

Вибрация относится к вредному фактору и должна рассматриваться в 7.3

Для защиты от шума по СанПиН 2.2.4/2.1.8.562 – 96 [27] и вибрации по СанПиН 2.2.4/2.1.8.566 – 96 [28] предусматриваются:

- обеспечение персонала индивидуальными средствами защиты;

- звукоизолирующие кожухи и экраны;
- виброизолирующие материалы под оборудование (пружины, резины и другие прокладочные материалы).

Нормативным эквивалентным уровнем звука на рабочих местах является 80 дБА.

Категория помещения по опасности поражения электрическим током [ПУЭ 7 изд.] – помещения с повышенной опасностью.

Обслуживание и эксплуатация действующих электроустановок, проведение в них оперативных переключений, организация и выполнение ремонтных, монтажных или наладочных работ и испытаний, осуществляются лицами, имеющие профессиональную подготовку.

При отсутствии профессиональной подготовки работники должны быть обучены (до пуска к самостоятельной работе) в специализированных центрах подготовки персонала (учебных комбинатах).

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

Персонал, обслуживающий электроустановки, должен пройти проверку вышеназванных правил и других нормативно — технических документов (правил и инструкций по технической эксплуатации, пользования защитными средствами, пожарной безопасности, устройства электроустановок) в пределах требований, предъявляемых к соответствующей профессии и иметь соответствующую группу по электробезопасности.

Электротехническому персоналу, прошедшему специальное обучение и проверку знаний, присваивается группа по электробезопасности (от II до V), в зависимости от минимального стажа

работы в электроустановках, образования, теоретических знаний и практических навыков работы с соответствующим персоналом.

Приказом работодателя должно быть назначено лицо, отвечающее за общее состояние электрохозяйства, которое обязано организовать выполнение требований нормативных правовых актов при эксплуатации электроустановок потребителей.

В частности, оно обязано обеспечить:

- надежную эксплуатацию и безопасную работу электроустановок;
- организацию и своевременное проведение планово-предупредительных ремонтов и профилактических испытаний электрооборудования, аппаратуры и сетей;
- обучение, инструктирование и периодическую проверку знаний персонала, связанного с обслуживанием электроустановок;
- наличие и своевременную проверку средств защиты и противопожарного инвентаря;
- своевременное расследование аварий и нарушений требований действующих правил при эксплуатации электроустановок;
- ведение технической документации, разработку необходимых инструкций и положений и др.

Современная система электробезопасности обеспечивает защиту от поражения в двух наиболее вероятных и опасных случаях:

- при прямом прикосновении к токоведущим частям электрооборудования;
- при косвенном прикосновении.

Под косвенным прикосновением понимается прикосновение человека к открытым проводящим частям оборудования, на которых в нормальном режиме (исправном состоянии) электроустановки отсутствует электрический потенциал, но при каких-либо

неисправностях, вызвавших нарушение изоляции или ее пробой на корпус, на этих частях возможно появление опасного для жизни человека потенциала.

Для защиты от прямого прикосновения к токоведущим частям, согласно [3] служат изоляция токоведущих частей, применение ограждений и оболочек, установка барьеров, размещение вне зоны досягаемости, устройства защитного отключения (УЗО).

Для защиты от косвенного прикосновения применяются: защитное заземление и защитное зануление.

Даже если при электропоражении работающий внешне сохранил формат нормального самочувствия, он должен быть осмотрен врачом с заключением о состоянии здоровья, т.е. пострадавшему должна быть обеспечена скорая медицинская помощь. Предварительно пострадавший должен быть освобожден от действия электрического тока. Если при этом отключить напряжение быстро невозможно, освобождение от электричества пострадавшего необходимо производить, изолировав себя диэлектрическими перчатками или галошами. При необходимости перерезать провода (каждый в отдельности) инструментом с изолированными ручками. Если есть необходимость (при потере сознания, остановке сердца и т.п.) оказания первой помощи, то до прибытия медработника необходимо начать делать: наружный массаж сердца, искусственное дыхание.

Для предотвращения от поражения электрическим током при прикосновении к корпусам электроустановок, находящихся под напряжением при пробое изоляции или в других случаях, необходимо рассчитать и установить защитное заземление.

Защитным заземлением называют преднамеренное электрическое соединение металлическим проводником какого-либо электрического устройства с землей или ее эквивалентом.

Заземлению подлежат все нетоковедущие металлические части судового электрооборудования, которые вследствие повреждения изоляции могут оказаться под напряжением. Прикосновение к металлическим частям оборудования, оказавшимся под напряжением и не имеющим непосредственного контакта с землей, так же опасно, как и прикосновение к не изолированной токоведущей части цепи (фазе).

На судах заземляются корпуса электрических машин, их пускорегулирующая аппаратура, корпуса трансформаторов, металлорежущих станков, распределительных устройств, кожухи рубильников, коммутационная и защитная аппаратура, светильники, измерительная аппаратура и приборы управления судном, металлические оболочки кабелей, ручной электроинструмент, предназначенный для работы при напряжениях выше 24 В постоянного и 12 В переменного тока.

Заземляющим устройством называют совокупность металлического заземлителя, находящегося в непосредственном контакте с землей или ее эквивалентом, и заземляющих проводов, служащих для соединения заземлителей и металлических частей электрооборудования. Заземляющие соединения выполняются из меди или другого немагнитного эквивалентного ей металла.

Правилами Регистра определяются сечения заземляющих проводов в зависимости от мощности электрогенераторов. Минимальное сечение заземляющего провода от 2,5 мм² (для мелких приборов) до 4 мм². Сила тока, проходящего через тело человека, определяется сопротивлением защитного заземления, чем меньше сопротивление заземления, тем ниже эта величина, т. е. вероятность поражения электротоком снижается.

Сопротивление защитного заземления нормируется. Так, для установок напряжением до 1000 В оно не должно превышать 4 Ом, в установках напряжением свыше 1000 В с малыми токами замыкания на

землю и без компенсации емкостных токов — не более 10. Расчет и нормирование сопротивлений заземляющих устройств производится исходя из условий безопасности при случайном прикосновении человека к оборудованию, оказавшемуся под напряжением. В судовых цепях напряжением до 1000 В с изолированной нейтралью нормированное наибольшее напряжение прикосновения $U_{np} = 40 \text{ В}$ считается безопасным.

Согласно Правилам устройства электроустановок в цепях напряжением до 1000 В с изолированной нейтралью наибольшая возможная сила тока замыкания на землю I_{ym} не превышает 10 А. Тогда минимальное сопротивление заземления R_3 , обеспечивающее снижение напряжения прикосновения до безопасной величины, будет:

$$R_3 = U_{np}/I_y = 40/10 = 4 \text{ Ом}$$

Практически же сила токов утечки не превышает 4 – 6 А, поэтому при величине нормированного сопротивления заземления $R_3 = 4 \text{ Ом}$ напряжение прикосновения еще более снижается:

$$U_{np} = I_{ym} \times R_3 = 6 \times 4 = 24 \text{ В}.$$

7.3. Анализ вредных производственных факторов и обоснование мероприятий по их устранению

Часть технологического процесса исследования и проверки испытательного стенда, основана на работе с двигателем, который в свою очередь является источником повышенного уровня шума, что является вредным фактором производственной среды [17]. Чтобы уменьшить влияние шума, можно применять различные меры такие как: замена подшипников качения на подшипники-скольжения, проверка и своевременная замена смазочных материалов у подшипников. Но такие меры слишком затратные и трудоемкие. Также имеются и другие способы решения данной проблемы. Можно использовать различные ограждения из звукопоглощающих материалов и отдельных частей установки для снижения уровня шума. Возможно также закрытие звукоизолирующими кожухами всей установки, но это может вызвать затруднения при работе с оборудованием.

Следующий вредный фактор – недостаток естественного света [11], при работе в условиях недостаточной освещённости, связанным с временем суток и погодными условиями.

Однако недостаток освещенности рабочей зоны и помещения в целом плохо сказывается на здоровье работника [11,18]. Для улучшения ситуации, необходимо установить светильники на основании следующего расчета:

Данные, необходимые для расчета искусственного освещения:

- | | |
|---------------------------------|---------------------------------|
| – длина помещения | $A_{\text{пом}} = 8 \text{ м};$ |
| – ширина | $B_{\text{пом}} = 4 \text{ м};$ |
| – высота | $H_{\text{пом}} = 3 \text{ м};$ |
| – коэффициент отражения стен | $R_c = 30\%;$ |
| – высота рабочей поверхности | $h_p = 0,75 \text{ м};$ |
| – коэффициент отражения потолка | $R_n = 50\%;$ |
| – коэффициент запаса | $k = 1,5;$ |

– коэффициент неравномерности $Z = 1,1$.

Требуется создать освещенность $E = 300$ Лк;

Рассчитаем систему общего освещения (люминесцентного).

Выбором являются светильники типа ОД с интегральным критерием оптимальности расположения светильников $\lambda = 1,4$.

Расстояние светильников от перекрытия принимаем $h_c = 0,1$ м и получаем:

$$h = H - h_c - h_p = 3 - 0,1 - 0,75 = 2,15 \text{ м};$$

$$L = \lambda \cdot h = 1,4 \cdot 2,15 = 3,01 \text{ м};$$

$$\frac{L}{3} = \frac{3,01}{3} = 1 \text{ м};$$

Светильники размещаем в два ряда. В каждом из рядов будет установлено 5 светильников типа ОД. Мощность светильника 30 Вт, длина 0,9 м. Разрывы между светильниками, которых будет 4 в ряду, составят 27 см. План размещения светильников представлен на рисунке 1. В каждом светильнике установлено по две лампы, соответственно общее число ламп в помещении $n = 20$.

Найдем индекс помещения:

$$i = \frac{S}{h \cdot (A + B)} = \frac{8 \cdot 4}{2,15 \cdot (8 + 4)} = 1,2$$

Тогда, коэффициент использования светового потока равен:

$$\eta = 0,43.$$

Рассчитаем световой поток:

$$\Phi = \frac{E_H \cdot S \cdot k \cdot Z}{n \cdot \eta} = \frac{300 \cdot 32 \cdot 1,5 \cdot 1,1}{20 \cdot 0,43} = 1841,8 \text{ Лм}$$

Определим потребный световой поток ламп в ряду. Для этого выбираем ближайшую стандартную лампу – ЛДД 40 Вт со световым потоком 2100 Лм. Делаем проверку условия:

$$-10\% \leq \frac{\Phi_{\text{л.станд}} - \Phi_{\text{л.расч}}}{\Phi_{\text{л.станд}}} \cdot 100\% = \frac{2100 - 1841,8}{2100} \cdot 100 \leq 20\%$$

Получаем

$$-10\% \leq 13,7\% \leq +20\% \text{ – условие выполнено.}$$

Определяем электрическую мощность осветительной установки

$$P = 20 \cdot 30 = 600 \text{ Вт}$$

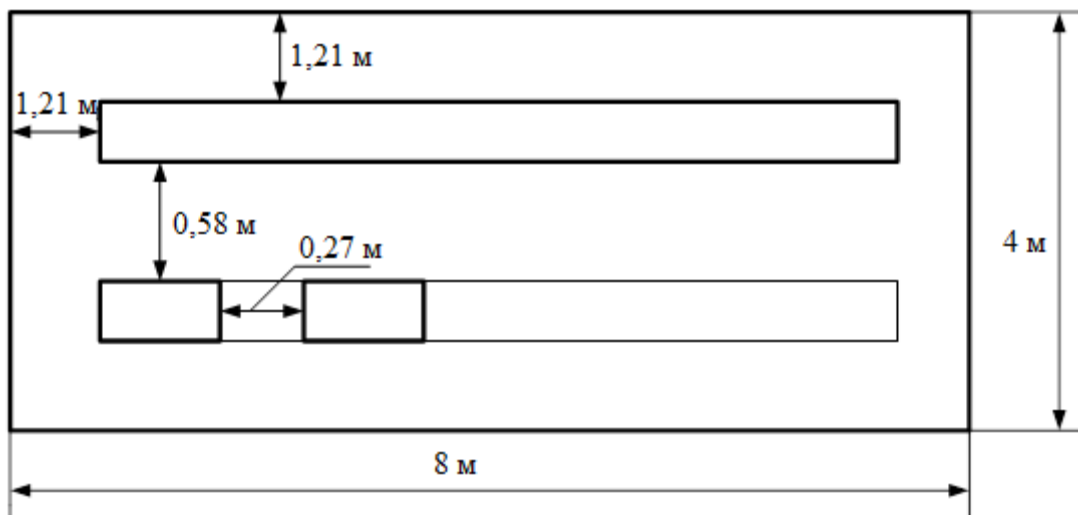


Рисунок 1 – План размещения светильников с люминесцентными лампами

Пониженная контрастность в взаимодействии с плохой освещенностью является наиболее опасным для зрительных органов работника и может привести к травмам, при работе с движущимися частями установки [11]. Простым решением для снижения риска является покраска отдельных частей установки в различные отчетливо видимые цвета.

Другим вредным фактором является пониженная подвижность воздуха [19], связанная с плохой вентилируемостью лаборатории, в связи с отсутствием вентиляционной системой.

Следствием предыдущего вредного фактора и наличием теплоотдающих при работе элементов установки будет повышенная температура воздуха рабочей зоны [19], которая пагубно влияет на состояние человека. Для решения этой проблемы нужно установить вентиляционную систему и систему кондиционирования.

7.4. Экологическая безопасность

Технологический процесс исследования и проверки разработки испытательного стенда, а также её использование не представляет угрозы для окружающей среды. Это связано с тем, что процесс является безотходным, и в течении работы нет выделения опасных для экологического состояния элементов. Показатели выделяемого тепла, электромагнитных излучений также не выше допустимых значений. Данная система может применяться на любых предприятиях, которые нуждаются в ней.

Отработанные люминесцентные лампы утилизируются в соответствии с Постановлением Правительства РФ от 03.09.2010 №681 [13]. Люминесцентные лампы, применяемые для искусственного освещения, являются ртутьсодержащими и относятся к 1 классу опасности. Отработанные газоразрядные лампы помещают в защитную упаковку, предотвращающую повреждение стеклянной колбы, и передают специализированной организации для обезвреживания и переработки.

При разработке системы приточной вентиляции используется ПЭВМ. В ПЭВМ содержится множество компонентов, которые содержат токсичные вещества. Например:

1. Свинец (накапливается в организме, может поражать нервную систему и почки);
2. Никель и цинк (могут вызывать дерматит);

Поэтому ПЭВМ требует особых способов утилизации:

1. Отделение неметаллических и металлических частей;
2. Неметаллические части должны быть подвержены специальной переработке
3. Металлические части должны быть переплавлены и использованы для последующего производства

Данные мероприятия позволяют обеспечить максимально эффективную утилизацию отходов и максимально уменьшить их неблагоприятное воздействие на окружающую среду.

7.5. Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Наиболее вероятным чрезвычайными ситуациями при исследовании и проверке испытательного стенда являются пожар или взрыв на рабочем месте [9,10,11]. Потенциальное возникновение пожара связано с возможным накоплением токоведущей пыли внутри компьютера, что может привести к короткому замыканию, возгоранию пыли и, если не будет принято никаких мер, то это приведет к распространению пожара. К воспламенению материалов может привести также наличие нагреваемых элементов в ходе работы установки. Достаточно следить за тем, чтобы вблизи установки во время её работы не находились легко воспламеняемые материалы и вещества.

В связи с возможной угрозой возникновения пожара был разработан план действий:

- в случае обнаружения возгорания необходимо сообщить руководителю и попытаться потушить очаг возгорания своими силами с помощью средств первичного пожаротушения такими как: огнетушитель (порошковый, углекислотный);
- в случае если потушить очаг возгорания не удастся, привести в действие ручной пожарный извещатель;
- немедленно сообщить о чрезвычайной ситуации в пожарную охрану по телефону 01 (сотовый 010), назвать адрес объекта, место и причины возникновения пожара;
- принять меры по эвакуации людей, материальных ценностей;
- приступить к тушению пожара, отключив электроэнергию;
- встретить подразделения пожарной охраны и, при необходимости, оказать помощь при выборе наилучшего пути для подхода к очагу пожара.

Возникновение других видов ЧС маловероятно, соответственно рассмотрению не подлежат.

Категория помещения по взрывопожарной и пожарной опасности- Г (умеренная пожароопасность).

Согласно Постановлению Правительства РФ от 25.04.2012 N 390 "О противопожарном режиме" в таблице 1 указаны огнетушители, используемые в различных категориях помещений.

Таблица 1- Виды огнетушителей

Категория помещения	Предельная защищаемая площадь, м ²	Класс пожара	Пенные и водные огнетушители вместимостью	Порошковые огнетушители вместимостью, л/ массой огнетушащего вещества, кг			Хладоновые огнетушители вместимостью 2 (3) л	Углекислотные огнетушители вместимостью, л/ массой огнетушащего вещества, кг	
				10 л	2/2	5/4		10/9	2/2
Г	800	В	2 +	–	2 ++	1 +	–	–	–
		С	–	4 +	2 ++	1 +	–	–	–

7.6 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

Согласно СанПиН 2.2.2/2.4.2198-07 при размещении рабочих мест с ПЭВМ расстояние между рабочими столами с видеомониторами (в направлении тыла поверхности одного видеомонитора и экрана другого видеомонитора) должно быть не менее 2,0 м, а расстояние между боковыми поверхностями видеомониторов - не менее 1,2 м.

Рабочие места с ПЭВМ при выполнении работы, требующей значительного умственного напряжения или высокой концентрации внимания, рекомендуется изолировать друг от друга перегородками высотой 1,5 - 2,0 м.

Экран видеомонитора должен находиться от глаз пользователя на расстоянии 600 - 700 мм, но не ближе 500 мм с учетом размеров алфавитно-цифровых знаков и символов.

Конструкция рабочего стола должна обеспечивать оптимальное размещение на рабочей поверхности используемого оборудования с учетом его количества и конструктивных особенностей, характера выполняемой работы. При этом допускается использование рабочих столов различных конструкций, отвечающих современным требованиям эргономики. Поверхность рабочего стола должна иметь коэффициент отражения 0,5 - 0,7.

Конструкция рабочего стула (кресла) должна обеспечивать поддержание рациональной рабочей позы при работе на ПЭВМ, позволять изменять позу с целью снижения статического напряжения мышц шейно-плечевой области и спины для предупреждения развития утомления. Тип рабочего стула (кресла) следует выбирать с учетом роста пользователя, характера и продолжительности работы с ПЭВМ.

Рабочий стул (кресло) должен быть подъемно-поворотным, регулируемым по высоте и углам наклона сиденья и спинки, а также расстоянию спинки от переднего края сиденья, при этом регулировка каждого параметра должна быть независимой, легко осуществляемой и иметь надежную фиксацию.

Поверхность сиденья, спинки и других элементов стула (кресла) должна быть полумягкой, с нескользящим, слабо электризующимся и воздухопроницаемым покрытием, обеспечивающим легкую очистку от загрязнений.

Заключение

В соответствии с техническим заданием разработан асинхронный частотно-регулируемый электропривод испытательного стенда. Предложено в качестве регулируемого электропривода использовать электропривод переменного тока. Рассчитана мощность двигателя, осуществлён выбор двигателя и преобразователя частоты. Предложено использование преобразователя частоты COMBIVERT 07F4C3D1240 с реализацией принципов частотно-токового векторного управления. Выполнен синтез и оптимизация контуров регулирования, разработана имитационная модель системы управления и выполнены имитационные исследования, результаты которых подтвердили соответствие показателей качества ожидаемым. В целом, по результатам исследований сделан вывод о возможности использования электропривода переменного тока с векторным управлением для построения имитационного стенда и даны практические рекомендации по настройке контуров регулирования.

Произведено сравнение 2-х систем плавного пуска двигателя: система ТРН-АД и ПЧ-АД. Несмотря на то, что система ТРН-АД позволяет плавно запустить двигатель, без ударных динамических моментов, данная система не позволяет обеспечить широкий диапазон регулирования, в то время, как система ПЧ-АД справляется с двумя описанными задачами прекрасно, что и было доказано при имитационных исследованиях.

В целом, результаты аналитических и имитационных исследований доказывают, что предложенная система автоматизированного ЭП соответствует требованиям технического задания.

В магистерской диссертации рассмотрены вопросы техники безопасности и социальной ответственности.

Список публикаций студента

1. Шенделёв М. А. Исследование устройств плавного пуска асинхронного двигателя [Электронный ресурс] // Введение в энергетику: сборник материалов II Всероссийской (с международным участием) молодежной научно-практической конференции, Кемерово, 23-25 Ноября 2016. - Кемерово: КузГТУ, 2016 - С. 1-5. – Режим доступа: <http://science.kuzstu.ru/wpcontent/Events/Conference/Other/2016/energ1/energ/pages/Articls3/Shendelyov.pdf>

Список используемых источников

1. Дементьев Ю. Н., Чернышев А. Ю., Чернышев И. А. Электрический привод: учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2011. – 232 с.
2. Онищенко Г.Б. Рег. Автоматизированный электропривод промышленных установок: Уч. пособие для ВУЗов, М.: Энергоатомиздат, 2002 г
3. Поздеев А.Д. Электромагнитные и электромеханические процессы в частотно-регулируемых асинхронных электроприводах. Чебоксары: Изд-во Чуваш, ун-та, 1998. 172 с.
4. Башарин А.В., Новиков В.А., Соколовский Г.Г. Управление электроприводами. М: Энергоатомиздат, 1982
5. Ключев В.И. Теория Электропривода, М.: Энергоатомиздат, 1985
6. Справочник по электрическим машинам. Под общ. ред. И. П. Копылова и Б. К. Клокова. Т.1. - М.: Энергоатомиздат, 1988.
7. Противопожарные нормы проектирования зданий и сооружений. СНиП» 2.01.02-85. -М.: Стройиздат, 1976
8. ГОСТ 12.3.002-75 ССБТ. Требования безопасности к производственным процессам.
9. И.Я. Браславский Электросберегающий асинхронный двигатель, М: Энергоатомиздат, 2004
10. Преобразователь частоты КЕВ COMBIVERT технические характеристики
11. ГОСТ 12.0.003–2017ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация.
12. ГОСТ 12.1.019 -79 (с изм. №1) ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты

13. ГОСТ 12.0.004–90 ССБТ. Обучение работающих безопасности труда
14. ГОСТ 12.1.030-81 ССБТ. Защитное заземление, зануление
15. ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов
16. ГОСТ 12.1.012-90 ССБТ. Вибрационная безопасность. Общие требования
17. СП 51.13330.2011 Защита от шума. Актуализированная редакция СНиП II-12-77
18. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03 Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещенному освещению жилых и общественных зданий
19. СП 60.13330.2016 Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха. Актуализированная редакция СНиП 41-01-2003
20. ГОСТ 12.1.004–91 ССБТ. Пожарная безопасность. Общие требования (01. 07. 92)
21. ГОСТ 12.1.010-76 ССБТ. Взрывобезопасность. Общие требования
22. Постановление Правительства РФ от 06.03. 2015 N 201"О противопожарном режиме" (вместе с "Правилами противопожарного режима в Российской Федерации")
23. Постановление Правительства РФ от 03.09.2010 №681 “Об утверждении Правил обращения с отходами производства и потребления в части осветительных устройств.”

Приложение А

Introduction

Electromechanical systems with asynchronous motors identify the global energy demand as they convert around 50% of all generated electrical power all over the world. Such a widespread application of Asynchronous drive are widely spread in industry, public services and agricultural sector since they have simple construction, high reliability and operation compared to the d/c/ motors of the asynchronous motor, its smaller weight as compared with the direct current motor, end-to-end dimensions and cost as well as high reliability. Current development trends of electric motors are characterized by mass adoption of variable-frequency motors and the use of adjustable drives that make it possible to save electrical power, and improve the control. Finally, these trends lead to improvement in the quality of production and its cost reduction. Relatively range of speed control (up to 1:20) and relatively slow response are required for the majority of wide applications of electric motors such as pumps, ventilators, conveyors, compressors, etc. Whereby most cases require the use of structures of u/f control. Transition to wide range (up to 1:1000) and fast-response motors of manufacturing machines, robots, vehicles requires to apply for more complicated structures of multichannel control.

Test stands are widely used in different industrial fields. Improvement of their quality and enhancement allow increasing equipment quality and reliability. That's why high requirements apply to them. In numerous cases meeting these requirements is impossible without application of good-quality and reliable electric motors. These test stands are widely used in geology and oil-and-gas industry for equipment tests.

The purpose of the diploma project is to design a stand for testing generators used in drilling of horizontal oil wells.

1. Literature review

Today, the main trend in drilling is the organization of controlled-angle drilling that leads to the cost reduction of crude-oil production.

At the moment the following types of profiled wellsite are used:

1. Straight well
2. Directional well
3. Horizontal well

Technical facilities for controlled-angle drilling are referred to as deflection devices. One of the most widespread deflection devices is kick sub (Figure 1.1.). It has the form of standard sub, but its connecting threads are connected to each other at an angle of 1 - 4°.

The kick sub is incorporated in packaging arrangement between the bottom-hole engine and the braced drill pipe. As a result of high rigidity of the braced drill pipe a bend in the bottom-hole engine arises, then the deflecting force takes place on the rock destruction tool. Its values depends on length and stiffness of the bottom-hole induction motor, that's why kick subs are used with shortened or one-section hydraulic turbine motors and bottom hole motors. The crookedness of wellsite with the application of kick subs depends on the angle of obliquity of threads, geometric, weight and stiffness characteristics of the packaging arrangement, drilling practices, milling capacity of drilling bit, physical and mechanical properties of rocks and inclination angle of wellsite. That's why it ranges from 1° to 6° / 10 m. The maximum inclination angle which can be reached with the application of kick subs with one-section hydraulic turbine motors is 40 - 45°. If it is necessary to reach larger inclination angles of wellsite, one ought to use pancake or scant bottom-hole motors. One of the advantages of the kick sub is its simplicity but when it is used the operating condition of bottom-hole motors deteriorate due to its elastic deformation, the crookedness varies widely, the rock destruction tool works in more heavy conditions due to the presence of deflecting force.

The turbo-drilling deflector series TO (Figure 1.2a) consists of turbine (1) and spindle rod (2) sections. The section shells are connected to each other by the kick sub (3) which allows transferring the load curve. The torque from the turbine section shaft to the drive shaft which is located at an angle to each other, is transmitted by a cam joint (4).

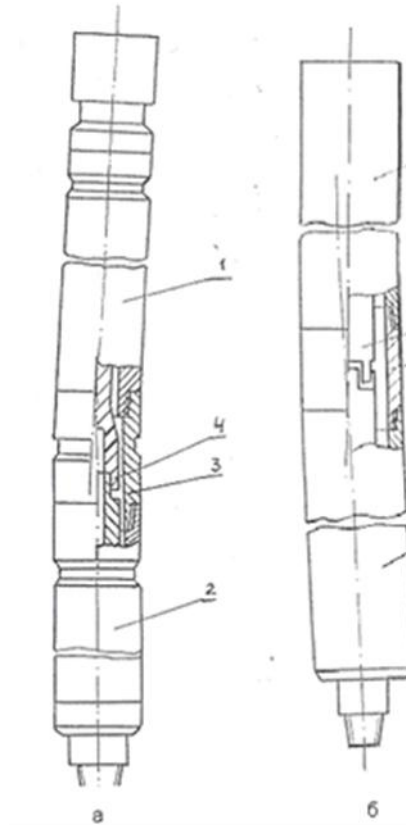


Figure 1.2a - The turbo-drilling deflector series TO

The advantage of the turbine deflectors is the approach of the kick sub to the bottom of hole, as a result the borehole curving has a more stable nature which independent of physical and mechanical properties of rocks and drilling technology. The use of several turbine sections allows increasing power and torque on the drilling bit and applying such deflectors in small-diameter wells, i.e. where standard kick subs don't provide the desired result. The significant disadvantage of the turbine deflectors is the small motor potential of the cam joint.

The spindle deflectors (Figure 1.2b) to devoid of this effect as their kick sub (1) is included in the spindle split housing (2) and the shaft is made by the connected cam coupling half (3). This deflector construction makes it possible to

unload the coupling halves from hydraulic loads and to increase the durability of the nodes in comparison with the turbine deflectors.

The analysis of the well deviation during the drilling demonstrates that:

1 In most cases wells tend to occupy a position perpendicular to the stratification of rocks.

2 Reducing the gap between the well walls and the tool leads to a reduction in curvature.

3 The locations of the centering tools and their diameter significantly affect the direction and intensity of the zenith curvature.

4 Increasing the rigidity of the tool reduces the intensity of the tool, that's why larger boreholes are less curved.

5 Increasing in the axial load leads to an increase in the intensity of the load

6 The direction and intensity of curvature depends on geological factors.

In the drilling process constant monitoring of the position of the well axis is required. Only in this case it is possible to construct a geological section and determine the true depths of the formation, determine the location of the bottom of the well, ensure that it reaches the specified point.

This requires knowledge of the exact zenith and azimuthal angles of the well and the depth of their measurement. Such measurements are made by special instruments called inclinometers. According to the method of measuring and submitting information to the surface, the inclinometers are divided into bottom hole, gauge, feeding with information while drilling process, self-contained, dropping into drill strings and giving out information only after lifting to the surface. In the first case information from downhole instrumentation is transmitted through communication channels to the surface where it is unscrambled. At the moment wire communication channels as well as wireless ones are used. Wire communication channel is widely used with electric downhole motors, as in this case the signal transmission from bottom hole

through the power cable is possible. There are systems with electrical cables built into each drill pipe which are connected by plug connectors, lines with non-contact type and lines from vent cable. These communication lines have a high transmitting capacity, but they have a number of significant disadvantages, for example they are quite expensive, they complicate tripping operations, have low resistance due to cable depreciation and cause interference with the twist-off termination. Wireless communication channels include hydraulic, electric and acoustic channels. In this case the downhole tool is used in order to collect and transmit data (Figure 1.3).

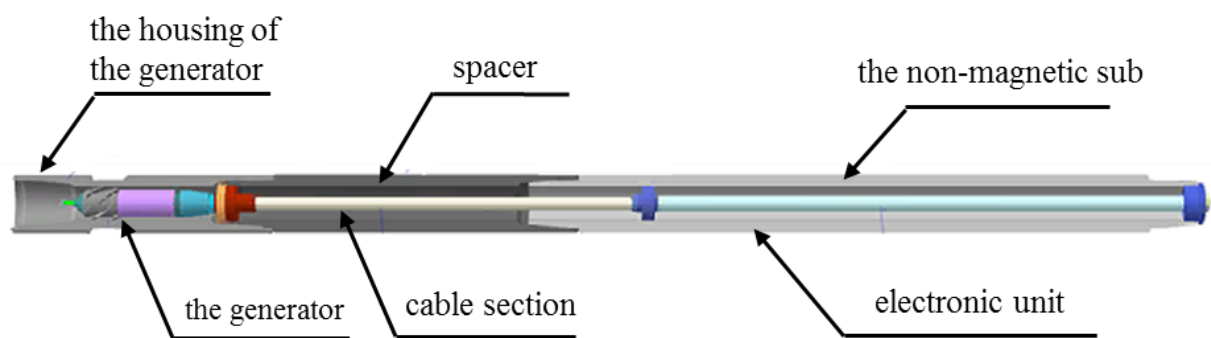


Figure 1.3 - Downhole tool

The principle of its operation is as follows - information from primary azimuth transmitters, inclination angle and whipstock orientation angle which are installed in nonmagnetic sleeve of the downhole tool is converted by the measuring unit into a code sequence, which is input by means of the segregator and the communication channel. On the ground the signal is received as a voltage difference due to the current spreading through the rock around the segregator between the drill string and the drill pin, which is 50 to 100 meters away from the drilling rig. The received signal is decoded and displayed in the ground-based equipment complex.

2. Object and methods of research

Thus, one of the most important elements of the drilling rig system is a generating set which is responsible for sensor power supply and generate voltage as well as for creating communication signals (Figure 1.3). The success of the drilling process largely depends on the reliability of the generating set. That's why the generating set must be subjected to bench tests in all possible modes of operation before the dive and after repair.

3. Calculations and analytics

A test stand is developed for testing generators that use in well devices, the schematic diagram is shown in figure 3.1.

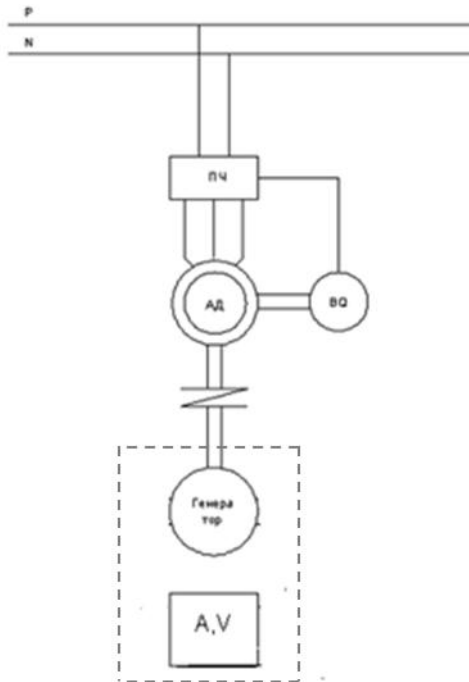


Figure 3.1 - Schematic diagram of a test stand

3.1 Selection of motor

The required motor power is determined by counting the power loss to the generator

$$P_{ДВ} = P_{ген} / \eta_{ген}$$

Where:

$P_{ДВ}$ - motor power;

$P_{ген}$ - generator power;

$\eta_{ген}$ - Generation efficiency.

The required speed is 3000 rpm.

Induction motor RA71B2 is selected according to this technical data are given in table 2.1.

Table 3.1-Passport details of motor RA71B2

$P_H=0,55 \text{ kW}$	motor power rating, kW;
$U_H = 220 \text{ V}$	rated line voltage, V;
$n_H = 2815$	rated speed, r/min;
$S_H=6,2$	rated slip, %;
$\eta=74$	efficiency in rated power mode (100% load), %;
$\cos \varphi =0.82$	power factor in the rated power mode, r.u.;
$I_{II}/I_H = k_i = 5$	current ratio, r.u.;
$M_{II}/M_H = k_n = 2,5$	starting torque-to-nominal torque ratio,r.u.;
$M_{\text{макс}}/M_H = k_{\text{MAX}} = 2,6$	maximum torque ratio, r.u.;

3.2 Calculation of equivalent circuit parameters

To calculate the electromechanical and mechanical characteristics of the induction motor, it is necessary to use its mathematical model, which has different equivalent circuits. T-shaped equivalent circuit is the most suitable for engineering calculations of induction motor, Figure 3.2.

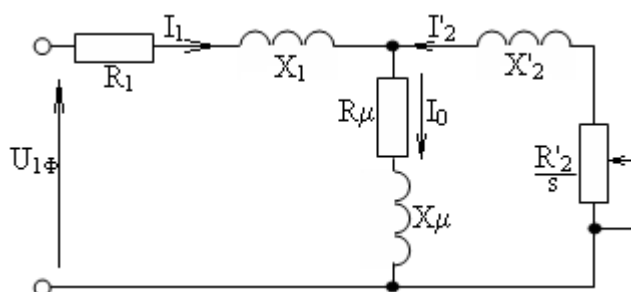


Figure 3.2 - Equivalent circuit of induction motor

The basic equations of induction motor, corresponding to the equivalent circuit is as follows:

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

$$\bar{E}_1 + j \cdot X_2 \cdot \bar{I}_2 + R_2' \cdot \bar{I}_2 / s = 0$$

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

Vector current graph, electromotive force (EMF) and voltage satisfying the above equations is shown in Figure 3.3.

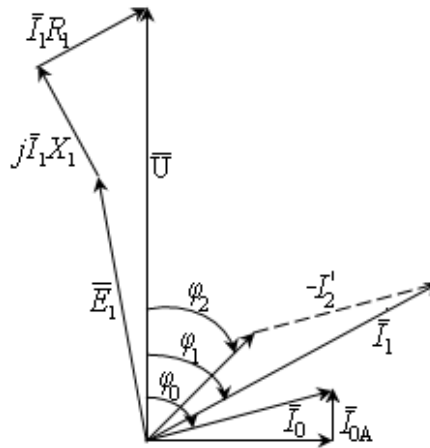


Figure 3.3-Vector diagram of induction motor

We define the parameters of the T-shaped equivalent circuit of induction motor by its technical data. The technical data allow determining the parameters of equivalent circuit by the following basic assumptions:

- magnetic and mechanical losses in the motor are $0.02 P_H$;
- active resistance of the stator and rotor windings of the motor operating mode are not taken into account.

Let us calculate the no-load current of induction motor:

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

where

$$I_{1H} = \frac{P_H}{\sqrt{3} \cdot U_{1H} \cdot \cos \varphi_H \cdot \eta_H} = \frac{550}{\sqrt{3} \cdot 220 \cdot 0.82 \cdot 0.74} = 2.379 \text{ A} - \text{rated current of motor stator};$$

$$I_{11} = \frac{p_* \cdot P_H}{\sqrt{3} \cdot U_{1H} \cdot \cos \varphi_{p_*} \cdot \eta_{p_*}} = \text{ - current of motor stator at the part load;}$$

$$= \frac{0.727 \cdot 550}{\sqrt{3} \cdot 220 \cdot 0.8 \cdot 0.74} = 1.774 \text{ A}$$

$$\cos \varphi_{p_*} = 0.975 \cdot 0.82 = 0.8 - \text{power factor at the part load};$$

$$\eta_{p_*} = \eta_H = 0.74 - \text{efficiency at partial load};$$

$$p_* = P/P_H = 0.727 - \text{the power factor load.}$$

To substitute the found values, we obtain:

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

$$= \sqrt{\frac{1.774^2 - \left[0.727 \cdot 2.379 \cdot \left(\frac{1 - 0.062}{1 - 0.727 \cdot 0.062}\right)\right]^2}{1 - \left[0.727 \cdot \left(\frac{1 - 0.062}{1 - 0.727 \cdot 0.062}\right)\right]^2}} = 0.729 \text{ A.}$$

The critical slip can be determined by the following equation:

$$s_k = s_H \frac{k_{\text{MAX}} + \sqrt{(k_{\text{MAX}})^2 - [1 - 2 \cdot s_H \cdot \beta (k_{\text{MAX}} - 1)]}}{1 - 2 \cdot s_H \cdot \beta (k_{\text{MAX}} - 1)} =$$

$$= 0.062 \frac{2.6 + \sqrt{2.6^2 - [1 - 2 \cdot 0.062 \cdot 1 \cdot (2.6 - 1)]}}{1 - 2 \cdot 0.062 \cdot 1 \cdot (2.6 - 1)} = 0.414$$

Where

$\beta = R_1 / (C_1 \cdot R_2')$ - the value of the β coefficient is in the range of 0.6-2.5, so in the first approximation we accept $\beta = 1$.

$$C_1 = 1 + (I_0 / (2 \cdot k_i \cdot I_{1H})) = 1 + \frac{0.729}{2 \cdot 5 \cdot 2.379} = 1.031$$

Efficiency can be found as:

$$A_1 = m U_{1\phi}^2 (1 - s_H) / (2 \cdot C_1 \cdot k_{\text{MAX}} \cdot P_H) = \frac{3 \cdot 220^2 (1 - 0.062)}{2 \cdot 1.031 \cdot 2.6 \cdot 550} = 46.206$$

The active resistance of the rotor reduced to the stator winding of induction motor is:

$$R_2' = A_1 / (\beta + 1/s_k) C_1 = \frac{46.206}{\left(1 + \frac{1}{0.392}\right) \cdot 1.031} = 11.705 \text{ Om.}$$

Active resistance of a stator winding

$$R_1 = C_1 R_2' \beta = 1.031 \cdot 11.705 \cdot 1 = 12.505 \text{ Om.}$$

The parameter γ , that will allow to find the inductive short-circuit impedance X_{KH}

$$\gamma = \sqrt{(1/s_k^2) - \beta^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{0.392^2}\right) - 1^2} = 2.348$$

Then

$$X_{KH} = \gamma C_1 R_2' = 2.348 \cdot 1.031 \cdot 11.705 = 30.542, \text{ Om}$$

In order to mark out from the inductive resistance X_{KH} the scattering resistance of the stator and rotor phases, it is necessary to use the relations that are valid for serial induction motors.

Inductive resistance of the rotor winding, led to the stator winding

$$X'_{2H} = 0,58X_{KH} / C_1 = 0,58 \cdot \frac{30,542}{1,031} = 17,188 \text{ Om.}$$

The inductive resistance of the stator windings

$$X_{1H} = 0,42X_{KH} = 0,42 \cdot 30,542 = 12,828 \text{ Om.}$$

By the found values of variables C_1 , R'_2 , R_1 and X_K the critical slip is determined

$$s_K = \frac{C_1 R'_2}{\pm \sqrt{R_1^2 + X_{KH}^2}} = \frac{1,031 \cdot 11,705}{\sqrt{12,505^2 + 30,542^2}} = 0,392$$

According to the vector diagram, EMF of the magnetization branch E_1 induced by the air gap flow in the stator winding in the nominal mode is equal to

$$\begin{aligned} E_1 &= \sqrt{(U_{1j} \cos \varphi_{1H} - R_1 I_{1H})^2 + (U_{1j} \sin \varphi_{1H} + X_1 I_{1H})^2} = \\ &= \sqrt{(220 \cdot 0,82 - 12,505 \cdot 2,379)^2 + (220 \cdot 0,662 - 12,828 \cdot 2,379)^2} = 188,609 \text{ B} \end{aligned}$$

The inductive resistance of magnification

$$X_{\mu H} = E_1 / I_0 = \frac{188,609}{0,729} = 258,74 \text{ Om.}$$

3.3 Run-up of induction motor through TRN-AD system

We fulfill a smooth start of the asynchronous motor using a start-up frequency converter, service simulating test and test transient processes for power dissipation. The principle of AC motor soft starter operation lies in the fact that the voltage applied from the electric main via the start-up frequency converter for stator winding of the asynchronous motor is limited by means of power tongs which are parallel-connected multilayer semiconductor switches (Figure 3.4). As a result, on-load voltage can be changed according to the law determined by power-up sensor [2].

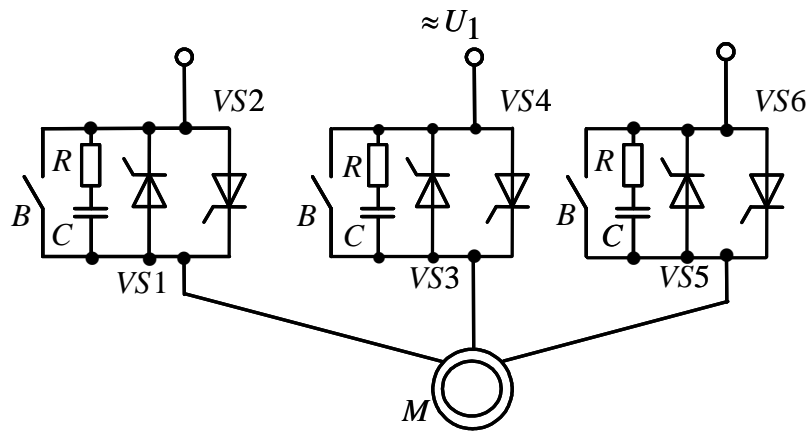


Figure 3.4 - Main-circuit connections of nonreversible thyristor voltage regulation

Two antiparallel thyristors in each phase of the start-up frequency converter which are shunted by RC circuits. RC circuits are set to exclude the self-starting of thyristors due to dU/dt effect when the power voltage is applied to the start-up frequency converter abruptly. In some circuits antiparallel thyristors are shunted by mechanical contacts B at the end of the transient processes of starting electric motor.

The main task of the start-up frequency converter is to achieve the set current change of the motor stator and its torque by the desired law smoothly increasing the voltage across the stator winding of the asynchronous motor M. The start-up frequency converters have simplicity of the scheme, low mass-size indicators and cost and they allow limiting current and torque of the asynchronous motor during run-up and short-stopping, but reversible start-up frequency converters also do this during the motor reverse. With the across-the-line startings of motor the impact dynamic torques appear on its shaft and outweigh the torque rating by 5-6 times that disables both the kinematics of the production mechanism and the motor itself. The purpose of this work is to explore the asynchronous electric drive with the start-up frequency converter in order to identify the cost of electrical energy when starting the asynchronous motor and establishing the features of its work.

All investigation of the asynchronous electric drive in the dynamics during start-up by direct connection to the network and smooth start-up via a thyristor

starting device will be carried out in the *MatLab-Simulink* software environment. We will also determine all power supply and power losses per operation cycle in the *MatLab-Simulink* software environment by integrating them and displaying them with a digital indicator (*Display*). The power circuit diagram for one of the start-up frequency converter phases is shown in Figure 3.5. in the *MatLab-Simulink* software environment.

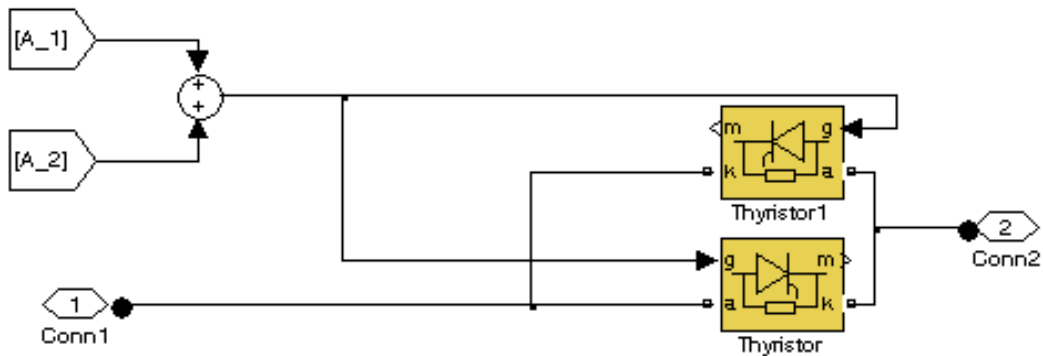


Figure 3.5 - The power circuit diagram for one of the start-up frequency converter phases in the MatLab-Simulink software environment

The stator current diagrams were taken with the purpose of revealing the correspondence of the processes taking place during the investigation of the start-up frequency converter on the simulation model and a real electric drive with the start-up frequency converter. The results of the investigation are shown in Figure 3.6.

The analysis of the stator currents of the simulation model and of the real electric drive which are shown in Figure 3.6 demonstrates their coincidence. Therefore, we assume that other physical quantities obtained on the simulation model and in a real electric drive with the start-up frequency converter will also coincide.

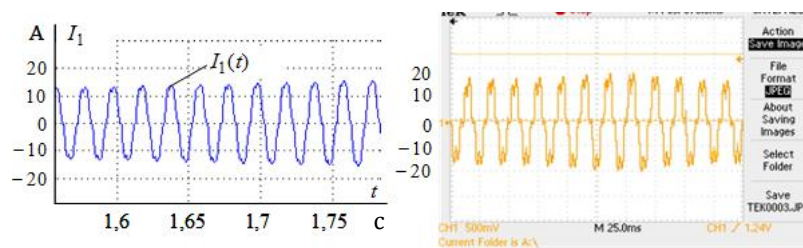


Figure 3.6 - Oscillograms of the stator currents of the asynchronous motor obtained on the simulation model a) and a real electric drive with the start-up frequency converter b)

Let's analyze the losses in the asynchronous motor during start-up by direct connection to the network and using the start-up frequency converter. For a comparative analysis in the same operation cycle of engine we will determine the power consumed by the motor from the network P_s , motor shaft output P_m , power losses in the engine ΔP_s , and power losses in the motor when the active resistances of the stator are heated P_{1a} .

The calculation of the instantaneous power consumed by the engine from the network during its operation in all modes will be found from the following formula:

$$P_s = u_{1a} \cdot i_{1a} + u_{1b} \cdot i_{1b} + u_{1c} \cdot i_{1c} \quad (1)$$

Where u_{1a} , u_{1b} , u_{1c} are instantaneous values of line-to-ground voltage of the motor

i_{1a} , i_{1b} , i_{1c} are instantaneous values of phase currents.

The instantaneous power at the motor shaft will be determined by the following equation:

$$P_m = M \cdot \omega \quad (2)$$

Where M is the instantaneous value of the asynchronous motor torque, H*m ; ω - motor speed, rad/s;

The power losses in the motor are defined as the difference between the power consumed by the motor from the network and the mechanical power on its shaft:

$$\Delta P_s = P_s - P_m \quad (3)$$

The power losses at the active resistances of the stator from the flowing current:

$$P_{1a} = 3 \cdot i_{1a}^2 \cdot R_1 \quad (4)$$

Where R_1 is the active resistances of the stator phase.

The process modeling in the electric drive is made for the asynchronous motor of the series AIR90S2 which have the following catalogued data: nominal rating power $P_H = 3,4$ кВт; nominal rating line-to-ground voltage $U_{1H} = 220$ В; nominal rating synchronous speed $\omega_{0H} = 314,15$ rad/s, nominal speed $\omega_H = 290,0$ rad/s, nominal coefficient of efficiency $\eta_H = 76$ % ; rated power factor

$\cos\varphi_H = 0,72$; locked-rotor current ratio $k_i = \frac{I_{\Pi}}{I_H} = 6,0$; maximum torque ratio $k_{\max} = \frac{M_{\Pi}}{M_H} = 2,2$. These data allow you calculating the parameters of the T-network equivalent circuit of the engine.

As a result of the simulating the start-up of the asynchronous motor by direct cad/sonnection to the network the speed transient curves $\omega(t)$ and torque $M(t)$ (Figure 3.7) as well as power and power loss curves in the motor (Figure 3.7, b) are received.

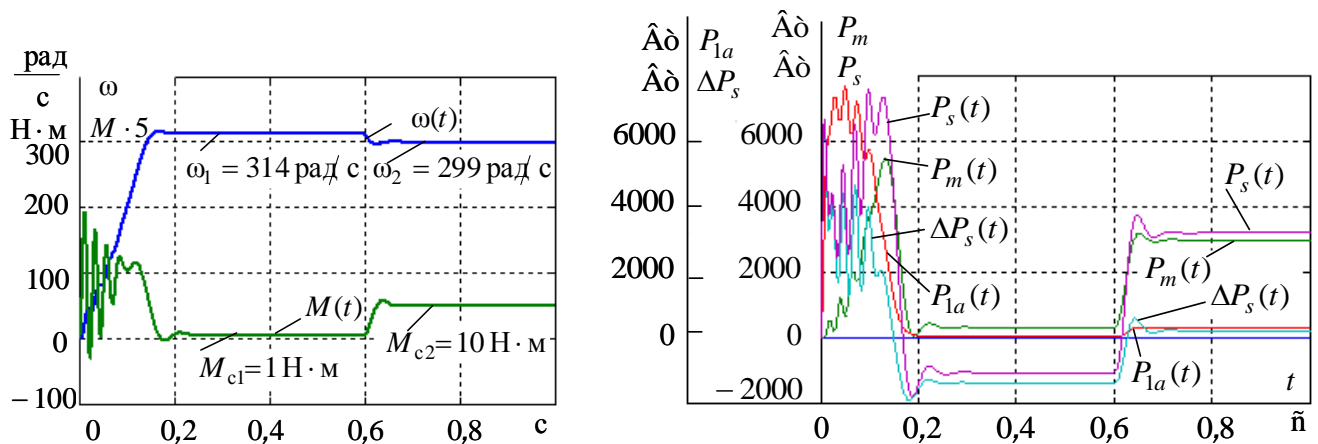


Figure 3.7 - Transient curves when starting the asynchronous motor by direct connection to the network

As a result of the research it was established that using the across-the-line starting asynchronous motor with the resistance moment $M_{c1} = 1$ H·m its steady rate is $\dot{\omega} = 314$ rad/s, using the load rise 10 H·m its steady rate is $\dot{\omega} = 299$ rad/s. The impact dynamic torque reaches 40 H·m that outweighs the motor torque rating AИP90S2 which is equal to 10.8 H·m by nearly four times.

From the above transient curves power loss curves in the motor (Figure 4, b) we obtain the following data: the power consumed by the motor from the start-up frequency converter per operation cycle $P_s = 1796$ watt, motor shaft output per operation cycle $P_m = 1677$ watt, power losses in the engine $\Delta P_s = 119$ watt.

As a result of the simulating the start-up of the asynchronous motor by the start-up frequency converter the speed transient curves $\omega(t)$ and torque $M(t)$

(Figure 3.8) as well as power and power loss curves in the motor (Figure 3.8, b) are received.

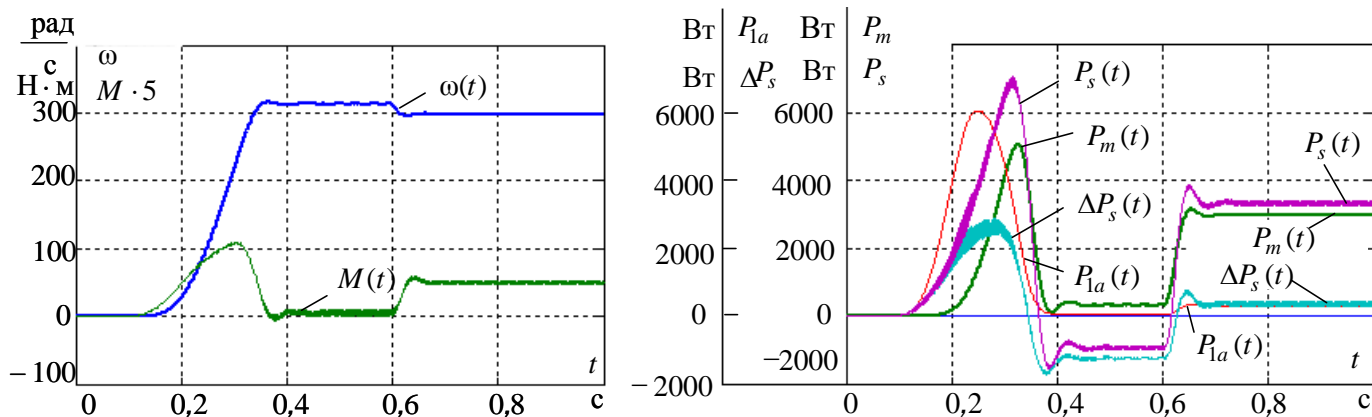


Figure 3.8 Transient curves when starting the asynchronous motor by the start-up frequency converter

The analysis of the transient processes shown in Figure 3.8 demonstrates that the impact dynamic torques with the across-the-line starting of asynchronous motor and with the load rise are absent, the engine accelerates smoothly. The power consumptions are $P_s = 1784$ watt, $P_m = 1635$ watt, power losses in the engine $\Delta P_s = 149$ watt [1].

Conclusions

Upon the analysis and study the following conclusion is made:

1. The use of the run-up of motor through the start-up frequency converter the impact dynamic torques are eliminated.
2. The loss of electrical energy in the electric drive with the start-up frequency converter increases under steady-state conditions. All three phases of the TPH should be shunted by the contacts of the additional contactor in order to reduce the losses in steady-state conditions.

The TRN-AD system is a good solution for starting, reversing and shutting down the motor, but a wider control range is needed. Therefore, we have selected a frequency converter for the electric drive of the test stand and built a simulation model of the PCH-AD system.

4. Results of research work

It's known that in vector control systems are most simply realized with regulators in a rotating coordinate system. However, such an instantiation requires introduction of additional blocks of coordinate conversion from a rotating system x, j_y to a stationary a, j_b (direct conversion) and Vice versa from a stationary a, j_b to a rotating x, j_y (inverse conversion).

The functional diagram of the vector control system with indirect field orientation with regulators made in a rotating coordinate system is shown in figure 4.1.

The functional diagram represented the following symbols:

- IM - induction motor;
- SCVI - self-commutated voltage inverter;
- IF - interference filter. Suppress ditherings and fluctuations of the input signals.
- ADC - analog-digital converter;
- IE - incremental encoder;
- SCB - speed calculation block;
- CB - calculation block. Calculates the rotation speed value of vector flux linkage ω_k in indirect orientation on the field.
- FLCB - flux linkage calculation block;
- ATB - block of angular transformation. Calculates the angular position of the flux vector;
- CB - the compensation block of electromotive intensity motor;
- CBMF - calculation block of magnetic flux. Forms $U_{3\psi}$ depending on the value of given speed;
- SC - speed control (PI-regulator);
- FC - flow control;
- CRx - current regulator in the magnification circuit (PI-regulator);
- CRY- current regulator (PI-regulator)

In addition, there are blocks that perform coordinate transformations in the scheme:

- A, B, C - a, b - coordinate converter. Forms the components of the stator currents I_{1a} , I_{1b} equivalent two-phase motor in a fixed coordinate system a, b ;
- a,b-x,y - coordinate converter performing the inverse conversion of the currents I_{1a} , I_{1b} of the fixed coordinate system a, b to the rotating x, y .

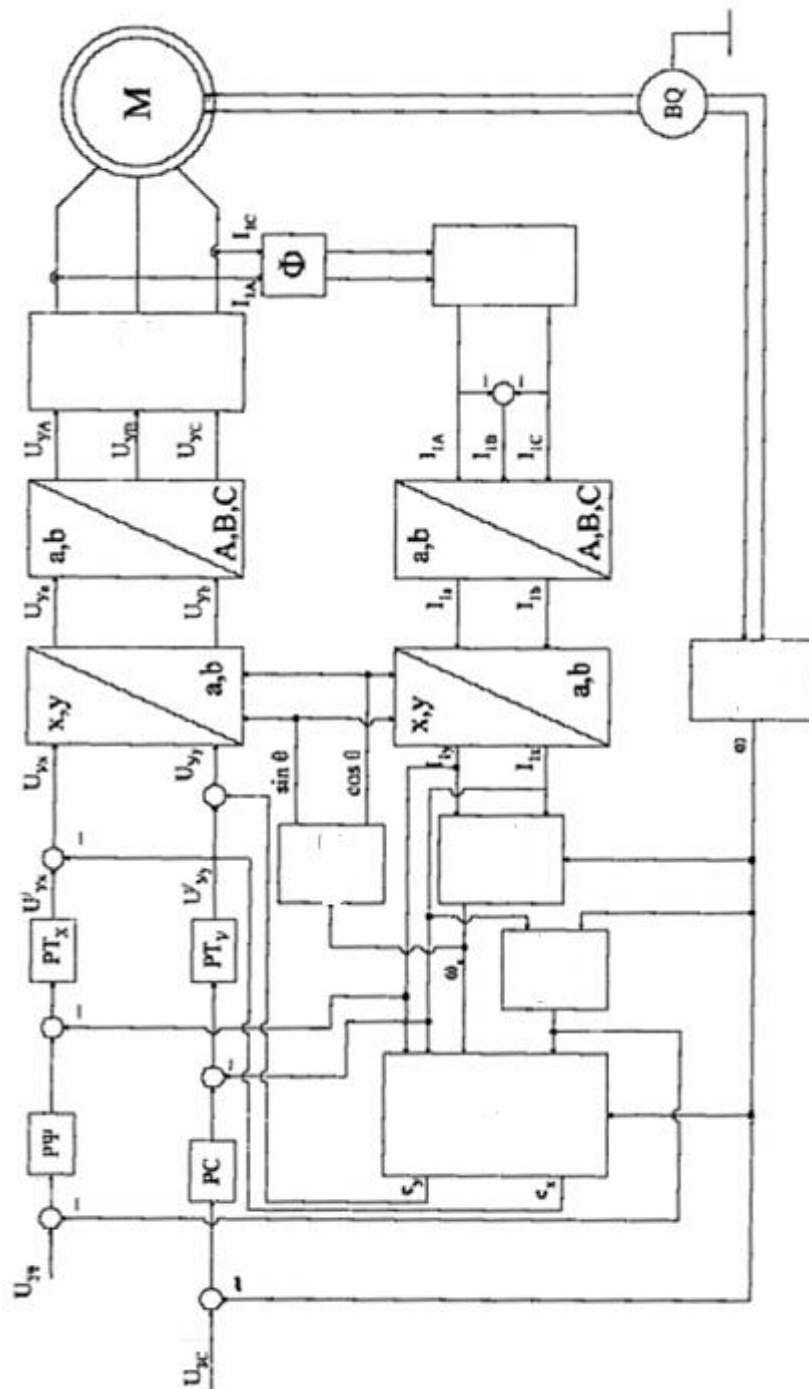


Figure 4.1 - Functional graph of the vector control system with indirect orientation on the field with the regulators made in a rotating coordinate system

5. Simulated tests of the test stand electric motor

Let's consider vector linear and non-linear control of the electric drive. Based on the block scheme shown in Figure 4.18 a simulated stand model with the vector linear control is created in Matlab Simulink as shown in Figure 5.1.

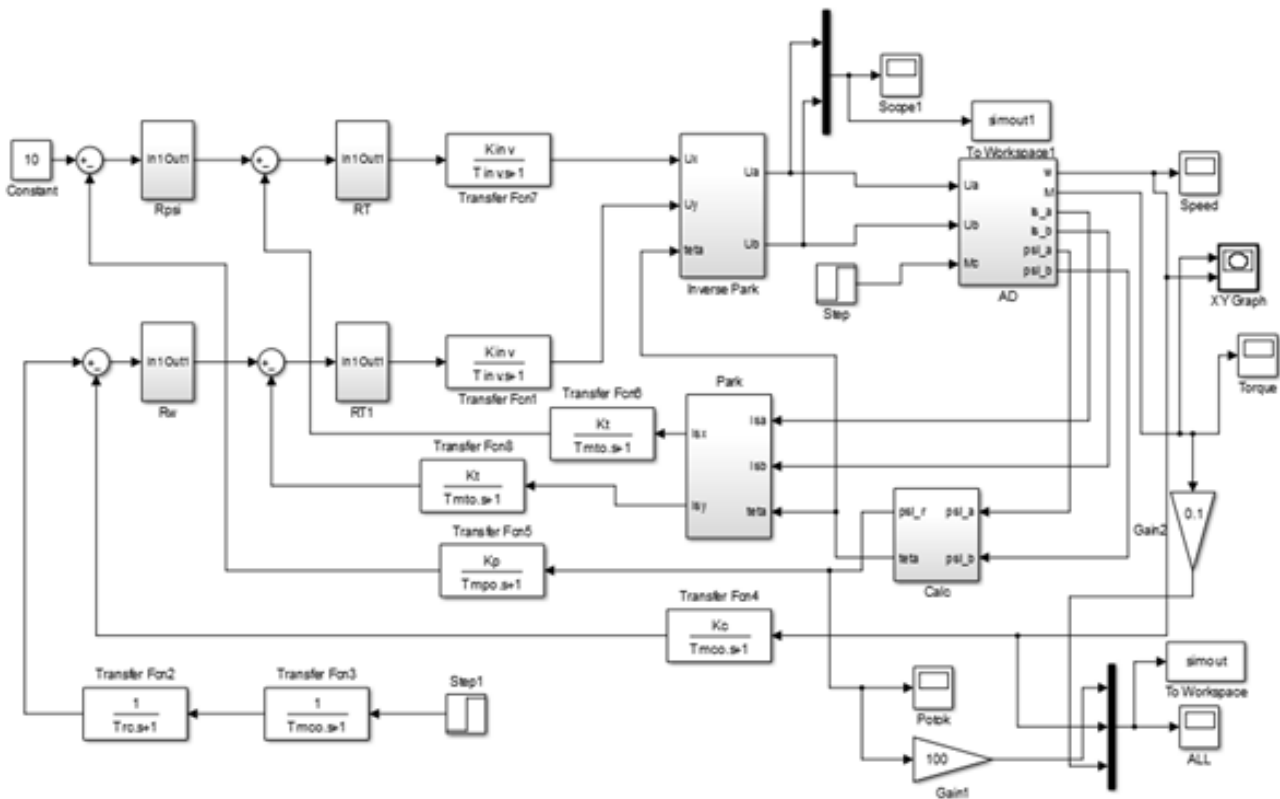


Figure 5.1. – Simulated model of the test stand electric motor of generator

The following nonlinearities were taken into account:

- Limitation of inverter voltage output
- Idle loading conditions $M_c \text{sign}(\omega)$

The research programme includes run-up with the negative speed limit and with the full speed.

Transient processes are shown in Figure 5.2 and 5.3

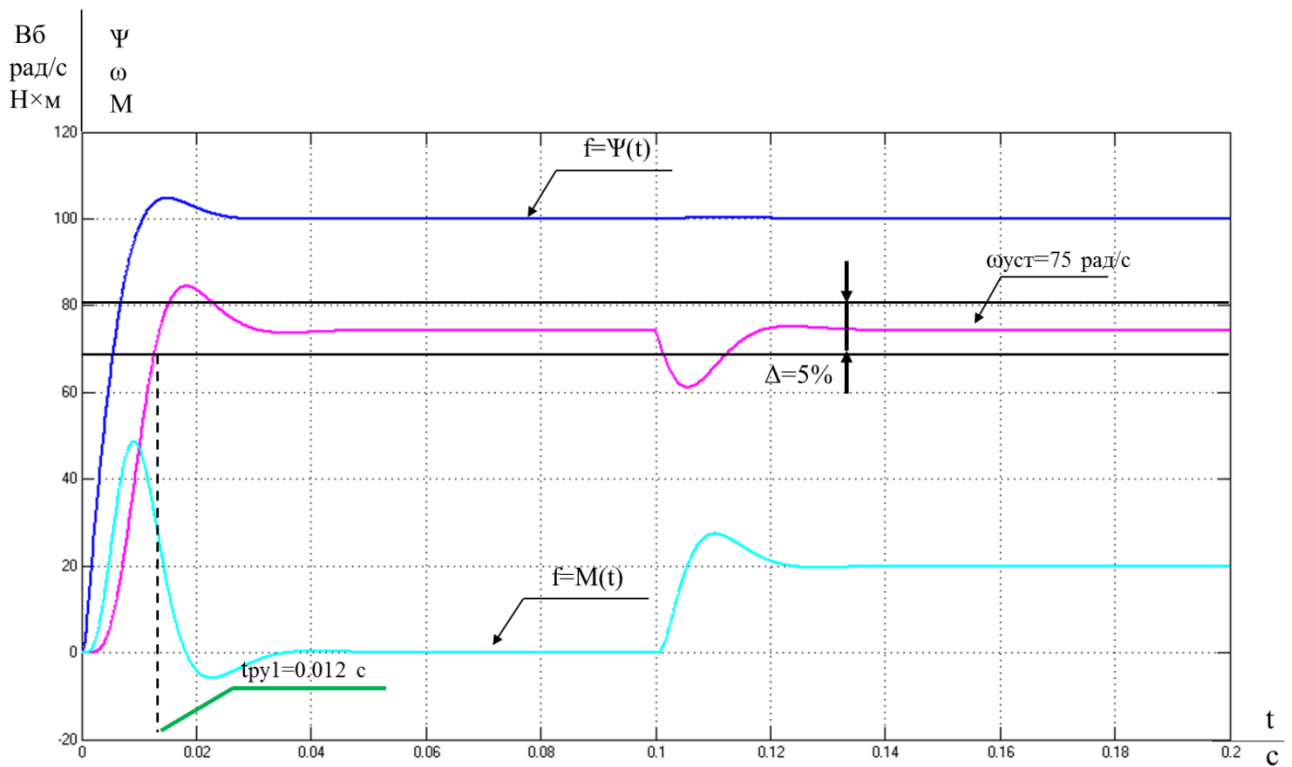


Figure 5.2 - Transient processes $\omega(t)$, $I(t)$ of run-up with the negative speed limit

The analysis of the transient processes of run-up with the negative speed limit demonstrates that the transient time was 0.05 seconds, the motor speed reached the steady-state value and was 75 rad/s. At the moment of load rise ($t=0.14$ s) the speed decreased, the torque took the larger value but quickly reached the steady-state values.

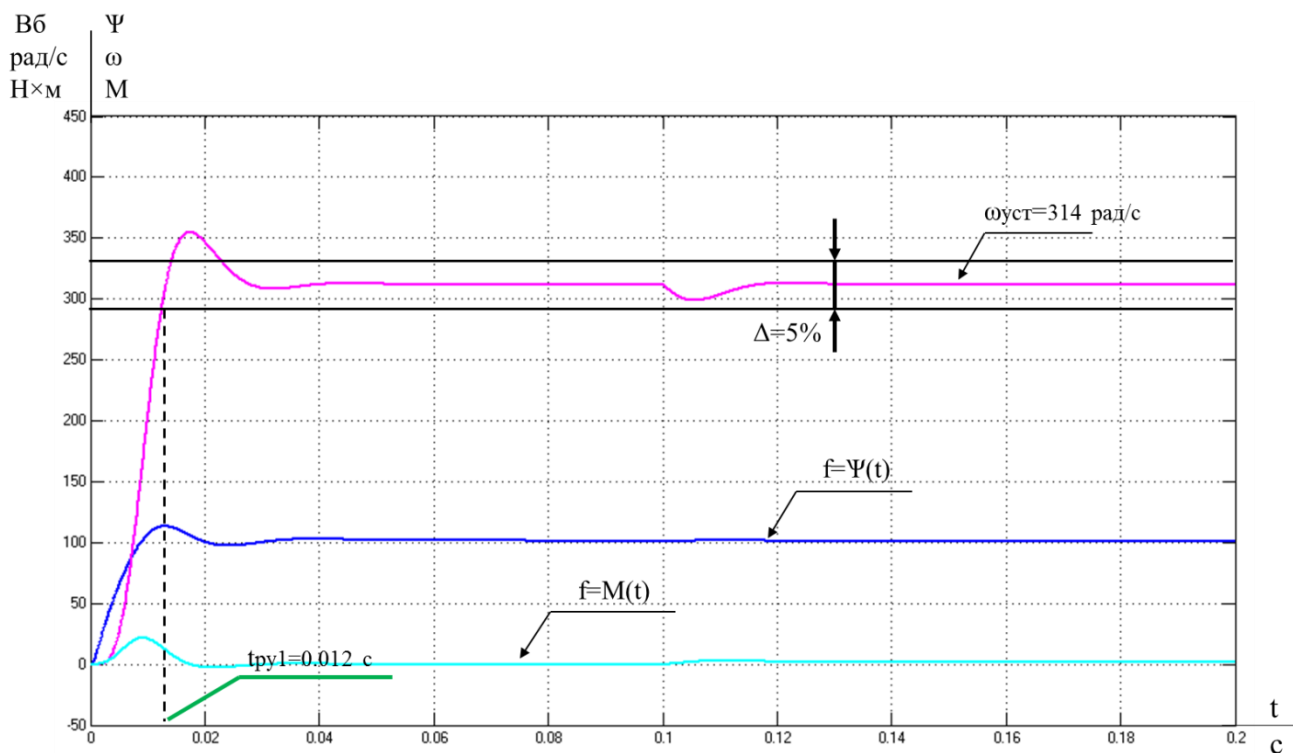


Figure 5.3 - Transient processes $\omega(t)$, $I(t)$ of run-up with the full speed

The analysis of the transient processes of run-up with the full speed demonstrates that the transient time was 0.05 seconds, the engine speed reached the steady-state value and was 314 rad/s. At the moment of load rise ($t=0.14$ s) the speed decreased, the torque took the larger value but for a short period of time it again took the steady-state values as they were before the load rise.

Then we will build the simulation of the electric drive with non-linear control and analyze the transient processes. The simulation model scheme with the vector linear control is shown in Figure 5.4.

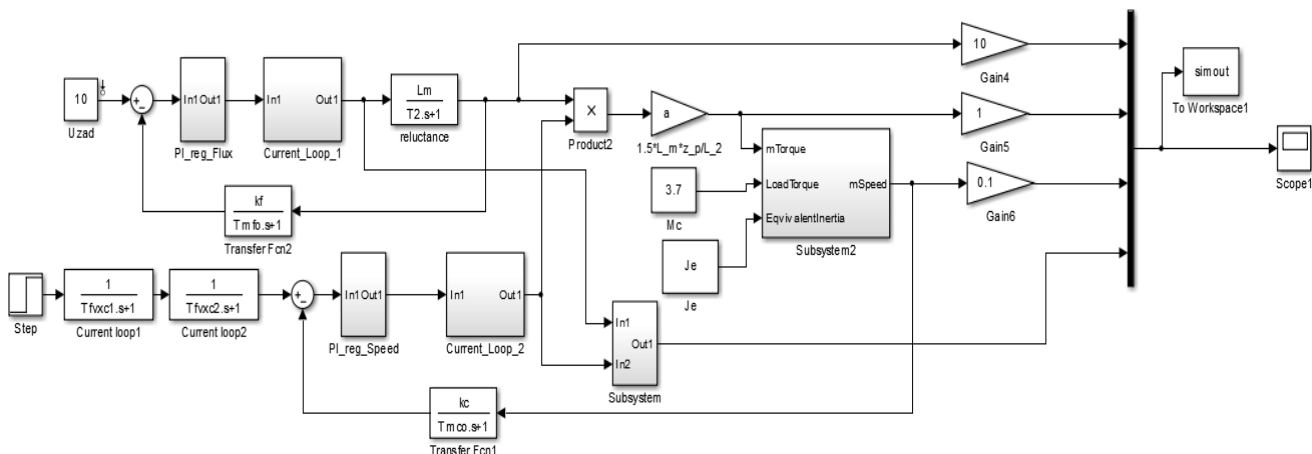


Figure 5.4. - Simulated model of the test stand with the vector non-linear control

We get the following diagrams of the transient processes shown in Figure 5.5.

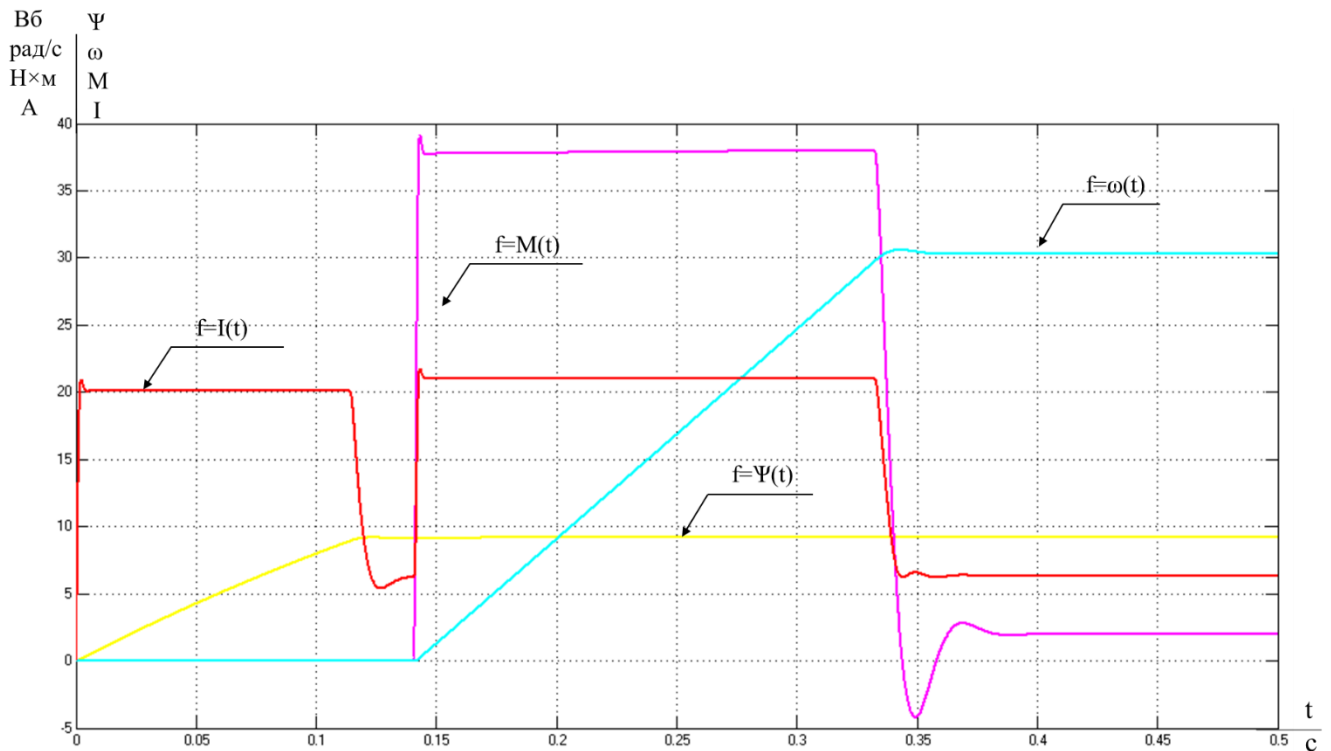


Figure 5.5 – Diagram of the transient processes with the full speed

The analysis of the transient processes of run-up with the full speed under vector non-linear control demonstrates that the voltage supply was delayed by 0.14 seconds, the current step occurred at the initial moment of the asynchronous motor run-up, the smooth start took place due to the use of PCH-AD system which allow providing the motor start and work smoothly and without changes. that has a positive effect on the engine longevity. The transient time was 0.02 seconds, the motor speed reached the steady-state value and was 314 rad/s that corresponds the nameplate data of engine shown in Table 2.1. At the moment of load rise (t=0.35 s) the speed decreased, the torque took the larger value but for a short period of time it again took the steady-state values as they were before the load rise.

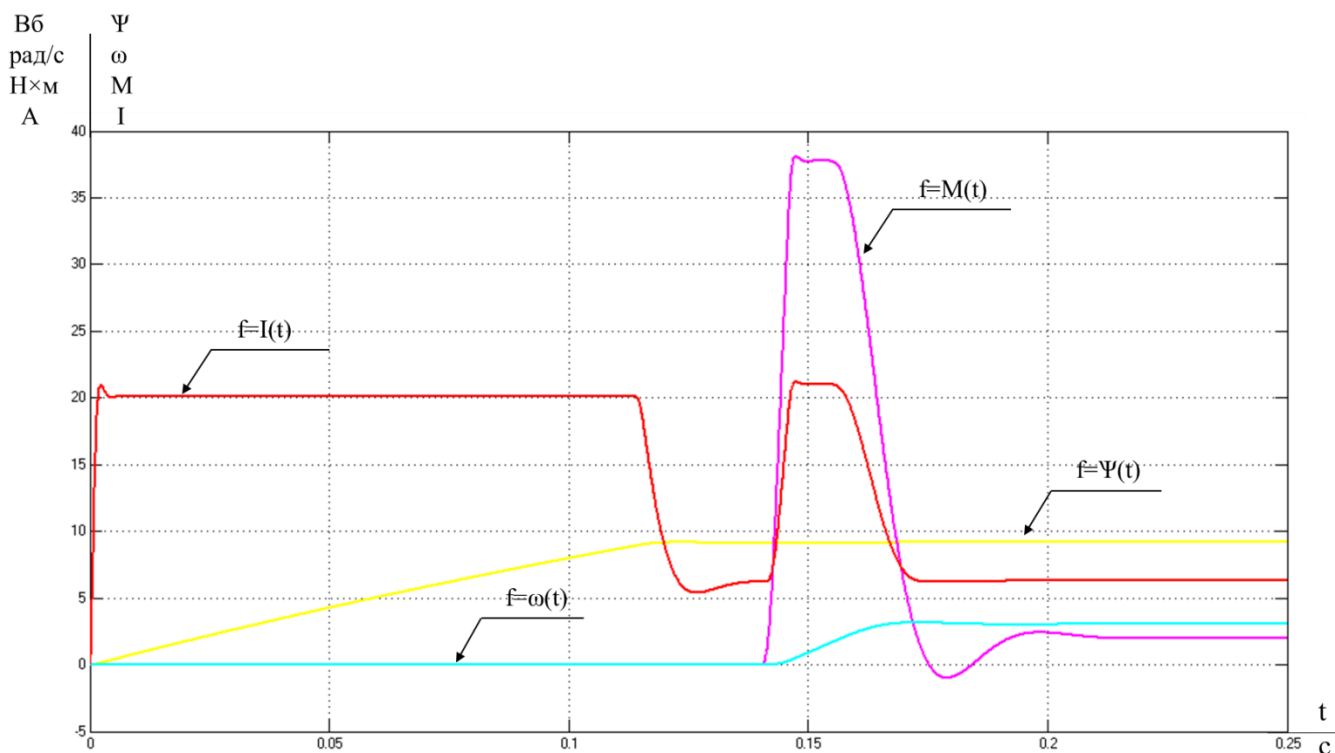


Figure 5.5 – Diagram of the transient processes with the negative speed limit

The analysis of the transient processes of run-up with the full speed under vector non-linear control demonstrates that the voltage supply was delayed by 0.14 seconds, the current step occurred at the initial moment of the asynchronous motor run-up, the smooth start took place, the engine speed increases smoothly without changes due to the use of PCH-AD system which allow providing the motor start and work smoothly and without changes. That has a positive effect on the motor lifespan. The transient time was 0.02 seconds, the engine speed reached the steady-state value. At the moment of load rise ($t=0.17$ s) the speed decreased, the torque took the larger value but for a short period of time it again took the steady-state values as they were before the load rise.

The comparison of the modeling results of various control systems allows us concluding that current and torque rushes during the run-up and load rise are much smaller with the vector control. This significantly increases the engine longevity, has a positive effect on the endurance capability of the electric motor and simplifies the motor control, i.e. its run-up and shutdown because these processes pass without significant jumps when using this control system[1].

Conclusion

According to the technical task the asynchronous variable-frequency electric drive of the test stand was developed. It was offered to use the alternating current drive as the variable speed drive. The motor capacity is estimated the motor and the frequency convertor is selected. It was proposed to use COMBIVERT 07F4C3D1240 frequency convertor a plane of principles of frequency - current vector control. Synthesis and optimization of control contours is carried out, the simulation model of the control system is developed and simulation researches were fulfilled. Its results confirmed the compliance of the quality indicators with the expected ones. According to research results the conclusion about the possibility of using the alternating current drive with vector control for construction of simulation stand is made. Moreover, several practical recommendations on adjustment of control contours are given.

During the work 2 smooth-start systems of induction motor were compared (TRN-AD and PCH-AD). Despite the fact that TRN-AD system allows starting the motor smoothly and without dynamic moments this system doesn't provide the wide range of control. At the same time PCH-AD system is able to cope with task very well that was proved during simulation research.

In general, results of analytical and simulation research prove that the suggested system of the automatic electric drive fits the requirements of the technical project.

Moreover, the issues of safety method and social responsibility were considered.

Список публикаций студента

1. Shendelyov M. A. Study of the soft starters of induction motor [Electronic resource] // Introduction to energy: proceedings of the II all-Russian (with international participation) scientific-practical conference, Moscow, 23-25 November 2016. - Kemerovo: KuzGTU,2016 - С. 1-5. – Access mode: <http://science.kuzstu.ru/wpcontent/Events/Conference/Other/2016/energ1/energ/pages/Articls3/Shendelyov.pdf>

Список использованных источников

1. Chernyshev A. Yu. AC electric drive: textbook (2011).