

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

---

Институт Энергетический  
Направление подготовки 13.03.02 – «Электроэнергетика и электротехника»  
Кафедра Электропривода и электрооборудования

**БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА**

Тема работы
Электропривод волочильной машины производства гибких теплонагревательных элементов. УДК 62-83-52:621.778.1

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
3-5Г2Б1	Толкачев Александр Александрович		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Чернышев Александр Юрьевич	к.т.н., доцент		

**КОНСУЛЬТАНТЫ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Фигурко Аркадий Альбертович	к.э.н., доцент		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры ЭБЖ	Король Ирина Степановна	к.х.н., до- цент		

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Электропривода и электрооборудования	Дементьев Юрий Николаевич	к.т.н., доцент		

Томск – 2017 г.

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

Институт Энергетический  
 Направление подготовки 13.03.02 – «Электроэнергетика и электротехника»  
 Кафедра Электропривода и электрооборудования

УТВЕРЖДАЮ:  
 Зав. кафедрой  
 \_\_\_\_\_ Дементьев Ю.Н.  
 (Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

**ЗАДАНИЕ  
 на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

Дипломного проекта
--------------------

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

Студенту:

Группа	ФИО
3–5Г2Б1	Толкачеву Александру Александровичу

Тема работы:

<i>Электропривод волочильной машины производства гибких теплонагревательных элементов</i>	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	ИнЭО от 17.04.2017г. №2687/с

Срок сдачи студентом выполненной работы:	Июнь 2017 года.
--	-----------------

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<p><b>Исходные данные к работе</b>  <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></p>	<p><i>Материалы преддипломной практики, техническая литература, техническая документации</i></p>
<p><b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b>  <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; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<p><i>Введение; описание технологического процесса; обоснование и выбор системы электропривода; выбор элементов и расчет параметров силового канала регулируемого электропривода; расчет статических и динамических характеристик, Исследование имитационной модели асинхронного электропривода волочильной машины, социальная ответственность проекта; финансовый менеджмент; заключение.</i></p>

<b>Перечень графического материала</b> (с точным указанием обязательных чертежей)		- Схема электрическая принципиальная; <input type="checkbox"/> - Схема электрическая функциональная; <input type="checkbox"/> - Схема электрическая структурная; <input type="checkbox"/> - Имитационная модель ПЭД;
<b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b> (с указанием разделов)		
<b>Раздел</b>	<b>Консультант</b>	
«Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»	Фигурко Аркадий Альбертович	
«Социальная ответственность»	Король Ирина Степановна	

<b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b>	10 марта 2017года
---	-------------------

**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
3–5Г2Б1	Толкачев Александр Александрович		.

## РЕФЕРАТ

**Структура и объем ВКР.** Выпускная квалификационная работа состоит из введения, трех глав, выводов по работе, выполнена на 123 страницах машинописного текста, содержит 40 рисунков, 23 таблиц, список использованной литературы из 26.

**Цель работы:** Математическое, алгоритмическое обоснование и разработка системы векторного бездатчикового управления (СВБУ) асинхронным двигателем (АД) с короткозамкнутым (КЗ) ротором, для волочильной машины на базе общей трансмиссии.

**Методы исследований.** В выпускной квалификационной работе применены: положения математической теории электрических машин, методы, используемые при описании динамических процессов электромеханического преобразования энергии, численные методы Эйлера, математическое моделирование и программирование в среде моделирования Simulink MatLab и программной оболочке MathCad.

### **Научная новизна работы заключается в следующем:**

Произведен анализ наблюдателя состояния координат недоступных для прямого измерения и установлено, что для электроприводов волочильных машин наиболее целесообразным является применение неадаптивного наблюдателя.

### **Практическая ценность работы:**

Получена имитационная модель системы векторного управления электроприводом волочильной машины. Доказана возможность применения системы векторного управления волочильной машины на действующем предприятии кабельной промышленности.

### **Ключевые слова:**

Волочильная машина, волочение проволоки, неадаптивный наблюдатель, бездатчиковое векторное управление состояний, преобразователь частоты.

## СОДЕРЖАНИЕ

	с.
Введение	7
1. Основные положения теории волочения проволоки и обзор существующих систем электроприводов волочильных машин	11
1.1 Технологический процесс волочения проволоки	11
1.2 Основные существующие системы электроприводов волочильных машин	13
1.2.1 Волочильные машины, работающие без накопления и с изменением скольжения проволоки на барабанах	15
1.2.2 Электропривод с последовательным соединением якорей двигателя	16
1.2.3 Электропривод с параллельным соединением якорей двигателей	18
1.2.4 Электропривод с индивидуальным питанием двигателей	19
1.2.5 Электропривод с общим редуктором вытяжных барабанов	20
1.3 Уточнение технологических требований к электроприводу волочильной машины	22
1.4 Выбор типа электропривода	24
1.5 Общие выводы по главе и постановка задачи исследования	26
2. Разработка системы векторного управления асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором	27
2.1 Математическое описание асинхронного двигателя как объекта управления	27
2.2 Разработка системы векторного управления асинхронным электроприводом	30
2.3 Система бездатчикового векторного управления асинхронным электроприводом	38
2.3.1 Наблюдатели СВУ	39
2.3.2 Оценка возможности прямого измерения потокосцепления ротора двигателя и угла поворота	40
2.4 Комбинированный неадаптивный наблюдатель скорости и потокосцепления ротора	41
2.4.1 Косвенное определение значений угла поворота ( $\theta$ ) и потокосцепления ротора ( $\psi_r$ )	41
2.4.2 Косвенное определение скорости вращения ротора ( $\omega_R$ )	44
2.5 Выводы	46
3. Исследование системы векторного управления электроприводом главного движения волочильной машины	47
3.1 Расчет основных силовых элементов системы	47
3.1.1 Расчет мощности волочения проволоки и выбор электродвигателя	47
3.1.2 Расчет основных параметров и характеристик двигателя	50
3.1.3 Расчет переходных процессов при прямом пуске двигателя	59
3.1.4 Выбор преобразователя частоты	68

3.2 Синтез системы управления	69
3.2.1 Функциональная схема электропривода на базе асинхронного двигателя и преобразователя частоты Simovert 7132	69
3.2.2 Оптимизация контуров регулирования	72
3.2.2.1 Оптимизация контура тока	72
3.2.2.2 Оптимизация контура потокосцепления	76
3.2.2.3 Оптимизация контура скорости	78
3.3 Исследование САУ РЭП с использованием модели двигателя во вращающейся системе координат	82
3.3 Выводы	85
4. Производственная безопасность	88
4.1 Описание технологического процесса и рабочего места	88
4.2 Анализ вредных производственных факторов и обоснование мероприятий по их устранению	89
4.3 Защита окружающей среды	93
4.4 Предотвращение ЧС и устранение их последствий	93
4.5 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	94
5. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	98
5.1 Инициализация проекта	98
5.2 Планирование научно-исследовательских и пуско-наладочных работ	102
5.3 Расчет бюджета проекта по внедрению частотного электропривода	110
5.4 Определение ресурсной (ресурсосберегающей) и экономической эффективности исследования	115
Заключение	119
Список использованных источников	121

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы.** Режимы работы технологических механизмов значительно отличаются друг от друга. Многие из этих механизмов по условиям технологического процесса для обеспечения необходимого качества продукции требуют регулирования скорости в диапазоне от 1:2 до 1:10. На сегодняшний день электропривод подавляющего большинства механизмов может быть выполнен на основе асинхронного короткозамкнутого двигателя управляемого статическим преобразователем частоты. Частотное регулирование скорости может осуществляться плавно, в широком диапазоне. При этом регулировочные характеристики имеют высокую жёсткость, а двигатель сохраняет большую перегрузочную способность. В силу отмеченных высоких показателей частотный способ находит всё более широкое применение. К тому же, на различных производствах, система преобразователь частоты – асинхронный двигатель, является одним из возможных способов создания бездатчикового регулируемого электропривода. Бездатчиковые системы векторного управления – относительно небольшой (менее 10%), но исключительно важный и постоянно расширяющийся сектор применения частотно – регулируемого электропривода. В рамках настоящей выпускной квалификационной работы, представлен ряд вариантов решения задачи синтеза системы бездатчикового векторного управления асинхронным электродвигателем и внедрения данной системы в кабельное производство.

В настоящее время оборудование волочильного передела на большинстве метизных предприятий России выработало свой ресурс, находится в изношенном состоянии и требует комплексной реконструкции. Большинство волочильных машин оснащено групповыми электроприводами постоянного тока с последовательным либо параллельным соединением якорей с устаревшими системами регулирования (в большинстве случаев по цепи возбуждения двигателей).

Эксплуатируемые волочильные машины в - это машины с накоплением проволоки (магазинного типа). Подобные машины имеют не только повышен-

ные энергозатраты, но и неспособны осуществлять высокоскоростные процессы волочения. Исследования технико-экономических показателей различных машин метизных заводов показали, что коэффициент технического использования волочильных машин составляет менее 0,5.

Основными факторами, снижающими производительность машин являются обрывность проволоки, большие затраты времени на проведение вспомогательных, операций (заправку машины, остановку для замены катушек намоточных аппаратов).

Повысить эффективность процесса волочения возможно применением машин с общим для всех вытяжных барабанов редуктором. Однако у эксплуатируемых в настоящее время машин с общим редуктором, также наблюдается высокая обрывность проволоки, из-за чего в некоторых случаях теряется до 44% рабочего времени. Основная причина высокой обрывности – неудовлетворительная система управления электроприводом.

В подавляющем большинстве работ, посвященных автоматизированному электроприводу волочильных машин, разрабатывается, либо совершенствуется групповой электропривод, построенный на базе двигателей постоянного тока с последовательным, либо параллельным соединением якорей. Основополагающие труды датированы 60-ми...80-ми годами, прошлого века.

Эксплуатируемые сегодня системы электропривода волочильных машин не удовлетворяют постоянно возрастающим технологическим требованиям.

В связи со сложившейся ситуацией возникла необходимость в современных научно-технических разработках, направленных на создание новых и модернизацию существующих агрегатов для производства проволоки.

**Патентный обзор.** В настоящее время патентной документации на тему АСУ электроприводами волочильных машин не зарегистрировано (по данным ФГУ ФИПС) [1]. Но существуют патенты по процессу волочения проволоки и устройствам его осуществляющим. По данным The United States Patent and Trademark Office зарегистрирован патент Drawing process control method (08/418,615) от 7 апреля 1995 года [2] <http://www.uspto.gov>. По данным патент-



ного поиска можно сделать вывод о том, АСУ ТП волочением проволоки может быть выполнена разнообразными способами, и разработчики не считают необходимым патентовать свои проекты.

**Цель работы:** Математическое, алгоритмическое обоснование и разработка системы векторного бездатчикового управления (СВБУ) асинхронным двигателем (АД) с короткозамкнутым (КЗ) ротором, для волочильной машины с общим редуктором.

Для достижения цели в работе были поставлены и решены следующие задачи:

- Разработана и настроена система векторного управления волочильной машины, с учетом требований технологического процесса;
- Выполнено исследование работоспособности системы управления (СУ) АД при различных режимах работы технологического оборудования; Проанализированы существующие структуры бездатчиковых систем управления и синтезирован наблюдатель состояний для построения СВБУ;
- Исследовано качество работы разработанной системы векторного управления;

**Методы исследований.** В выпускной квалификационной работе применены:

- положения математической теории электрических машин;
- методы, используемые при описании динамических процессов электромеханического преобразования энергии;
- численные методы Эйлера;
- математическое моделирование и программирование в среде моделирования Simulink MatLab и программной оболочке MathCad.

### **Научная новизна работы заключается в следующем:**

Анализировано состояния координат недоступных для прямого измерения, также установлено, что для электроприводов волочильных машин целесообразнее применение неадаптивного наблюдателя.

Теоретически и экспериментально доказано, что разработанный электропривод волочильной машины удовлетворяет всем требованиям технологического процесса волочения проволоки в заданных режимах работы.

### **Практическая ценность работы:**

Получена имитационная модель системы векторного управления электроприводом волочильной машины, которая доказала возможность применения ее на действующем предприятии кабельной промышленности.

### **Реализация результатов работы.**

Полученные результаты будут использованы:

- При настройке бездатчиковых векторных электроприводов в ООО «Стройкомплект», при модернизации линии изготовления проволоки;
- В учебном процессе, на кафедре ЭПЭО, при выполнении курсовых и выпускных квалификационных работ.

### **На защиту выносятся:**

- Структура неадаптивного наблюдателя скорости асинхронного электродвигателя;
- Структуры и модели систем векторного управления с неадаптивным наблюдателем скорости.

# ГЛАВА 1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕОРИИ ВОЛОЧЕНИЯ ПРОВОЛОКИ И ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ВОЛОЧИЛЬНЫХ МАШИН

## 1.1 Технологический процесс волочения проволоки

Процесс волочения проволоки относится к числу основных технологических операций изготовления проволоки.

Из приведенной на рисунке 1.1 схемы видно, что в результате протягивания под воздействием силы волочения  $F$ , поперечное сечение проволоки уменьшается, длина возрастает, а объем металла после волочения (протяжки) остаётся постоянным.

Обозначив через  $d_0, l_0, s_0$ , соответственно диаметр, длину и площадь поперечного сечения до волочения, а через  $d_1, l_1, s_1$ , - диаметр, длину и площадь поперечного сечения после волочения определим основные параметры рассматриваемого процесса. К этим параметрам относятся: обжатие, удлинение и коэффициент вытяжки. Под обжатием понимается разница сечений до волочения, и после волочения.

Различают абсолютное обжатие

$$\delta_{abc} = s_0 - s_1 \quad (1.1)$$

и относительное обжатие

$$\delta = \frac{(s_0 - s_1)}{s_0} = \frac{(d_0^2 - d_1^2)}{d_0^2} \quad (1.2)$$

Относительное обжатие может быть выражено в процентах. Под удлинением понимается разница длин после и до волочения.

Абсолютное удлинение

$$\lambda_{abc} = l_1 - l_0 \quad (1.3)$$

Относительное удлинение

$$\lambda = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \quad (1.4)$$

Относительное удлинение может быть выражено в процентах.

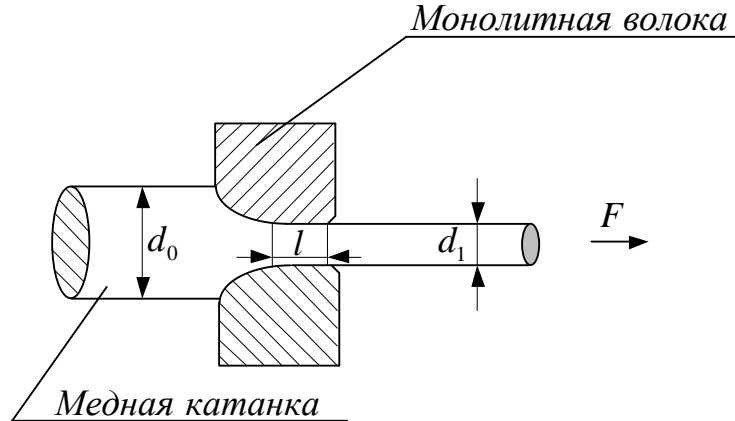


Рисунок 1.1 – Схема процесса волочения

Величина коэффициента вытяжки определяется из соотношения, длины после волочения к длине до волочения

$$\mu = \frac{l_1}{l_0} = \frac{s_0}{s_1} = \frac{d_0^2}{d_1^2} \quad (1.5)$$

Исходя из условия постоянства объема подвергаемой волочению проволоки, определяется связь между приведёнными выше зависимостями

$$\delta = \frac{(d_0^2 - d_1^2)}{d_0^2} = \frac{\lambda}{\lambda + 1} = \frac{\mu - 1}{\mu} \quad (1.6)$$

$$\lambda = \frac{(d_0^2 - d_1^2)}{d_0^2} = \frac{\delta}{1 - \delta} = \mu - 1 \quad (1.7)$$

$$\mu = \frac{l_1}{l_0} = \frac{d_0^2}{d_1^2} = \frac{1}{1 - \delta} = \lambda + 1 \quad (1.8)$$

Значение величин обжатия, удлинение, вытяжки, получаемые в результате протяжки заготовки через одну волоку (однократное волочение), называют единичным  $\delta_{ед.}$ ,  $\lambda_{ед.}$ ,  $\mu_{ед.}$ . При протяжке заготовки через несколько волок с

постоянным уменьшением сечения их отверстий (многократное волочение) получаем суммарное значение указанных величин [3].

## **1.2 Основные существующие системы электроприводов волочильных машин**

Для выполнения процесса волочения проволоки, столь разнообразной номенклатуры по маркам и большому диапазону по размерам, применяются барабанные волочильные станы различных типов (см. рис. 1.2). Они независимо от их деления на различные группы по способу волочения, размерам протягиваемой проволоки и другими конструктивными особенностями состоят из следующих основных узлов:

- протягивающего барабана, создающего силу волочения;
- электропривода к нему, состоящего из редуктора, через который передаётся вращение от электродвигателя к барабану, приводного электродвигателя постоянного или переменного тока, сочленённого с редуктором посредством эластичной муфты или клиноремённой передачи;
- щита станций управления и пульта управления.

Таков основной состав узлов стана при индивидуальном электроприводе на каждый барабан.

В групповом электроприводе передача вращения от электропривода ко всем барабанам стана осуществляется через общую трансмиссию. В состав электропривода входят: приводной электродвигатель, щит управления электроприводом и устройство, передающее движение от электродвигателя трансмиссии.

По кратности названные станы делятся на станы однократного волочения и многократного волочения.



Рисунок 1.2 – Классификация волоочильных машин

Станы однократного волоченья используются главным образом при волочении особо толстой проволоки (6 мм и более) с протягиванием её только через одну волоку и одновременным наматыванием на барабан, с которого она потом снимается в виде готового мотка, передаваемого на следующую протяжку.

Станы многократного волоченья дают возможность вести процесс волочения одновременно через несколько волок с последовательно уменьшающимися размерами их отверстий. Это позволяет резко повесить скорости волочения, особенно на последних по ходу движения проволоки барабанах, и достигнуть больших суммарных обжатий. На этих станах производится волочение проволоки почти всех размеров, начиная от толстой (8÷11 мм), заканчивая микропроволокой.

### 1.2.1 Волоочильные машины, работающие без накопления и с изменением скольжения проволоки на барабанах

В производстве работает большое число многократных барабанных волоочильных станов с различной конструкцией, которые по способу волочения можно разделить на следующие группы.

1. Станы, работающие без изменения запаса проволоки на промежуточных барабанах: с автоматическим регулированием скоростей промежуточных барабанов; со скольжением проволоки на промежуточных барабанах.

2. Станы, работающие с изменением запаса проволоки на промежуточных барабанах (магазинного типа).

Принцип работы станов первой группы основан на законе равенства объёмов металла, протягиваемого через любую волоку многократного волоочильного стана за равные промежутки времени:

$$s_0 \cdot v_0 = s_1 \cdot v_1 = \dots = s_{k-1} \cdot v_{k-1} = s_k \cdot v_k \quad (1.2.1)$$

где  $v_0 \dots v_k$  - скорость протягиваемого металла;

$s_0 \dots s_k$  - площадь его сечения.

Сохранение этого равенства, которое называется равенством секундных объёмов, в течение всего процесса волочения является необходимым условием непрерывной и бесперебойной работы стана.

В практике это равенство нарушается вследствие износа с течением времени рабочего канала волок и обусловленное этим увеличением поперечного сечения протягиваемой проволоки на одном или нескольких промежуточных барабанах. Для восстановления равенства [1.2.1] необходимо уменьшить скорость вращения соответствующих промежуточных барабанов, что осуществляется двумя принципиально различными способами:

– Непрерывным автоматическим регулированием скоростей промежуточных барабанов в течение всего цикла волочения при отсутствии скольжения на них проволоки.

По этому принципу работают волочильные станы без скольжения (петлевые и прямоточные),

– Изменением скоростей волочения за счет изменения величины относительного скольжения проволоки на промежуточных барабанах при постоянной скорости последних.

По этому принципу работают волочильные станы со скольжением.

### **1.2.2 Электропривод с последовательным соединением якорей двигателя**

На рис. 1.2.2 приведена укрупненная функциональная схема электропривода петлевого волочильного стана с последовательным соединением приводных двигателей. Главной особенностью такой схемы является обеспечение саморегулирования процесса волочения при наличии механической связи между барабанами. В волочильном стане такой механической связью является проволока, одновременно обрабатываемая в нескольких волоках. Процесс волочения производится при наличии задних натяжений, величины которых в широких пределах можно задать изменением потока возбуждения соответствующих приводных двигателей.

Регулирование скорости волочения осуществляется изменением подводимого к последовательно включенным якорям напряжения. Система управления выполняется по принципу подчиненного регулирования координат с внутренним контуром тока и внешним контуром регулирования э.д.с. При расчете регуляторов учитывается тот факт, что динамические характеристики такого привода определяются электромагнитной постоянной, равной постоянной времени якорной цепи всего стана, и электромеханической постоянной, равной среднему значению электромеханических постоянных времени отдельных приводов барабанов.



Практика промышленной эксплуатации петлевых станов показывает, что вследствие изменения условий колебания сил натяжений, деформации металла и противонапряжений могут достигать  $\pm 50\%$ . Кроме того, на указанные отклонения накладываются упругие свойства металла, приводящие к возможности полной потери противонапряжения, что является причиной нарушения технологического процесса и возникновения аварийных режимов.

Задание скорости

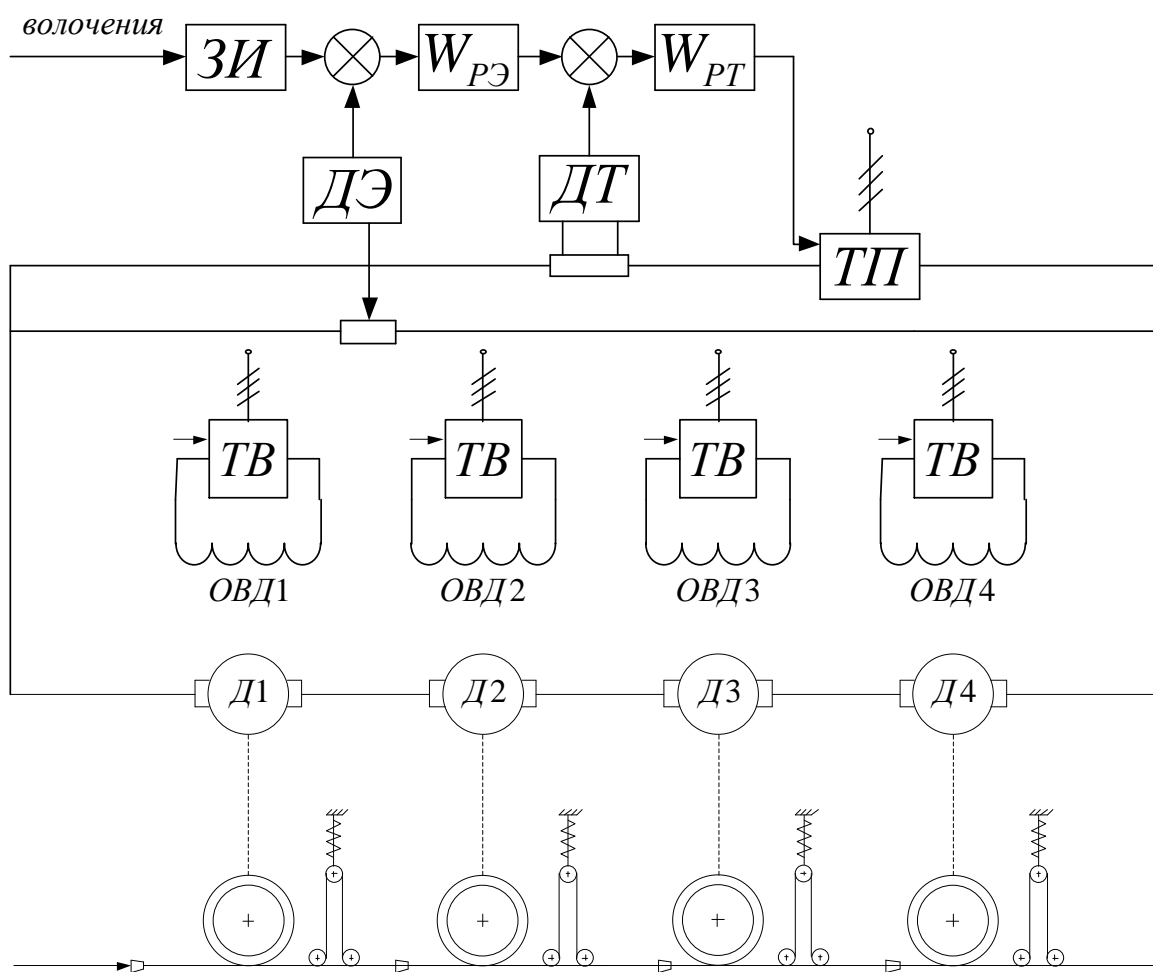


Рисунок 1.2.2 – Функциональная схема электропривода волочильной машины с последовательным соединением якорей двигателей

Эксплуатация таких систем показала их низкую надежность работы, невозможность длительной и устойчивой работы при высоких скоростях волочения. Здесь установившиеся один раз при заправке проволоки величины проти-

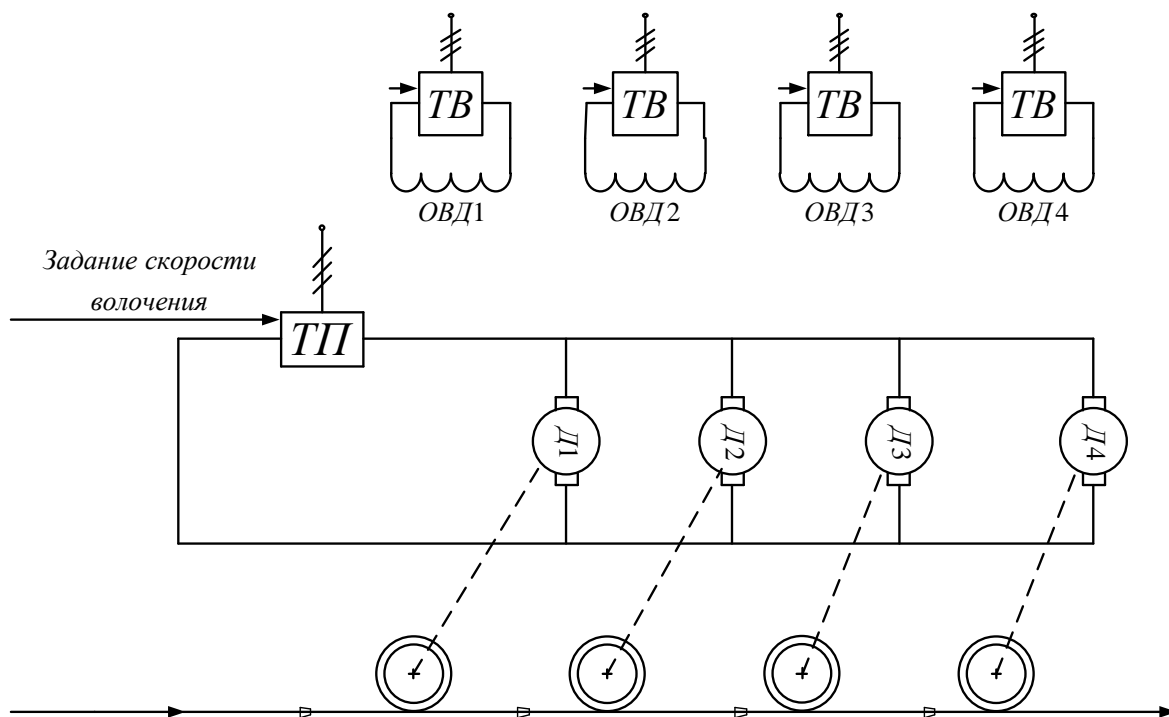
вонатяжений в дальнейшем остаются неизменными при любых скоростях волочения, определяемых напряжением питания. Противонатяжения также не меняются при одновременном пропорциональном изменении потоков возбуждения двигателей. Однако на величину противонатяжения существенное влияние оказывает давление металла на волоку, а также вследствие различной механической инерционности блоков - ускорением и замедлением стана.

### **1.2.3 Электропривод с параллельным соединением якорей двигателей**

При реализации схем с параллельным включением якорей двигателей (см. рис. 1.2.3) следует учитывать, что без специально организованных систем управления каждое противонатяжение существенно, и притом по своему закону, зависит от напряжения на выходе тиристорного преобразователя (частоты напряжения на выходе преобразователя частоты). Попытки использовать параллельное соединение якорей двигателей выявили следующие недостатки:

- сложная ручная настройка стана;
- наличие со стороны волочильщика непрерывного наблюдения за работой стана и контролем противонатяжения;
- крайне нестабильная работа волочильного стана (потеря противонатяжения особенно в динамических режимах, частый обрыв проволоки, проскальзывание проволоки по барабанам).

Наиболее устойчивой работы прямоточных станов с параллельным соединением двигателей удалось достигнуть при применении систем автоматического управления, действующих как системы компенсации отклонений, ведущих к обрыву проволоки. Алгоритм работы подобных систем основан на уравнении взаимосвязи силовых параметров процесса волочения, согласно которому противонатяжение играет роль синхронизирующей связи между вытяжными барабанами и обеспечивает стабильность процесса волочения при различного рода возмущениях.



Ри-

сунк 1.2.3 – Функциональная схема электропривода волочильной машины с параллельным соединением якорей двигателей

#### 1.2.4 Электропривод с индивидуальным питанием двигателей

Управление станом по каналу обмотки возбуждения, как это сделано в рассмотренных выше схемах, низкодинамично и не позволяет обрабатывать высокочастотные возмущения, связанные с колебанием натяжения и противонапряжения. Индивидуальное питание двигателей выгодно отличается тем, что обеспечивает высокое быстродействие (за счет управления двигателями постоянного тока по цепи якоря, или использования преобразователей частоты в системах привода на базе ПЧ-АД).

На рис. 1.2.4 приведена схема современного петлевого волочильного стана. В качестве элемента, контролирующего секундный объем металла и синхронизирующего скорости вращения приводных двигателей используется ролик, имеющий пневмопривод.

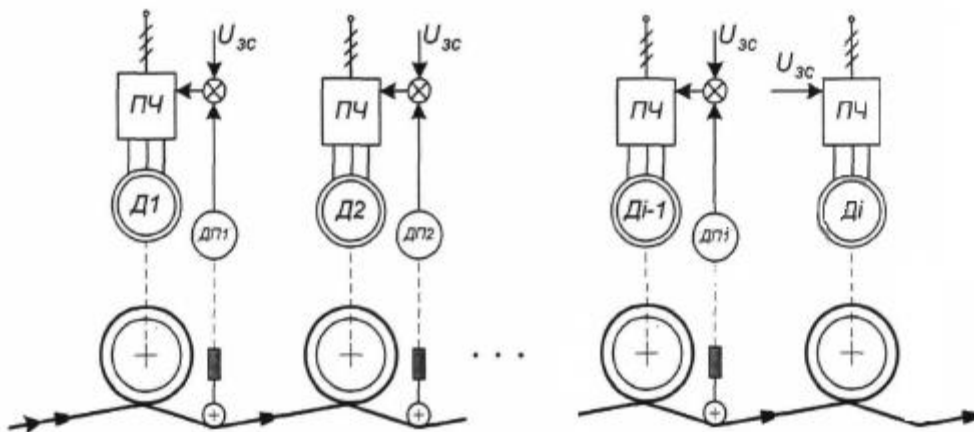


Рисунок 1.2.4 – Функциональная схема электропривода волочильной машины с индивидуальным питанием двигателей

При отклонении ролика от заданного положения датчик приближения, формирует сигнал, воздействующий на вход преобразователя частоты. Воздействие осуществляется таким образом, что скорость двигателя предыдущего барабана корректируется и восстанавливает секундный объем металла в контролируемом месте стана.

При скоростях волочения в 15...25 м/с ход ролика не превышает 50 мм.

Приращение изменения момента противонапряжения равно изменению момента волочения. Таким образом, реакция системы с индивидуальным питанием двигателя на изменение момента волочения аналогична системе с последовательным соединением якорей двигателей (см.п. 1.2.2).

### 1.2.5 Электропривод с общим редуктором вытяжных барабанов

В настоящее время наиболее перспективным направлением развития электроприводов для волочильных машин является электропривод имеющий общую трансмиссию: все барабаны волочильной машины жестко соединены с

редуктором. Функциональная схема волочильной машины приведена на рис. 1.2.5.

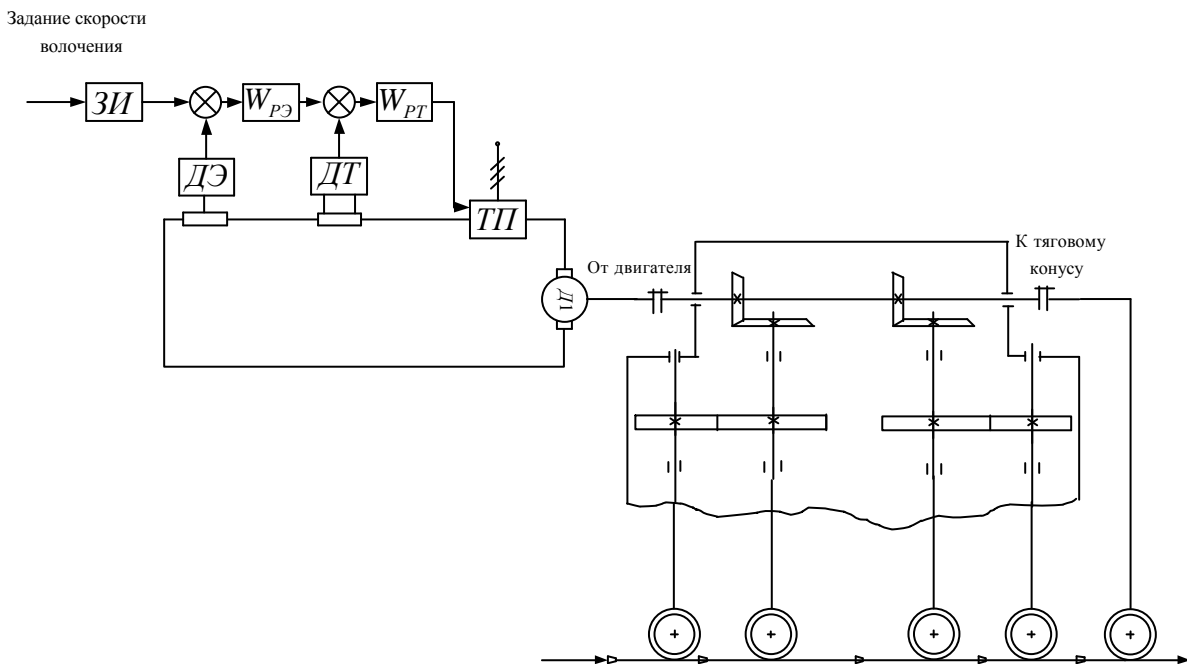
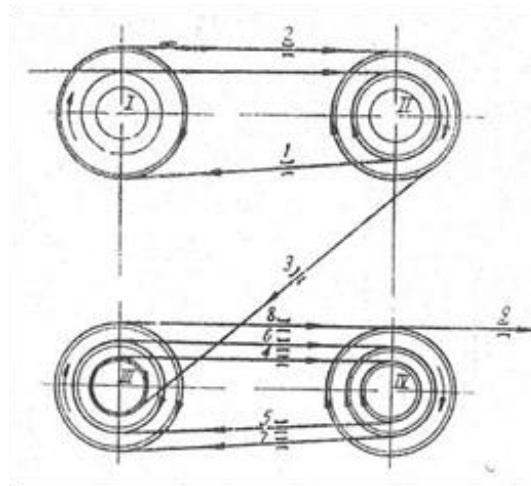


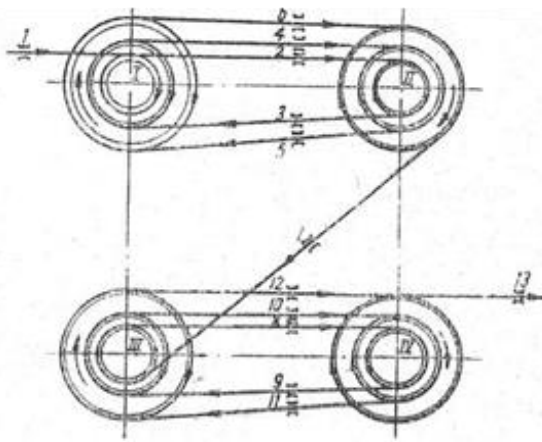
Рисунок 1.2.5 – Функциональная схема электропривода волочильной машины с общим редуктором

Привод машины осуществляется от электродвигателя через трехскоростной редуктор; соединение вала электродвигателя с редуктором и редуктора с главным валом машины осуществляется зубчатыми муфтами. Основной недостаток такой схемы это использование электрического двигателя постоянного тока, а также сложность настройки системы управления и не высокий коэффициент полезного действия.

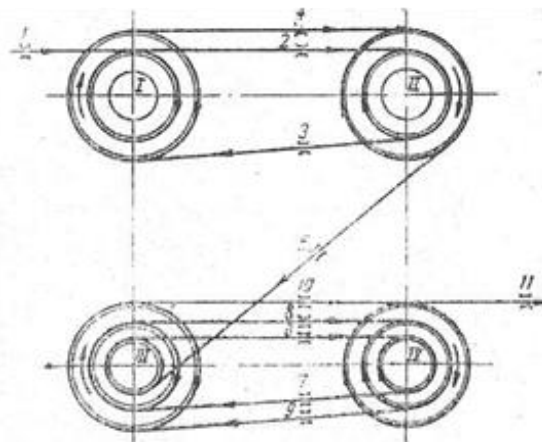
Также необходимо отметить, что каждый тяговый ролик имеет 3 ступени. Таким образом, заправка машины проволокой происходит в соответствии со схемами, представленными на рисунках 1.2.5.1.



а)



б)



в)

Рисунок 1.2.5.1 – Схема заправки машины при волочении проволоки за 7(а), 11(б) и 13(в) протяжек

### 1.3 Уточнение технологических требований к электроприводу волочильной машины

Требования, предъявляемые к автоматизированным электроприводам волочильных машин определяются технологическим процессом. Автоматизированный электропривод должен обеспечивать следующие режимы работы: заправка машины; разгон заправленной машины из состояния покоя до рабочей скорости; работа на установившейся скорости; прокатка (волочение) сварных швов на пониженной скорости; торможение машины; аварийный остановкой машины.

Заправка проволоки во все волокни и на шпулю моталки, является одной из наиболее трудоемких операций. Во время заправки осуществляется предварительное пропускание проволоки через отверстие волокни и ее намотки на вытяжном барабане и на шпуле моталки. Как правило, заправка производится вручную в толчковом режиме и сопровождается (для непрерывных машин) многократными пусками и торможениями. Величина заправочной скорости не должна превышать 0,5... 1 м/с. Это ограничение вводится с целью минимизации обрыва проволоки и исключения несчастных случаев с обслуживающим персоналом. Следует также отметить, что на волочильных машинах в период заправки вследствие отсутствия (либо недостаточности) смазки в очаге деформации, значительно возрастает усилие волочения и для некоторых труднодеформируемых металлов и сплавов может даже превышать его предел прочности. Следовательно, для обработки таких металлов и сплавов необходимо применять исключительно процесс прокатки.

Разгон заправленной машины из состояния покоя до рабочей скорости и торможение с рабочей скорости до полной остановки. Основным требованием к динамическому режиму работы является обеспечение плавности разгона (торможения) с сохранением межочаговых натяжений вплоть до состояния покоя. В противном случае, как возникновение рывков, так и потеря межочаговых натяжений приводит к аварийным режимам. На волочильных машинах возникает превышение удельных натяжений проволоки предела прочности и, как правило, ее обрыв. Это объясняется тем, что коэффициент трения покоя значительно выше коэффициента трения скольжения. Величина ускорения не должна превышать 1...2 м/с<sup>2</sup>. Кроме того, как показали исследования, проведенные в облегчить условия трогания возможно путем вращения волокни.

Таким образом, к автоматизированным электроприводам современных волочильных станков предъявляются следующие требования:

– обеспечение регулирования скорости, как в статических, так и в динамических режимах работы с ошибкой, не превышающей  $\pm 5\%$ ; диапазон регулирования скорости в пределах 1:50;

- обеспечение заправочного и толчкового режима работы;
- обеспечение постоянного ускорения при пусках и торможениях;
- обеспечение режимов рабочего, экстренного и аварийного торможения с рекуперацией энергии в сеть.

#### **1.4 Выбор типа электропривода**

Выполнение требований, предъявляемых со стороны технологии к электроприводу волочильной машины, в настоящее время могут обеспечить электроприводы следующих типов:

1. Регулируемый электропривод постоянного тока, выполненный по системе "тиристорный преобразователь - двигатель" (ТП-Д).

2. Асинхронный регулируемый электропривод по системе преобразователь частоты со звеном постоянного тока (автономный инвертор с широтно-импульсной модуляцией) - асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором (ПЧ-АД).

До последнего времени системы электроприводов волочильных машин строились исключительно на базе двигателей постоянного тока. Причиной этому являлось отсутствие надежных преобразователей частоты. Однако системы ТП-Д имеют такие недостатки, как:

- ограничение темпа нарастания тока якоря, повышенный момент инерции электропривода, приводящие к снижению быстродействия систем автоматического регулирования;
- высокие массогабаритные показатели;
- трудоемкость в обслуживании.

Перечисленные недостатки обусловлены наличием коллектора и соответственно процессов коммутации и могут быть исключены при построении системы электропривода на основе асинхронного короткозамкнутого двигателя.



В настоящее время имеется достаточный опыт промышленного применения электроприводов по системе ПЧ-АД в диапазоне мощностей 35... 100 кВт. В табл. 1.4 приведены рыночные цены на системы таких электроприводов различных фирм производителей.

Таблица 1.4 Рыночная стоимость систем электроприводов

Производитель	Стоимость системы электропривода тыс. рублей/кВт	
	ТП-Д	ПЧ-АД
Siemens	4,8	3,6
ABB	6,2	4,6
Control Techniques	5,7	4,3
Omron	-	4,3
Hyundai	-	4,7
Mitsubishi Electric	-	3,4
IG	-	3,6
Среднерыночный показатель	5,6	4,1

Анализ данных табл. 1.4 показывает, что удельный показатель цена/кВт для систем ПЧ-АД в 1,36 раза меньше, чем для ТП-Д. Таким образом, с точки зрения экономической целесообразности система ПЧ-АД обладает неоспоримым преимуществом.

Вместе с тем, системы электропривода ПЧ-АД обладают известными недостатками. В них осуществляется двукратное преобразование напряжения питающей сети, что снижает к.п.д. системы электропривода в целом. Кроме того, имеет место ступенчатое регулирование выходного напряжения при частотах ниже 10 Гц.

Исходя из вышесказанного, в качестве автоматизированного электропривода волоочильной машины целесообразно принять систему ПЧ-АД.

## 1.5 Общие выводы по главе и постановка задачи исследования

В результате проведенного анализа технологического процесса волочения проволоки, существующих конструкций систем электроприводов волочильных машин, а также основных принципов работы современных систем управления электроприводами можно выделить основные преимущества и недостатки и сформулировать основные выводы.

1. Для изготовления проволоки среднего диаметра (1,8...3,0 мм) наиболее перспективными являются волочильные машины с общим для всех вытяжных барабанов редуктором, имеющие возможность значительного повышения эффективности процесса волочения за счет оптимизации энергосиловых параметров и повышения скорости процесса волочения.

2. Повысить эффективность процесса волочения возможно за счет модернизации существующих систем электроприводов, что приведет к существенному повышению к.п.д. процесса волочения в целом.

– В отношении энергоэффективности: за счет замены двигателя постоянного тока на асинхронный двигатель переменного тока.

– В отношении повышения скорости волочения: за счет использования более современной системы управления электроприводом.

3. В случае применения систем электропривода на базе асинхронных двигателей необходимо решить следующие основные задачи:

– Разработать математическую модель АД с КР как объекта управления для моделирования процессов на волочильной машине;

– Разработать систему управления электроприводом волочильной машины, произвести анализ динамических и статических свойств системы;

– Осуществить моделирование и исследовать разработанный электропривод.

4. Доказано, что электропривод по системе ПЧ-АД экономически выгоден для использования в качестве главного электропривода волочильной машины.

## **ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ВЕКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ АСИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ**

### **2.1 Математическое описание асинхронного двигателя как объекта управления**

Для упрощения создания математической модели асинхронного двигателя введем следующие допущения:

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

Обобщенная асинхронная машина показана на рисунке 2.1.1. Она содержит трехфазную обмотку на статоре и трехфазную обмотку на роторе. Обмотки статора и ротора подключены к симметричным трехфазным источникам напряжения. Математическое описание такой машины базируется на известных законах.

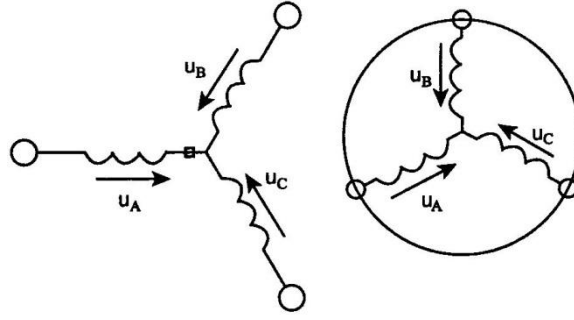


Рисунок 2.1.1 – Обобщённая асинхронная машина

На основании второго закона Киргофа для ротора и статора получаем

Для статора

$$\begin{aligned} U_{SA} &= R_{SA} \cdot I_{SA} + \frac{d\Psi_{SA}}{dt} \\ U_{SB} &= R_{SB} \cdot I_{SB} + \frac{d\Psi_{SB}}{dt} \\ U_{SC} &= R_{SC} \cdot I_{SC} + \frac{d\Psi_{SC}}{dt} \end{aligned}$$

Для ротора

$$\begin{cases} U_{RA} = R_{RA} \cdot I_{RA} + \frac{d\Psi_{RA}}{dt} \\ U_{RB} = R_{RB} \cdot I_{RB} + \frac{d\Psi_{RB}}{dt} \\ U_{RC} = R_{RC} \cdot I_{RC} + \frac{d\Psi_{RC}}{dt} \end{cases}$$

В уравнениях фигурируют мгновенные напряжения, токи потокосцепления статора и ротора, а также активные сопротивления обмоток.

Вспользуемся законом Ампера, который связывает потокосцепления обмоток с токами, протекающим по обмоткам:

Для статора

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

Для ротора

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

Уравнения для момента и механического равновесия:

$$M = \frac{Z_p}{\sqrt{3}} [I_{RA} \cdot (\Psi_{RB} - \Psi_{RC}) + I_{RB} \cdot (\Psi_{RC} - \Psi_{RA}) + I_{RC} \cdot (\Psi_{RA} - \Psi_{RB})]$$

$$J \frac{d\omega_r}{dt} = M - M_{назр}$$

После упрощения уравнений и приведения к двухфазной модели получим систему уравнений.

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

Полученная система является математическим описанием асинхронного двигателя во вращающейся системе координат. Учитывая что  $\omega_k = 0$ , на основании данной системы составим структурную модель для имитации переходных процессов в программной среде Matlab (см. рисунок 2.1.2).

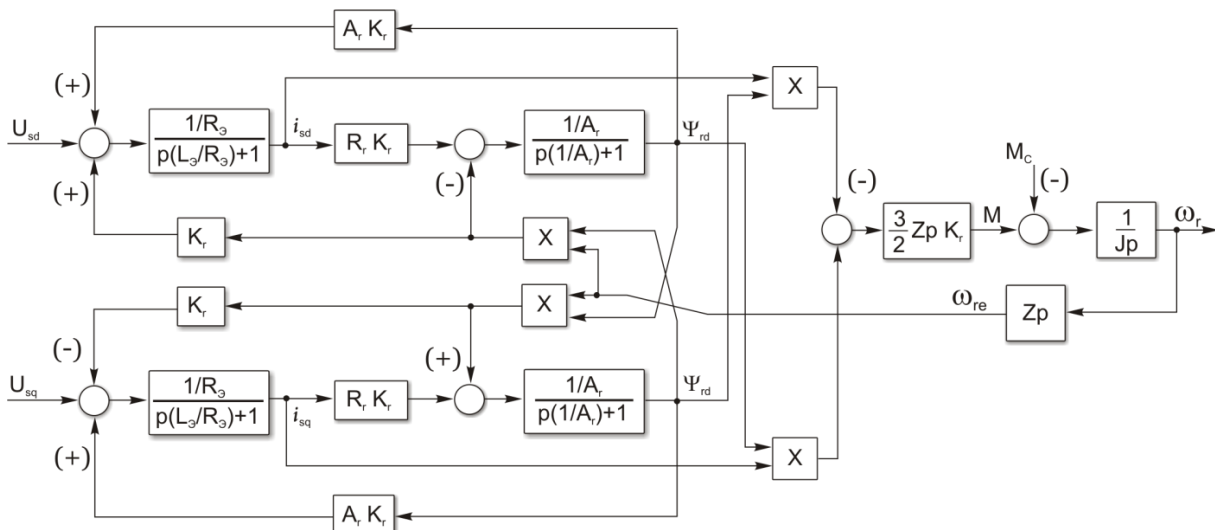


Рисунок 2.1.2 – Структурная схема асинхронного двигателя

## 2.2 Разработка системы векторного управления асинхронным электроприводом

В частотно-регулируемых асинхронных электроприводах векторное управление связано как с изменением частоты и текущих значений переменных (напряжения, тока статора, потокосцепления), так и с взаимной ориентацией их векторов в декартовой системе координат. За счет регулирования и амплитудных значений переменных, и фазовых углов между их векторами достигается наиболее качественное регулирование скорости, момента и тока асинхронного двигателя, как в статике, так и динамике. По требованиям технологического процесса диапазон регулирования скорости асинхронного двигателя не должен превышать  $D \leq 1:50$  следует применить бездатчиковую систему управления асинхронным электроприводом с векторным управлением. В таких системах информация о текущих значениях и пространственных положениях векторов потокосцепления и значениях скорости вращения асинхронного двигателя определяется косвенно по мгновенным значениям токов и напряжений фаз двигателя на основе математической модели асинхронного двигателя. Бездатчиковые системы векторного управления асинхронным двигателем из-за нестабильности параметров схемы замещения двигателя уступают системам с прямым векторным управлением.

Электромагнитный момент асинхронного двигателя можно определить через произведение вектора  $\psi_2^*$ , комплексно сопряженного с вектором потокосцепления обмотки ротора  $\overline{\psi_2}$ , и вектора тока статора  $\overline{I_1}$  [8].

Если сориентировать систему координат по действительной составляющей потокосцепления ротора  $\psi_{2x}$ , то мнимая составляющую вектора потокосцепления ротора  $\psi_{2y}$  будет равна нулю. В этом случае момент асинхронного двигателя пропорционален произведению действительной составляющей потокосцепления ротора  $\psi_{2x}$  и мнимой составляющей тока статора  $I_{1y}$ .

$$M = \frac{3 \cdot z_p \cdot X_m}{2 \cdot X_2'} (\psi_{2x} \cdot I_{1y}) \quad (2.2.1)$$

Функциональная схема асинхронного электропривода с бездатчиковым векторным управлением с ориентацией по вектору потокосцепления ротора приведена на рисунке 2.2.1.

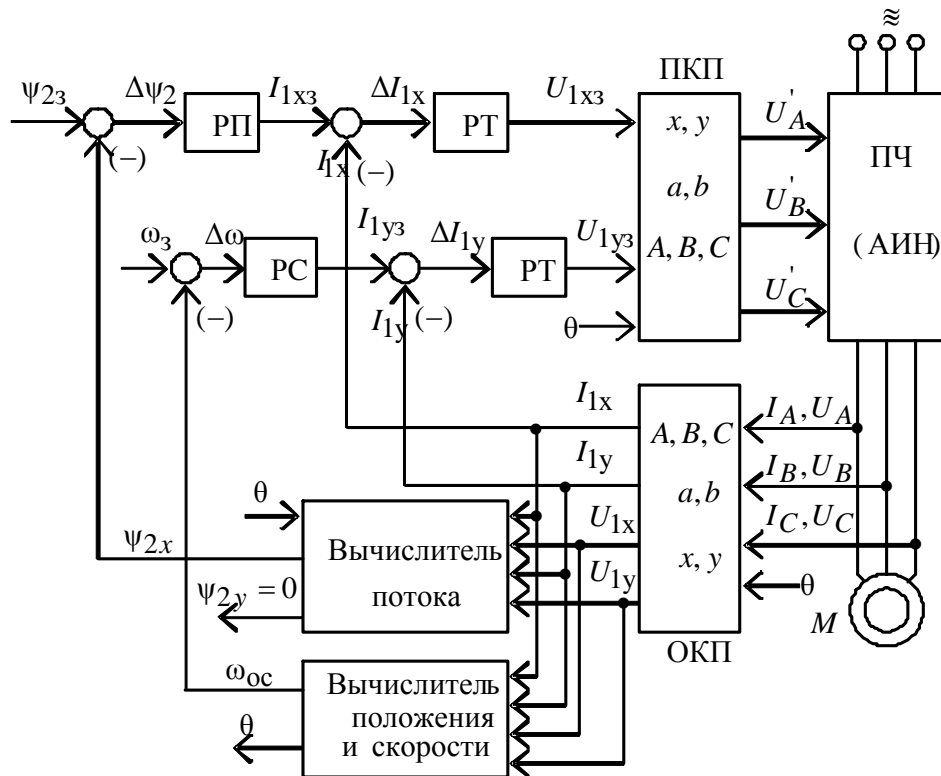


Рисунок 2.2.1- Функциональная схема асинхронного электропривода с бездатчиковым векторным управлением с ориентацией по вектору потокосцепления ротора

На рисунке 2.2.1 приняты следующие обозначения физических величин:

$\psi_{23}$  – сигнал задания потокосцепления ротора;

$\omega_3$  – сигнал задания скорости вращения электропривода;

$\psi_{2x}$  – сигнал, пропорциональный действительной составляющей потокосцепления ротора;

$\Psi_{2y}$  – сигнал, пропорциональный мнимой составляющей потокосцепления ротора;

$I_{1xz}$  – сигнал задания действительной составляющей тока обмотки статора;

$I_{1yz}$  – сигнал задания мнимой составляющей тока обмотки статора;

$I_{1x}$  – сигнал, пропорциональный действительной составляющей тока статора асинхронного двигателя во вращающейся системе координат;

$I_{1y}$  – сигнал, пропорциональный мнимой составляющей тока статора асинхронного двигателя во вращающейся системе координат;

$U_{1xz}$  – сигнал задания действительной составляющей напряжения обмоток статора асинхронного двигателя во вращающейся системе координат;

$U_{1yz}$  – сигнал задания мнимой составляющей напряжения обмоток статора асинхронного двигателя во вращающейся системе координат;

$U_{1x}$  – составляющая вектора напряжения обмотки статора, ориентированная вдоль оси  $x$  вращающейся системы координат;

$U_{1y}$  – составляющая вектора напряжения обмотки статора, ориентированная вдоль оси  $y$  вращающейся системы координат;

$I_A, I_B, I_C$  – токи фаз обмоток статора асинхронного двигателя;

$U_A, U_B, U_C$  – напряжения фаз обмоток статора асинхронного двигателя;

Схема содержит прямой (ПКП) и обратный (ОКП) координатные преобразователи. Преобразователи координат необходимы для того, что построение системы управления электроприводом переменного тока возможно только во вращающейся системе координат, а токи и напряжения обмоток асинхронного двигателя – гармонические сигналы неподвижной трехфазной системы координат. Взаимный перевод из одной системы координат в другую выполняют координатные преобразователи.



Регуляторами системы управления в соответствии с задающими сигналами скорости  $\omega_3$  и потокосцепления  $\psi_{23}$  и сигналами обратной связи формируются сигналы управления во вращающейся системе координат. В прямом координатном преобразователе управляющие сигналы переводятся в сигналы  $U'_A, U'_B, U'_C$  неподвижной системы координат, которые управляют инвертором.

Обратный координатный преобразователь сначала пересчитывает мгновенные значения напряжений и токов трехфазной системы координат  $A, B, C$  в неподвижную систему координат  $a, b$ :

$$U_{1a} = \frac{2}{3} \left[ U_{1A} - \frac{1}{2}(U_{1B} + U_{1C}) \right],$$

$$U_{1b} = \frac{1}{\sqrt{3}}(U_{1B} - U_{1C}),$$

$$i_\alpha = i_x \cos \theta - i_y \sin \theta,$$

$$i_\beta = i_x \sin \theta + i_y \cos \theta.$$

Затем напряжения и токи переводятся во вращающуюся систему координат  $x, y$

$$U_{1x} = U_{1a} \cos \theta + U_{1b} \sin \theta,$$

$$U_{1y} = -U_{1a} \sin \theta + U_{1b} \cos \theta,$$

$$i_x = i_\alpha \cos \theta + i_\beta \sin \theta,$$

$$i_y = -i_\alpha \sin \theta + i_\beta \cos \theta.$$

Мгновенное значение пространственных углов поворота векторов потокосцепления, тока и напряжения вычисляются на основании скорости вращения поля статора:

$$\theta = \int_0^t \omega dt.$$

Блок ВП (вычислитель потока) рассчитывает модуль и угол поворота вектора потокосцепления ротора, используя информацию о проекциях вектора

потокосцепления на оси  $\alpha$  и  $\beta$  неподвижной системы координат. Расчет производится по следующим формулам:

$$|\psi_2| = \sqrt{\psi_{2\alpha}^2 + \psi_{2\beta}^2};$$

$$\theta_{\psi_2} = \arctg\left(\frac{\psi_{2\beta}}{\psi_{2\alpha}}\right).$$

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

$$\left. \begin{aligned} U_{1x} &= R' \cdot (T_1 \cdot p + 1) \cdot I_{1x} - \frac{K_2}{T_2} \cdot \Psi_{2x} - L'_1 \cdot \omega_k \cdot I_{1y} - \frac{L_m}{L_2} \cdot z_p \cdot \omega \cdot \Psi_{2y} \\ U_{1y} &= R' \cdot (T_1 \cdot p + 1) \cdot I_{1y} - \frac{K_2}{T_2} \cdot \Psi_{2y} + L'_1 \cdot \omega_k \cdot I_{1x} + \frac{L_m}{L_2} \cdot z_p \cdot \omega \cdot \Psi_{2x} \\ 0 &= (T_2 \cdot p + 1) \cdot \Psi_{2x} - L_m \cdot I_{1x} - T_2 \cdot (\omega_k - z_p \cdot \omega) \cdot \Psi_{2y} \\ 0 &= (T_2 \cdot p + 1) \cdot \Psi_{2y} - L_m \cdot I_{1y} + T_2 \cdot (\omega_k - z_p \cdot \omega) \cdot \Psi_{2x} \\ M &= \frac{3}{2} \cdot K_2 \cdot z_p \cdot (\Psi_{2x} \cdot I_{1y} - \Psi_{2y} \cdot I_{1x}) \\ p \cdot \omega &= \frac{1}{J} \cdot (M - M_C) \end{aligned} \right\},$$

$$\text{где } K_2 = \frac{L_m}{L_2}, T_2 = \frac{L_2}{R_2}, T_1 = \frac{L'_1}{R'} = \frac{\sigma \cdot L_1}{R'}, R' = R_1 + R_2 \cdot \frac{L_m^2}{L_2^2},$$

$$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_1 \cdot L_2}, L' = \sigma \cdot L_1.$$

Если во вращающейся системе координат совместить ось  $x$  с вектором потокосцепления ротора, то  $|\bar{\Psi}_2| = \Psi_{2x}, \Psi_{2y} = 0$  тогда:

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

Систему регулирования скорости целесообразно рассматривать и реализовывать в системе координат, связанных с обобщенным вектором  $\psi_2$ . Система регулирования скорости должна быть двухкоординатной. Канал регулирования потокосцепления  $\psi_{2x}$  содержит два апериодических звена

$W(p) = \frac{1/R'}{T_1' \cdot p + 1}$  и  $W(p) = \frac{L_m}{T_2 \cdot p + 1}$ . Канал регулирования тока  $i_{1y}$  и момента со-

держит одно апериодическое звено  $W(p) = \frac{1/R'}{T_1' \cdot p + 1}$ .

Поэтому система регулирования канала потокосцепления  $\psi_{2x}$  должна строиться как двухконтурная система подчиненного регулирования, каждый из контуров которой настраивается на модульный оптимум с применением ПИ-регуляторов, компенсирующих соответствующие апериодические звенья.

Канал регулирования тока  $i_{1y}$  и момента содержит одно апериодическое звено и настраивается на модульный оптимум.

Для построения качественной системы регулирования скорости действие перекрестных связей в структурной схеме двигателя должно быть скомпенсировано введением соответствующих компенсирующих сигналов. В ре-

зультате образуются два независимых канала регулирования, в которых параметры регуляторов рассчитываются известными методами.

Преобразователь частоты в такой системе должен представлять собой транзисторный инвертор напряжения с синусоидальной ШИМ–модуляцией на высокой несущей частоте.

Практическая реализация асинхронного электропривода с векторным управлением связана с определенными техническими трудностями, обусловленными необходимостью измерения потокосцепления  $\psi_2$ , а также необходимостью применения прецизионных координатных преобразователей.

На основании вышеизложенного и в соответствии с рисунком 2.2.1 составим структурную схему асинхронного электропривода с векторным управлением на базе модели асинхронного двигателя в неподвижной (стационарной) системе координат. Структурная схема системы, показана на рисунок 2.2.2.

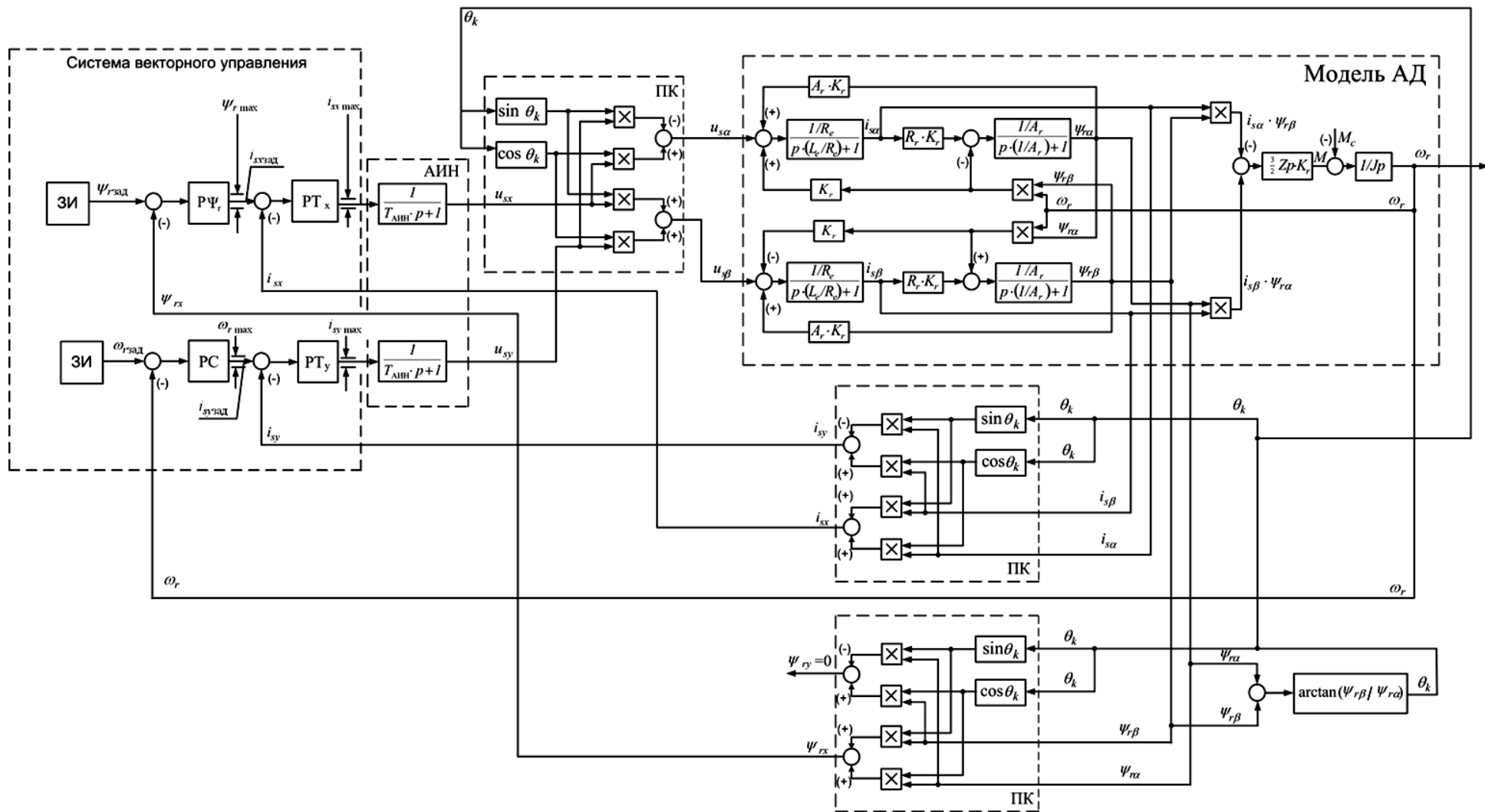


Рисунок 2.2.2 - Структурная схема САУ электроприводом с использованием модели двигателя в неподвижной системе координат

## **2.3 Система бездатчикового векторного управления асинхронным электроприводом**

Относительно небольшой (менее 10%), но исключительно важный и постоянно расширяющийся сектор применения частотно-регулируемого привода, требует применения более сложных бездатчиковых систем векторного управления асинхронными двигателями.

Бездатчиковое определение скорости может выполняться с использованием различных методов, сложность которых в значительной степени определяется требуемым диапазоном регулирования привода и требованиями к точности измерения скорости [9]. В [10] приведена классификация, в соответствии с которой методы определения скорости асинхронного двигателя подразделяются на пять групп.

К первой группе относятся неадаптивные методы, в которых скорость определяется непосредственно через измеряемые напряжение и ток статора, и методы, основанные на определении скорости через рассчитываемые в схеме частоты напряжения питания и роторной ЭДС. Вторую группу составляют адаптивные методы. Они ориентированы на замкнутые системы регулирования электропривода, в которых адаптация применена для повышения точности измерительной системы. В третью группу входят методы, основанные на конструктивных особенностях двигателя и использующие, например, информацию, которую несет в себе кривая намагничивания машины. Четвертая группа - это нелинейные методы, базирующиеся на теории нейронных цепей, а последняя, пятая группа - группа методов, использующих для повышения точности дополнительные высокочастотные сигналы или другую дополнительную информацию.

### 2.3.1 Наблюдатели СВУ

Для создания бездатчиковых интеллектуальных СУ используют различные цифровые наблюдатели.

Необходимо пояснить, что является наблюдателем. Наблюдателем или наблюдающим устройством называется динамическая система, которая восстанавливает вектор состояния заданной системы на основе измерения входного и выходного воздействий при известной структуре заданной системы.

Если система, для которой восстанавливается полный вектор состояния, описывается векторным уравнением [11]:

$$\begin{cases} \frac{dX}{dt} = AX + BU \\ Y = CX \end{cases}, \quad (2.3.1.1)$$

то наблюдатель имеет следующее уравнение:

$$\frac{d\tilde{X}}{dt} = A\tilde{X} + Bu + K_H(Y - C\tilde{X}). \quad (2.3.1.2)$$

где  $u$  - входное управляющее воздействие,

$\tilde{X}$  - оценка вектора состояния  $X$ ,

$K_H$  - матрица усиления наблюдателя.

В общем случае  $K_H$  является некоторой матрицей функций, определяющих коэффициент усиления наблюдателя.

Происходящие в ЭП процессы в большинстве случаев нелинейные. Это явление можно объяснить с физической точки зрения, примером могут послужить процессы, протекающие в электрической машине - насыщения, дополнительные (паразитные) взаимные индуктивности и т.п. Вывод уравнений представлен только для линейных систем. Для нелинейных систем теоретическая часть достаточно сложна, и не всегда позволяет использовать теории такого типа применительно к ЭП. Следовательно, для

решения задач управления электродвигателем, должен быть разработан особый подход, учитывающий специфику данного вопроса.

Перед тем, как приступить к исследованию возможных наблюдателей, был сформулирован ряд критериев, по которым производилась оценка методов:

- максимальная точность восстановления переменных состояния;
- минимальная чувствительность к отклонению параметров модели;
- отсутствие громоздких математических вычислений;
- доступность в понимании подхода, возможность его физической интерпретации.

Исходя из выше перечисленных критериев, был произведен анализ. В зарубежной литературе нередко можно встретить решения в области векторного бездатчикового управления АД. Проанализировав труды, посвященные данной тематике, к рассмотрению в данной работе был вынесен тип СВБУ машинами переменного тока: простейший, неадаптивный наблюдатель, основанный на формах математического описания асинхронного двигателя [9, 10].

### **2.3.2 Оценка возможности прямого измерения потокосцепления ротора двигателя и угла поворота**

Для организации высококачественных систем векторного управления АД требуется информация о некоторых переменных, недоступных для прямого измерения. К таким переменным относятся, прежде всего, угол поворота и амплитуда вектора потокосцепления ротора. Амплитуда вектора используется для организации обратной связи в контуре управления потокосцеплением ротора, а угол поворота применяется для ориентации вращающейся системы координат.



Модели, используемые ранее в системе нелинейной САУ РЭП, используют в работе данные о потокосцеплении и угле поворота взятые непосредственно из модели двигателя, в реальности же эти координаты недоступны для прямого измерения, поэтому возникает необходимость в формировании систем расчета этих координат на основании дифференциальных уравнений.

Точность косвенной оценки переменных АД, недоступных для прямого измерения, в конечном итоге определяет качество работы всего асинхронного электропривода с векторным управлением [12].

Таким образом, можно сделать вывод, что прямое измерение амплитудного значения потокосцепления ротора и угла поворота невозможно по конструкционным особенностям асинхронного двигателя (в воздушный зазор невозможно установить датчик потокосцепления). Следовательно, необходимо разработать систему косвенного определения параметров недоступных для прямого измерения.

## **2.4 Комбинированный неадаптивный наблюдатель скорости и потокосцепления ротора**

### **2.4.1 Косвенное определение значений угла поворота ( $\theta$ ) и потокосцепления ротора ( $\psi_r$ )**

В дальнейшем в работе будет использоваться метод расчёта составляющих пространственного вектора потокосцепления статора на основе уравнений электромагнитной связи с ротором (2.4.1.1) и взаимодействия с параметрами статорной обмотки АД (2.4.1.2) и (2.4.1.3):

$$p\psi_r = k_r r_r i_{sx} - a_r \psi_r \quad (2.4.1.1);$$

$$\psi_{s\alpha}^\psi = l_e i_{s\alpha} - k_r \psi_{r\alpha} \quad (2.4.1.2);$$

$$\psi_{s\beta}^\psi = l_e i_{s\beta} - k_r \psi_{r\beta} \quad (2.4.1.3).$$

С другой стороны, составляющие пространственного вектора потокосцепления статора могут быть определены через составляющие векторов тока и напряжения статора, уравнения (2.4.1.4) и (2.4.1.5):

$$p\psi_{s\alpha}^u = u_{s\alpha} - r_s i_{s\alpha} \quad (2.4.1.4);$$

$$p\psi_{s\beta}^u = u_{s\beta} - r_s i_{s\beta} \quad (2.4.1.5).$$

При сравнении составляющих вектора потокосцепления статора определённых различными путями, ввиду отклонений между параметрами схемы замещения и реальным АД определяется ошибка. С помощью ПИ-регуляторов в уравнения (2.4.1.4) и (2.4.1.5) вводятся дополнительные параметры:

$$p\psi_{s\alpha}^u = u_{s\alpha} - r_s i_{s\alpha} - u_{c\alpha} \quad (2.4.1.6);$$

$$p\psi_{s\beta}^u = u_{s\beta} - r_s i_{s\beta} - u_{c\beta} \quad (2.4.1.7);$$

$$u_{c\alpha} = (\psi_{s\alpha}^u - \psi_{s\alpha}^\psi) \cdot W_{pez}(p) \quad (2.4.1.8);$$

$$u_{c\beta} = (\psi_{s\beta}^u - \psi_{s\beta}^\psi) \cdot W_{pez}(p) \quad (2.4.1.9),$$

где  $W_{pez}(p) = k_{pez} \cdot \frac{(pt_{pez} + 1)}{pt_{pez}}$ .

Таким образом, далее на основе уточнённых данных о составляющих вектора потокосцепления статора определяем составляющие пространственного вектора потокосцепления ротора в стационарной системе координат:

$$\psi_{r\alpha}^* = \frac{1}{k_r} \psi_{s\alpha}^u - \frac{l_e}{k_r} i_{s\alpha} \quad (2.4.1.10);$$

$$\psi_{r\beta}^* = \frac{1}{k_r} \psi_{s\beta}^u - \frac{l_e}{k_r} i_{s\beta} \quad (2.4.1.11);$$

$$\psi_r^* = \sqrt{(\psi_{r\alpha}^*)^2 - (\psi_{r\beta}^*)^2} \quad (2.4.1.12);$$

$$\theta_{\psi r}^* = \arctan \left( \frac{\psi_{r\beta}^*}{\psi_{r\alpha}^*} \right) \quad (2.4.1.13).$$

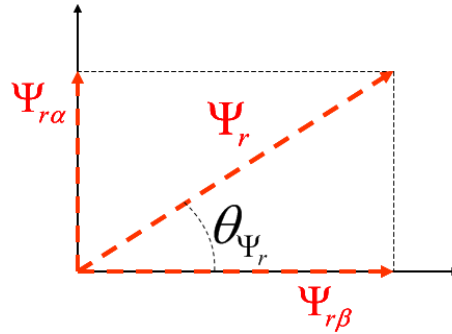


Рисунок 2.4.1.1 – Проекция составляющих пространственного вектора потокосцепления ротора на оси стационарной системы координат

На основании уравнений (2.4.1.1 – 2.4.1.13) составим структурную схему системы косвенной оценки переменных, недоступных для прямого измерения (рисунок 2.4.1.2).

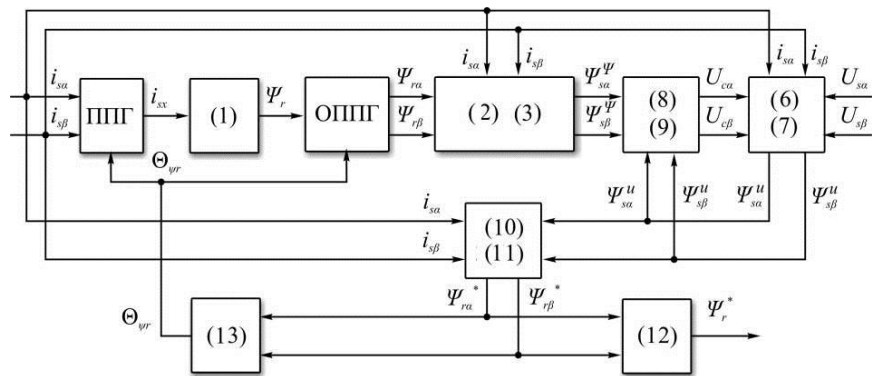


Рисунок 2.4.1.2 – Структурная схема системы косвенной оценки переменных, недоступных для прямого измерения

В качестве входных параметров рассматриваются составляющие пространственных векторов напряжений и токов статора в стационарной системе координат, а в качестве выходных переменных – модуль вектора потокосцепления ротора и его угол поворота в пространстве относительно стационарной системы координат.

## 2.4.2 Косвенное определение скорости вращения ротора( $\omega_R$ )

Следующий этап разработки систем косвенного определения переменных, недоступных для прямого измерения – определение скорости вращения вала АД. Класс систем без датчика обратной связи по скорости широко востребован по причине сложных условий эксплуатации и стремления повысить надёжность электропривода с одновременным снижением его себестоимости.

Скорость ротора АД может быть рассчитана по токам статора двигателя, проекциям вектора потокосцепления ротора, и углу поворота [12].

Выражение для определения составляющих вектора потокосцепления ротора в неподвижной системе координат:

$$\psi_{r\alpha} = L_r \cdot i_{r\alpha} + L_\mu \cdot i_{s\alpha} \quad (2.4.2.1);$$

$$\psi_{r\beta} = L_r \cdot i_{r\beta} + L_\mu \cdot i_{s\beta} \quad (2.4.2.2);$$

$$i_{r\alpha} = \frac{1}{L_r} \cdot (\psi_{r\alpha} - L_\mu \cdot i_{s\alpha}) \quad (2.4.2.3);$$

$$i_{r\beta} = \frac{1}{L_r} \cdot (\psi_{r\beta} - L_\mu \cdot i_{s\beta}) \quad (2.4.2.4).$$

Из формул (2.4.2.1) и (2.4.2.2) выразим составляющие вектора тока ротора:

$$0 = R_r \cdot i_{r\alpha} + \omega_r \cdot \psi_{r\beta} + \frac{d\psi_{r\alpha}}{dt} \quad (2.4.2.5);$$

$$0 = R_r \cdot i_{r\beta} + \omega_r \cdot \psi_{r\alpha} + \frac{d\psi_{r\beta}}{dt} \quad (2.4.2.6).$$

Выражаем из (2.4.2.5) и (2.4.2.6) производные компонентов вектора потокосцепления ротора и делаем подстановку в (2.4.2.3) и (2.4.2.4):

$$\frac{d\psi_{r\alpha}}{dt} = -\frac{1}{\tau_r} \cdot \psi_{r\alpha} + \frac{L_\mu}{\tau_r} i_{r\alpha} - \omega_r \psi_{r\beta} \quad (2.4.2.7);$$

$$\frac{d\psi_{r\beta}}{dt} = -\frac{1}{\tau_r} \cdot \psi_{r\beta} + \frac{L_\mu}{\tau_r} i_{r\beta} - \omega_r \psi_{r\alpha} \quad (2.4.2.8),$$

где  $\tau_r = \frac{L_r}{R_r}$ .

Для вычисления параметров вектора потокосцепления ротора используются формулы модуля и углового поворота, аналогичные вышеприведённым формулам (2.4.2.12) и (2.4.2.13).

Для определения синхронной скорости можно воспользоваться производной от сигнала углового положения вектора потокосцепления:

$$\omega_e = \frac{d\theta_r}{dt} = \frac{d\left(\arctan\left(\frac{\psi_{r\beta}}{\psi_{r\alpha}}\right)\right)}{dt} \quad (2.4.2.9),$$

Арктангенс можно представить как:

$$\frac{d(\arctan(u))}{dt} = \frac{1}{1+u^2} \cdot \frac{du}{dt} \quad (2.4.2.10)$$

где  $u = \frac{\psi_{r\beta}}{\psi_{r\alpha}}$ .

Подставляем в (2.4.2.9) выражение для (2.4.2.10) и получаем в итоге:

$$\omega_e = \frac{d\theta_r}{dt} = \frac{\psi_{r\alpha}^2}{\psi_r^2} \cdot \left( \frac{\psi_{r\alpha} \cdot \frac{d\psi_{r\beta}}{dt} - \psi_{r\beta} \cdot \frac{d\psi_{r\alpha}}{dt}}{\psi_{r\alpha}^2} \right) \quad (2.4.2.11).$$

Подставляем в (2.4.2.11) выражения для производных, определённых ранее в (2.4.2.7) и (2.4.2.8):

$$\omega_e = \frac{d\theta_r}{dt} = \omega_r + \frac{1}{\psi_r^2} \cdot \frac{L_\mu}{\tau_r} (\psi_{r\alpha} \cdot i_{s\beta} - \psi_{r\beta} \cdot i_{s\alpha}) \quad (2.4.2.12).$$

Правая часть в выражении (2.4.2.12) соответствует скольжению АД, которое зависит от величины его электромагнитного момента:

$$M_e = \frac{3}{2} \cdot z_p \cdot \frac{L_\mu}{L_r} (\psi_{r\alpha} \cdot i_{s\beta} - \psi_{r\beta} \cdot i_{s\alpha}) \quad (2.4.2.13).$$

Итоговое выражение для расчёта скорости АД получаем в следующем виде:

$$\omega_r = \omega_e - \frac{1}{\psi_r^2} \cdot \frac{L_\mu}{L_r} (\psi_{r\alpha} \cdot i_{s\beta} - \psi_{r\beta} \cdot i_{s\alpha}) \quad (2.4.2.14),$$

или

$$\omega_r = \omega_e - \frac{L_\mu}{L_r} \left( \frac{\psi_{r\alpha} \cdot i_{s\beta} - \psi_{r\beta} \cdot i_{s\alpha}}{\psi_r^2} \right) \quad (2.4.2.15)$$

где  $\omega_e = \frac{d\theta_r}{dt}$  и  $\psi_r^2 = \psi_{r\alpha}^2 + \psi_{r\beta}^2$ .

## 2.5 Выводы

1. Разработана математическая модель асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором как объекта управления.

2. Разработана система бездатчикового векторного управления асинхронным двигателем, проведен анализ возможности косвенного изменения переменных состояний труднодоступных для прямого измерения.

3. Выбран неадаптивный наблюдатель переменных состояний для системы бездатчикового векторного управления асинхронным двигателем.

# ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ ВЕКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ГЛАВНОГО ДВИЖЕНИЯ ВОЛОЧИЛЬНОЙ МАШИНЫ

## 3.1 Расчет основных силовых элементов системы

### 3.1.1 Расчет мощности при волочении проволоки и выбор электродвигателя

Определим коэффициент полезного действия стана (коэффициент полезного действия передаточного устройства от двигателя к тяговому барабану). Значение КПД механизмов передач (без учёта потерь трения в подшипниковых узлах) следующие[4]:

Зубчатая (закрытая)

- с цилиндрическими колёсами –  $0,96 \div 0,98$ ;
- с коническими прямозубыми колёсами –  $0,95 \div 0,97$ ;
- КПД одной пары подшипников качения –  $0,99 \div 0,995$ .

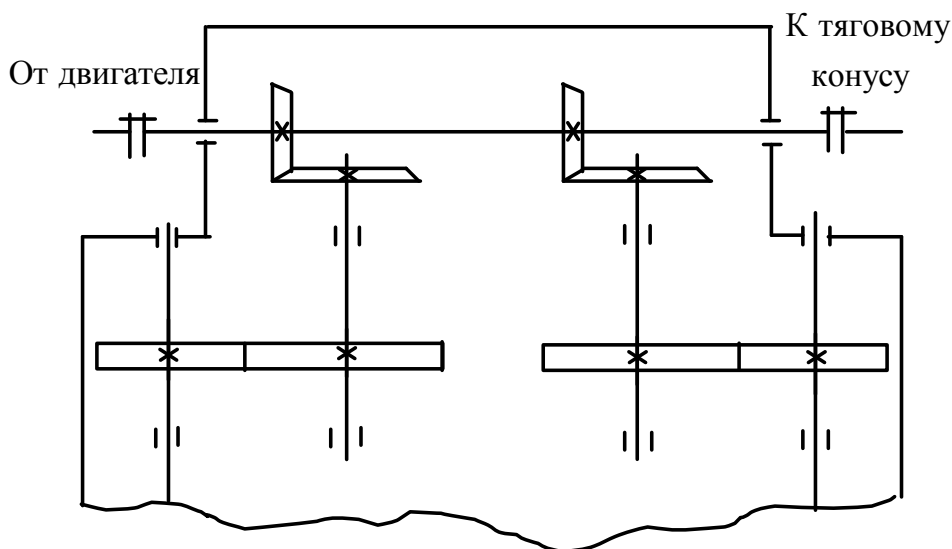


Рисунок 3.1.1 - Кинематическая схема волочильной машины для расчета мощности двигателя

Согласно кинематической схемы, приведённой на рисунке 3.1.1 КПД передач от электродвигателя к типовым шкивам (с 1 по 4):

$$\eta_1 = 0,96^4 \cdot 0,95 \cdot 0,99^6 = 0,76$$

$$\eta_2 = 0,96^2 \cdot 0,95 \cdot 0,99^4 = 0,84$$

$$\eta_3 = 0,96^2 \cdot 0,95 \cdot 0,99^4 = 0,84$$

$$\eta_4 = 0,96^4 \cdot 0,95 \cdot 0,99^6 = 0,76$$

Среднеарифметическое значение коэффициента полезного действия стана, учитывая возможность распределения усилия волочения между всеми тяговыми шкивами, определяется по формуле:

$$\eta_{\text{ср}} = \frac{\sum_{I=1}^7 \eta_I}{4} = \frac{0,76 + 0,84 + 0,84 + 0,76}{4} = 0,8$$

Рассчитаем требуемую мощность тягового электродвигателя по методу удельного расхода энергии.

Приводимые ниже расчеты требуемой мощности выполнены также по данным норм технологического проектирования.

На стане производится волочение медной катанки с  $d_0 = 8$  мм. на  $d_1 = 1,06$  мм. за тринадцать протяжек при среднем обжатию маршрута 17% и суммарном обжатию 86% со скоростью 15 м/с. согласно технологической карте маршрута волочения.

Согласно маркам катанки, используемым для волочения медной проволоки, а именно: КМО, МКСН, МКСС, МКПП, МКЛПС начальный предел прочности медной катанки[5,6]:

$$\sigma_0 = 240 \text{ Н / мм}^2$$

После первой протяжки предел прочности определяется по формуле:



$$\begin{aligned}\sigma_1 &= \sigma_0 + 3.16 \cdot 4 \sqrt{\frac{\sigma_0}{1 - \delta_{\text{ед.ср.}}}} \cdot n \cdot \delta_{\text{ед.ср.}} + 0.1 \cdot \sigma_0 \cdot \sqrt{\sigma_{\text{сум.}}} = \\ &= 240 + 3.16 \cdot 4 \sqrt{\frac{240}{1 - 0.17}} \cdot 1 \cdot 0.17 + 0.1 \cdot 240 \cdot \sqrt{0.86} = 299 \text{ Н/мм}^2.\end{aligned}$$

После тринадцатой протяжки:

$$\begin{aligned}\sigma_{13} &= \sigma_0 + 3.16 \cdot 4 \sqrt{\frac{\sigma_0}{1 - \delta_{\text{ед.ср.}}}} \cdot n \cdot \delta_{\text{ед.ср.}} + 0.1 \cdot \sigma_0 \cdot \sqrt{\sigma_{\text{сум.}}} = \\ &= 240 + 3.16 \cdot 4 \sqrt{\frac{240}{1 - 0.17}} \cdot 13 \cdot 0.17 + 0.1 \cdot 240 \cdot \sqrt{0.86} = 737 \text{ Н/мм}^2,\end{aligned}$$

где

$\sigma_0$  – начальный предел прочности медной катанки;

$\delta_{\text{ед.ср.}}$  – среднее обжатие маршрута волочения;

$n$  – номер протяжки катанки через волоку;

$\sigma_{\text{сум.}}$  – суммарное обжатие катанки на всем маршруте.

Среднеарифметический предел прочности медной катанки:

$$\sigma_{\text{ср.}} = \frac{299 + 737}{2} = 518 \text{ Н/мм}^2$$

Суммарная мощность на все протяжки определяется по данным первой и последней протяжки, т.к. используется групповой электропривод.

Требуемая мощность может быть определена из формулы:

$$P = \frac{mw \cdot 1.3}{10^3} = \frac{0.103 \cdot 697 \cdot 1.3}{10^3} = 93 \text{ кВт}, \quad (3.1)$$

где

$m$  – масса проволоки, протягиваемая через волоки в секунду:

$$m = \frac{\pi d_1^2}{4} \cdot v \cdot 7.8 \cdot 10^{-3} = \frac{3.14 \cdot 1.06^2}{4} \cdot 15 \cdot 7.8 \cdot 10^{-3} = 0.103 \text{ кг/с.}$$

$w$  – удельный расход электроэнергии:

$$w = \frac{128 \cdot \sigma_{\text{ср}} \cdot \ln \frac{d_0^2}{d_1^2}}{\eta_{\text{с}} \cdot \eta_{\text{в}}} = \frac{128 \cdot 518 \cdot \ln \frac{8^2}{1.06^2}}{0.8 \cdot 0.4} = 697 \text{ кДж/кг.}$$

1.3 – коэффициент учитывающий трение витков проволоки о поверхность шкивов;

$d_0$  - начальный диаметр медной катанки;

$d_1$  - диаметр проволоки после последней протяжки;

$v$  - скорость волочения медной катанки;

$\eta_{\text{с}}, \eta_{\text{в}}$  - коэффициенты полезного действия стана и процесса волочения.

*Таким образом, в соответствии с 3.1 выбираем электродвигатель серии RA – RA315S4.*

### 3.1.2 Расчет основных параметров и характеристик двигателя

Произведём расчёт основных параметров асинхронной машины для построения механической и электромеханической характеристик асинхронного электродвигателя RA315S4.

Паспортные данные электродвигателя

- Тип двигателя - RA315S4;
- Номинальная мощность двигателя -  $P_{\text{НОМ}}$ , кВт – 110;
- Номинальная частота вращения  $n_{\text{НОМ}}$ , об/мин – 1466;
- Синхронная частота вращения -  $n_0$ , об/мин – 1500;
- КПД в режиме номинальной мощности (100 %-я нагрузка) – 0,925;
- Коэффициент мощности –  $\cos \varphi$  – 0,9;
- Номинальное скольжение -  $s_{\text{н}}$  - 0,023
- Кратность пускового тока -  $\frac{I_{\text{п}}}{I_{\text{н}}}$  - 6,0;

- Кратность пускового момента -  $M_{п}/M_{н} - 1,2;$
- Кратность минимального момента -  $M_{мин}/M_{н} - 1;$
- Кратность максимального момента -  $M_{макс}/M_{н} - 2;$
- Динамический момент инерции ротора -  $J_{д}, кг \cdot м^2 - 2,3;$
- Число пар полюсов -  $2p - 2.$

Ток холостого хода асинхронного двигателя найдём из выражения:

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

$$= \sqrt{\frac{151,667^2 - (0,75 \cdot 200,2 \cdot (1 - 0,023) / (1 - 0,75 \cdot 0,023))^2}{1 - (0,75 \cdot (1 - 0,023) / (1 - 0,75 \cdot 0,023))^2}} = 40,289 \text{ А},$$

где  $I_{1н} = \frac{P_{н}}{3 \cdot U_{1ф} \cdot \cos \phi_{н} \cdot \eta_{н}} = \frac{110000}{3 \cdot 220 \cdot 0,9 \cdot 0,925} = 200,2 \text{ А}$  – номи-

нальный ток статора двигателя;

$\eta_{p_*} = \eta_{н} = 0,925$  - КПД при частичной нагрузке;

$I_{11} = \frac{p_* \cdot P_{н}}{3 \cdot U_{1ф} \cdot \cos \phi_{p_*} \cdot \eta_{p_*}} = \frac{0,75 \cdot 110000}{3 \cdot 220 \cdot 0,891 \cdot 0,925} = 151,667 \text{ А}$  - ток ста-

тора двигателя при частичной нагрузке;

$\cos \phi_{p_*} = \cos \phi_{н} \cdot K = 0,9 \cdot 0,99 = 0,891$  - коэффициент мощности при частичной нагрузке;

$p_* = \frac{P}{P_{н}} = 0,75$  – коэффициент загрузки двигателя.

Коэффициент мощности и КПД при частичной нагрузке в технической литературе приводятся редко, а для целого ряда серий электрических машин такие данные в справочной литературе отсутствуют. Эти параметры можно определить, руководствуясь следующими соображениями:

- современные асинхронные двигатели проектируются таким образом, что наибольший КПД достигается при нагрузке на 10 – 15 % меньше

номинальной. Двигатели рассчитываются так потому, что большинство из них в силу стандартной дискретной шкалы мощностей работают с некоторой недогрузкой. Поэтому КПД при номинальной нагрузке и нагрузке  $p_* = 0,75$  практически равны между собой, т.е.  $\eta_{p_*} \approx \eta_n$ ;

- коэффициент мощности при нагрузке  $p_* = 0,75$  значительно отличается от коэффициента мощности при номинальной нагрузке, причём это отличие в значительной степени зависит от мощности двигателя и для известных серий асинхронных двигателей с достаточной для практики точностью подчиняется зависимости, представленной на рисунке 3.1.2.1 [7].

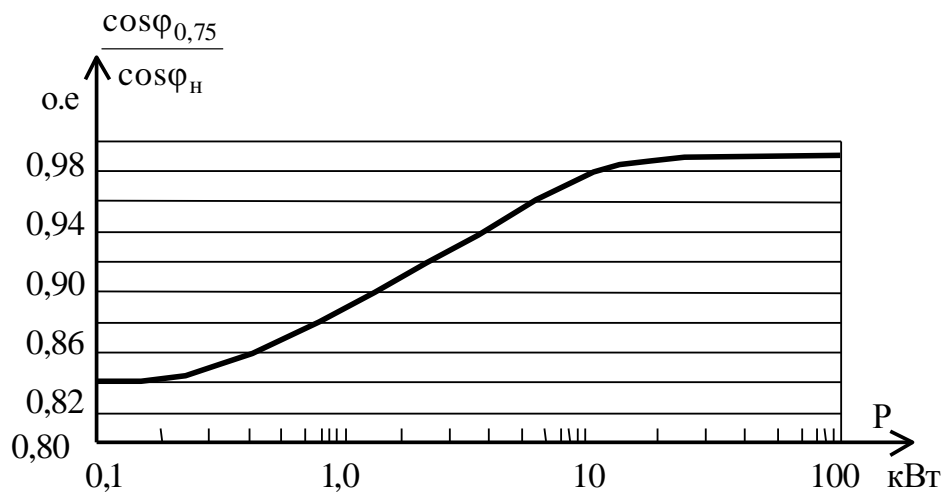


Рисунок 3.1.2.1 - Зависимость  $\cos \phi_{0,75} / \cos \phi_n$  от мощности асинхронного двигателя

В первом приближении принимаем  $\beta = 0,3$ .

Из формулы Клосса определим соотношение для расчёта критического скольжения

$$s_k = s_n \cdot \frac{k_{\max} + \sqrt{k_{\max}^2 - (1 - 2 \cdot s_n \cdot \beta \cdot (k_{\max} - 1))}}{1 - 2 \cdot s_n \cdot \beta \cdot (k_{\max} - 1)} =$$

$$= 0,023 \cdot \frac{2 + \sqrt{2^2 - (1 - 2 \cdot 0,023 \cdot 1 \cdot (2 - 1))}}{1 - 2 \cdot 0,023 \cdot 1 \cdot (2 - 1)} = 0,087 \text{ о.е.}$$

Далее определяем ряд промежуточных коэффициентов:

$$C_1 = 1 + \frac{I_0}{2 \cdot k_i \cdot I_{1H}} = 1 + \frac{40,289}{2 \cdot 6 \cdot 202,2} = 1,017;$$

$$A_1 = \frac{m \cdot U_{1\phi}^2 \cdot (1 - s_H)}{2 \cdot C_1 \cdot k_{\max} \cdot P_H} = \frac{4 \cdot 220^2 \cdot (1 - 0,023)}{2 \cdot 1,017 \cdot 6 \cdot 110000} = 0,317,$$

Активное сопротивление ротора, приведённое к обмотке статора асинхронного двигателя

$$R_2' = \frac{A_1}{\left(\beta + \frac{1}{s_K}\right) \cdot C_1} = \frac{0,317}{\left(0,3 + \frac{1}{0,087}\right) \cdot 1,017} = 0,026 \text{ Ом}.$$

Активное сопротивление статорной обмотки определим по следующему выражению

$$R_1 = C_1 \cdot R_2' \cdot \beta = 1,017 \cdot 0,026 \cdot 0,3 = 0,0081 \text{ Ом}.$$

Определим параметр  $\gamma$ , который позволяет найти индуктивное сопротивление короткого замыкания  $X_{кн}$ ,

$$\gamma = \sqrt{\frac{1}{s_K^2} - \beta^2} = \sqrt{\frac{1}{0,087^2} - 0,3^2} = 11,473.$$

Тогда

$$X_{кн} = \gamma \cdot C_1 \cdot R_2' = 11,473 \cdot 1,017 \cdot 0,026 = 0,309 \text{ Ом}.$$

Для того чтобы выделить из индуктивного сопротивления  $X_{кн}$ , сопротивления рассеяния фаз статора и ротора, воспользуемся соотношениями, которые справедливы для серийных асинхронных двигателей.

Индуктивное сопротивление роторной обмотки, приведённое к статорной, может быть рассчитано

$$X_{2H}' = \frac{0,58 \cdot X_{кн}}{C_1} = \frac{0,58 \cdot 0,309}{1,017} = 0,176 \text{ Ом}.$$

Индуктивное сопротивление статорной обмотки определим по следующему выражению

$$X_{1H} = 0,42 \cdot X_{кн} = 0,42 \cdot 0,309 = 0,13 \text{ Ом}.$$

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

$$E_1 = \sqrt{(U_{1\phi} \cdot \cos \phi_H - R_1 \cdot I_{1H})^2 + (U_{1H} \cdot \sin \phi_H - X_{1H} \cdot I_{1H})^2} = \\ = \sqrt{(220 \cdot 0,9 - 0,0081 \cdot 202,2)^2 + (220 \cdot 0,436 - 0,13 \cdot 202,2)^2} = 154 \text{ В.}$$

Тогда индуктивное сопротивление намагничивания определится как

$$X_{\mu H} = \frac{E_1}{I_0} = \frac{154}{40,289} = 3,82 \text{ Ом.}$$

Индуктивность рассеяния статорной обмотки:

$$L_{\sigma 1} = \frac{X_{1H}}{2 \cdot \pi \cdot f_1} = \frac{0,13}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,00041 \text{ Гн.}$$

Индуктивность рассеяния роторной обмотки, приведенная к статорной:

$$L'_{\sigma 2} = \frac{X'_{2H}}{2 \cdot \pi \cdot f_1} = \frac{0,176}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,00056 \text{ Гн.}$$

Индуктивность ветви намагничивания:

$$L_{\mu} = \frac{X_{\mu H}}{2 \cdot \pi \cdot f_1} = \frac{3,82}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,0122 \text{ Гн.}$$

Полная индуктивность цепи статора:

$$L_1 = L_{\sigma 1} + L_{\mu} = 0,00041 + 0,0122 = 0,013 \text{ Гн.}$$

Полная индуктивность цепи ротора:

$$L'_2 = L'_{\sigma 2} + L_{\mu} = 0,00056 + 0,013 = 0,01273 \text{ Гн.}$$

Рассчитаем коэффициенты структурной схемы:

$$K_r = \frac{L_{\mu}}{L'_2} = \frac{0,013}{0,01273} = 1,021;$$

$$L_{\Theta} = L_1 - \frac{L_{\mu}^2}{L'_2} = 0,013 - \frac{0,0122^2}{0,01273} = 0,00131 \text{ Гн;}$$

$$R_{\Theta} = R_1 + R'_2 \cdot K_r^2 = 0,0081 + 0,026 \cdot 1,021^2 = 0,03186 \text{ Ом;}$$

$$A_r = \frac{R'_2}{L'_2} = \frac{0,026}{0,01273} = 2.042.$$

Для построения естественной механической характеристики двигателя определим критический момент машины в двигательном режиме

$$M_k = \frac{3 \cdot U_{1\phi}^2 \cdot R'_2}{\omega_0 \cdot s_k \cdot \left[ X_{кн}^2 + \left( R_1 + \frac{R'_2}{s_k} \right)^2 \right]} =$$

$$= \frac{3 \cdot 220^2 \cdot 0,026}{157,08 \cdot 0,087 \cdot \left[ 0,309^2 + \left( 0,0081 + \frac{0,026}{0,087} \right)^2 \right]} = 1456 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Задаваясь диапазоном изменения скольжения от 1 до 0, с шагом 0,001, строим механическую характеристику асинхронного электродвигателя по формуле Клосса

$$M = \frac{2 \cdot M_k \cdot (1 + a \cdot s_k)}{\frac{s_k + s}{s} + \frac{s}{s_k} + 2 \cdot a \cdot s_k},$$

где коэффициент  $a$  равен

$$a = \frac{R_1}{R'_2} = \frac{0,0081}{0,026} = 0,312.$$

Тогда расчётное выражение для механической характеристики примет следующий вид

$$M(s) = \frac{2991}{\frac{0,087}{s} + \frac{s}{0,087} + 0,054}.$$

Естественная механическая характеристика асинхронного двигателя RA315S4 изображена на рисунке 3.1.2.2.

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

Момент номинальный

$$M_{H(\text{паспорт})} = \frac{P_H}{\omega_H} = \frac{110000}{153,467} = 716,766 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

То же значение, но по формуле Клосса

$$M_H = \frac{2991}{\frac{0,087}{s_H} + \frac{s_H}{0,087} + 0,054} = 729,349 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Момент критический

$$M_K = k_{\max} \cdot M_{H(\text{паспорт})} = 2 \cdot 716,766 = 1434 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Пусковой момент

$$M_{II} = k_{II} \cdot M_{H(\text{паспорт})} = 1,2 \cdot 716,766 = 860,12 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

То же значение, но по формуле Клосса

$$M_{II} = \frac{2991}{\frac{0,087}{1} + \frac{1}{0,087} + 0,054} = 257,067 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

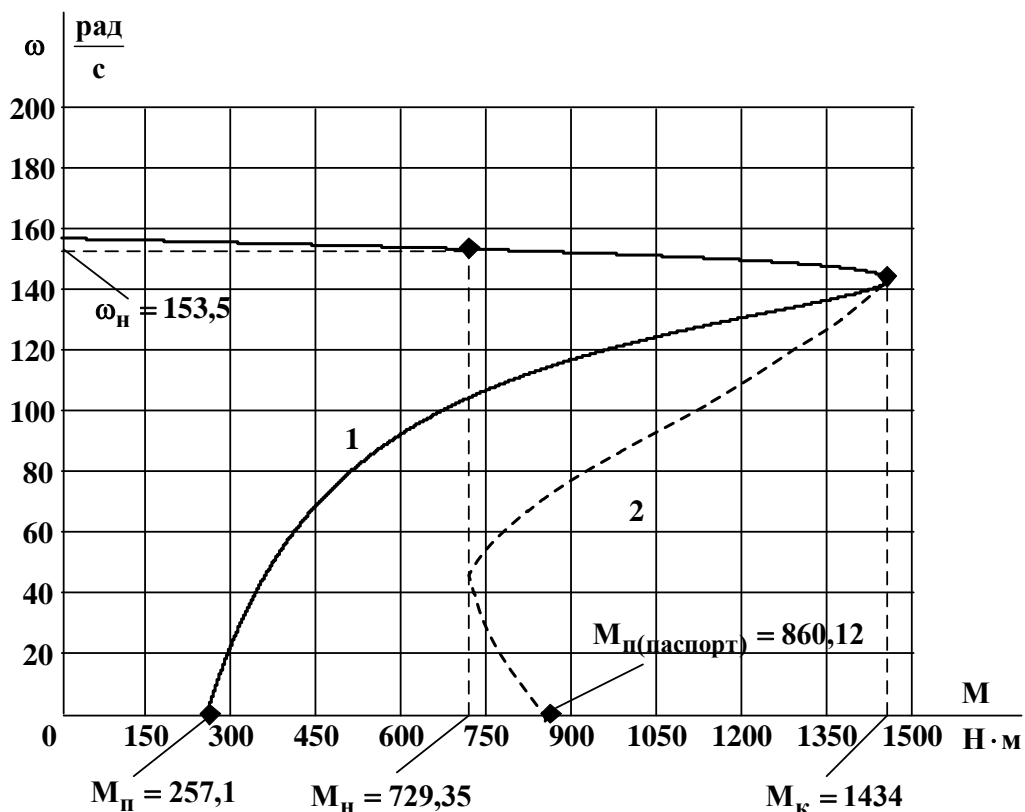


Рисунок 3.1.2.2 – Естественная механическая характеристика асинхронного двигателя RA315S4: 1 – рассчитанная по паспортным данным; 2 – предположительно реальная характеристика



Анализ результатов расчетов представленных на рисунке 3.1.2.2 показывает, что построенная механическая характеристика справедлива только в области близкой к номинальным скоростям, вне этой области данная характеристика не отображает действительную картину так как при её построении не учитывается эффект вытеснения тока в роторе. Это также объясняет и разницу между одноимёнными величинами, рассчитанными по формуле Клосса, и полученными из паспортных данных двигателя соответственно.

Для короткозамкнутого асинхронного двигателя представляет интерес электромеханическая характеристика  $I_1 = f(\omega)$ , отражающая зависимость тока статора от скорости. Ток статора  $I_1$  определяется путём сложения вектора тока намагничивания  $\bar{I}_0$  и вектора тока ротора  $\bar{I}'_2$ . Обычно это производится с помощью круговой диаграммы.

Полагая ток намагничивания асинхронного двигателя  $I_0$  реактивным, ( $I_{0A} = 0$ ), ток статора  $I_1$  через приведённый ток ротора  $I'_2$  можно найти по формуле

$$I_1(\omega) = \sqrt{I_0^2 + (I'_2(\omega))^2 + 2 \cdot I_0 \cdot I'_2(\omega) \cdot \sin \phi_2(\omega)} = \\ = \sqrt{40,289^2 + (I'_2(\omega))^2 + 2 \cdot 40,289 \cdot I'_2(\omega) \cdot \sin \phi_2(\omega)}$$

$$\text{где } I'_2(\omega) = \frac{U_{1\phi}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{\omega_0 - \omega}\right)^2 + X_{\text{кн}}^2}} = \frac{220}{\sqrt{\left(0,0081 + \frac{0,026}{\omega_0 - \omega}\right)^2 + 0,309^2}},$$

$$\sin \phi_2(\omega) = \frac{X_{\text{кн}}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{\omega_0 - \omega}\right)^2 + X_{\text{кн}}^2}} = \frac{0,309}{\sqrt{\left(0,0081 + \frac{0,026}{\omega_0 - \omega}\right)^2 + 0,309^2}}.$$

Задаваясь диапазоном изменения скорости, строим электромехани-

ческую характеристику асинхронного электродвигателя по формулам для токов обмоток статора и ротора (рисунок 3.1.2.3).

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

$$I_{1H} = \sqrt{I_0^2 + I_2'^2 + 2 \cdot I_0 \cdot I_2' \cdot \sin \phi_2} = \sqrt{40,289^2 + 181,904^2 + 2 \cdot 40,289 \cdot 181,904 \cdot 0,25} = 195,91 \text{ А,}$$

где

$$I_2'(\omega) = \frac{U_{1\phi}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s_H}\right)^2 + X_{KH}^2}} = \frac{220}{\sqrt{\left(0,0081 + \frac{0,026}{0,023}\right)^2 + 0,309^2}} = 181,904 \text{ А,}$$

$$\sin \phi_2(\omega) = \frac{X_{KH}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s_H}\right)^2 + X_{KH}^2}} = \frac{0,309}{\sqrt{\left(0,0081 + \frac{0,026}{0,023}\right)^2 + 0,309^2}} = 0,25.$$

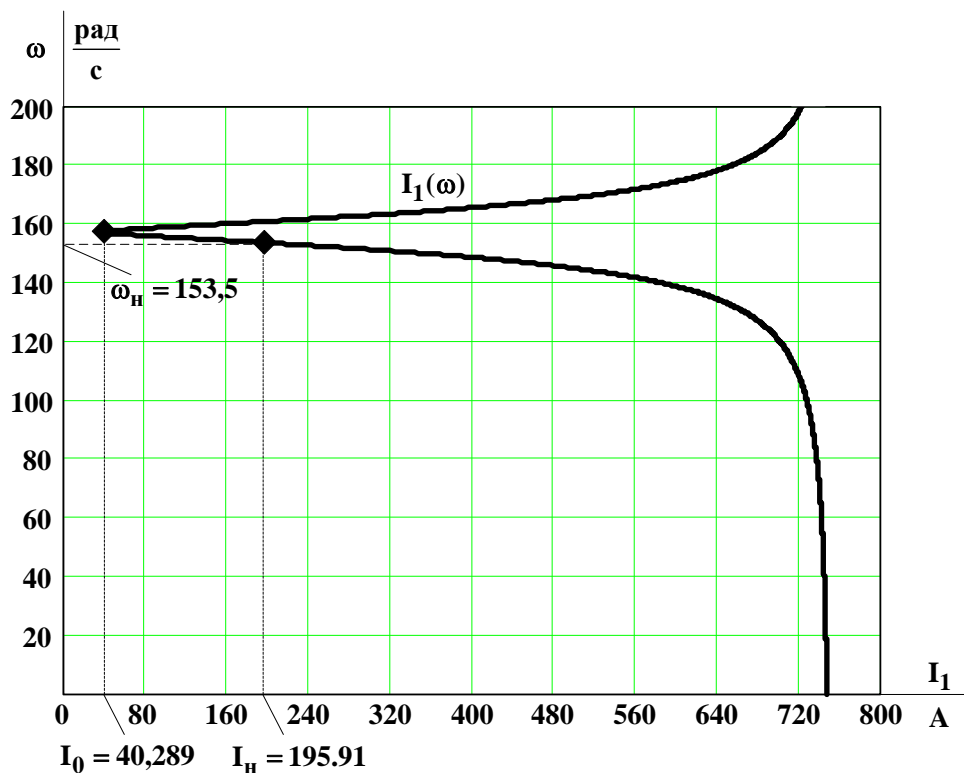


Рисунок 3.1.2.3 – Естественная электромеханическая характеристика асинхронного электродвигателя RA315S4

Значение номинального тока, рассчитанное по электромеханической характеристике, практически совпадает с рассчитанным по паспортным данным ( $I_{1H}=202,2\text{ A}$ ), что говорит о верном определении параметров схемы замещения асинхронного двигателя и построении электромеханической характеристики асинхронного двигателя [7].

### 3.1.3 Расчет переходных процессов при прямом пуске двигателя

Динамическая модель асинхронного двигателя была разработана во второй главе данной работы. Структурные схемы во вращающейся и неподвижной системе координат, приведены на рисунках 3.1.3.1 и 3.1.3.2. Моделирование прямого пуска двигателя в обоих случаях поведения системы координат обусловлено необходимостью доказать их взаимную адекватность для дальнейшего использования в целях оптимизации контуров регулирования и моделирования системы электропривода.

Моделирование асинхронного двигателя будем производить по абсолютным значениям переменных – токов, моментов, мощностей.

Имитационное моделирование динамических процессов в асинхронном двигателе произведем в соответствии со структурной схемой в программной среде Simulink.

Номинальное значение угловой частоты напряжения обмотки статора

$$\omega_{\sigma} = 2 \cdot \pi \cdot f_{1H} = 314,159.$$

Для определения эквивалентного момента инерции необходимо определить момент инерции привода с новым двигателем.

$$J_{\Sigma} = 2 \cdot J_{\Sigma} = 2 \cdot 2,3 = 4,6 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Полная схема имитационных моделей короткозамкнутого асинхронного двигателя, составленная в соответствии со структурными схема-

ми, во вращающейся и неподвижной системах координат приведена на рисунках 3.1.3.3 и 3.1.3.4.

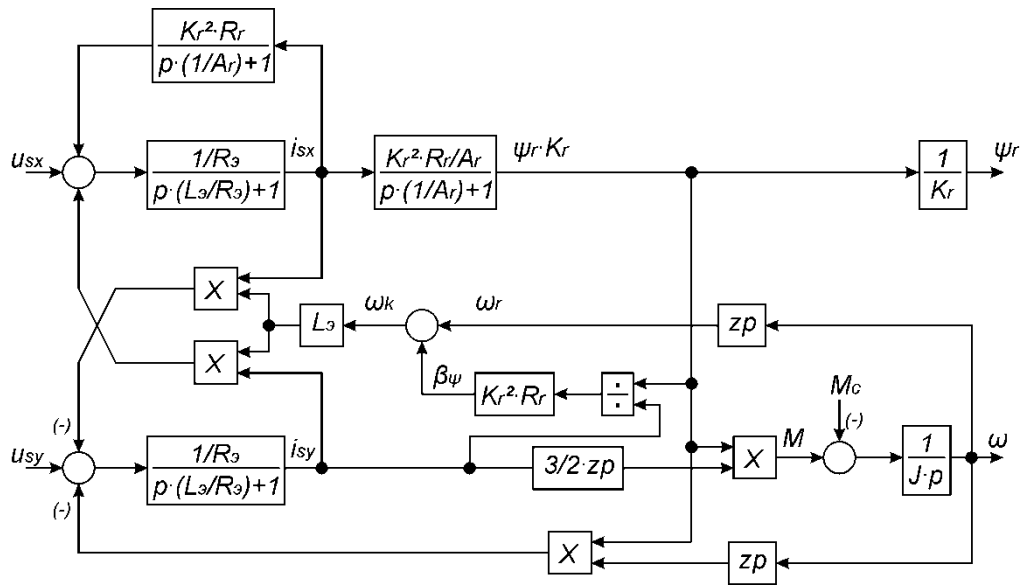


Рисунок 3.1.3.1 – Структурная схема динамической модели асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, во вращающейся системе координат

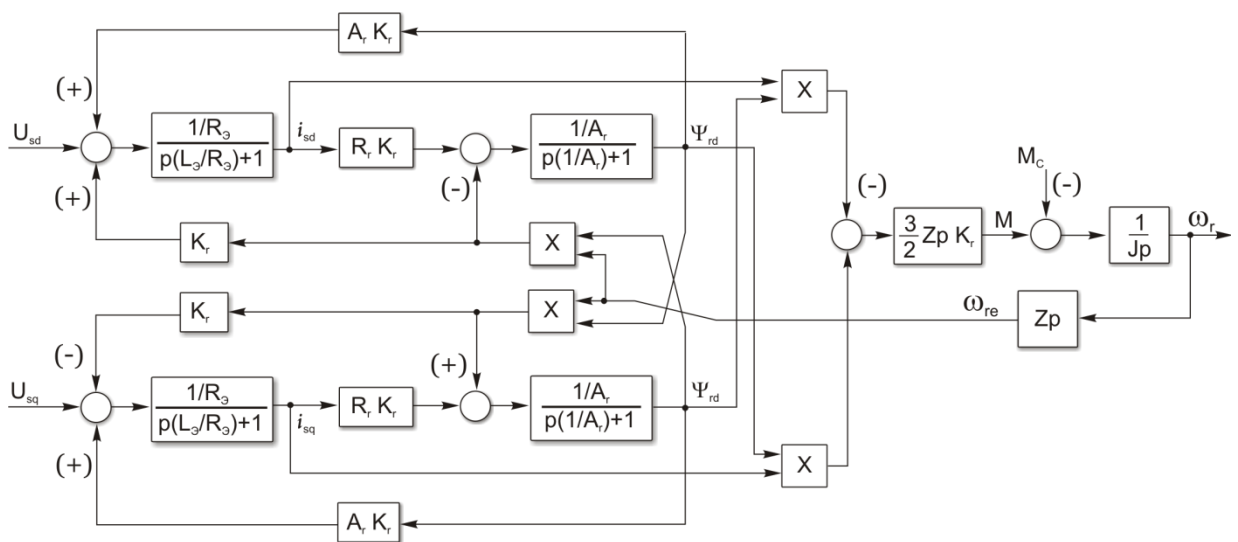


Рисунок 3.1.3.2 – Структурная схема динамической модели асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, в неподвижной системе координат

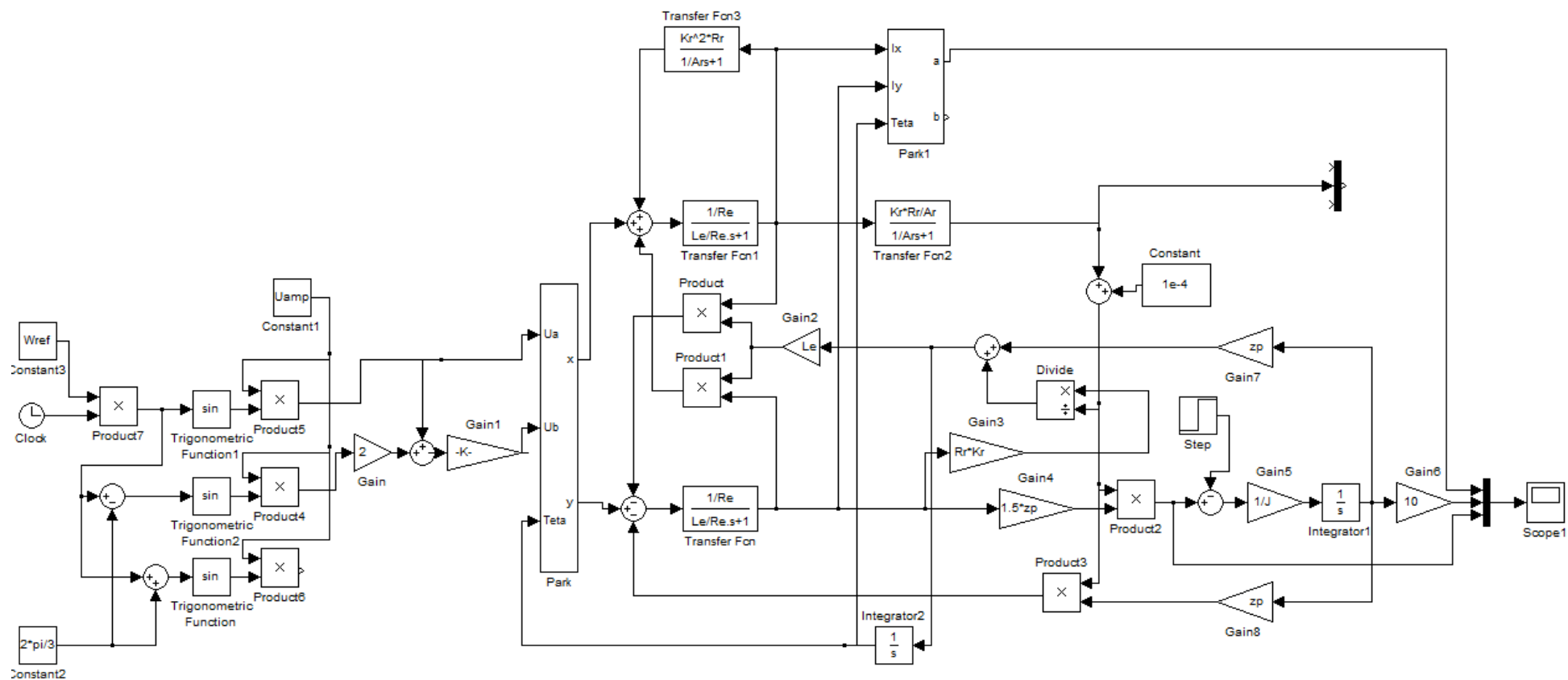


Рисунок 3.1.3.3 – Схема имитационной модели асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, во вращающейся системе координат

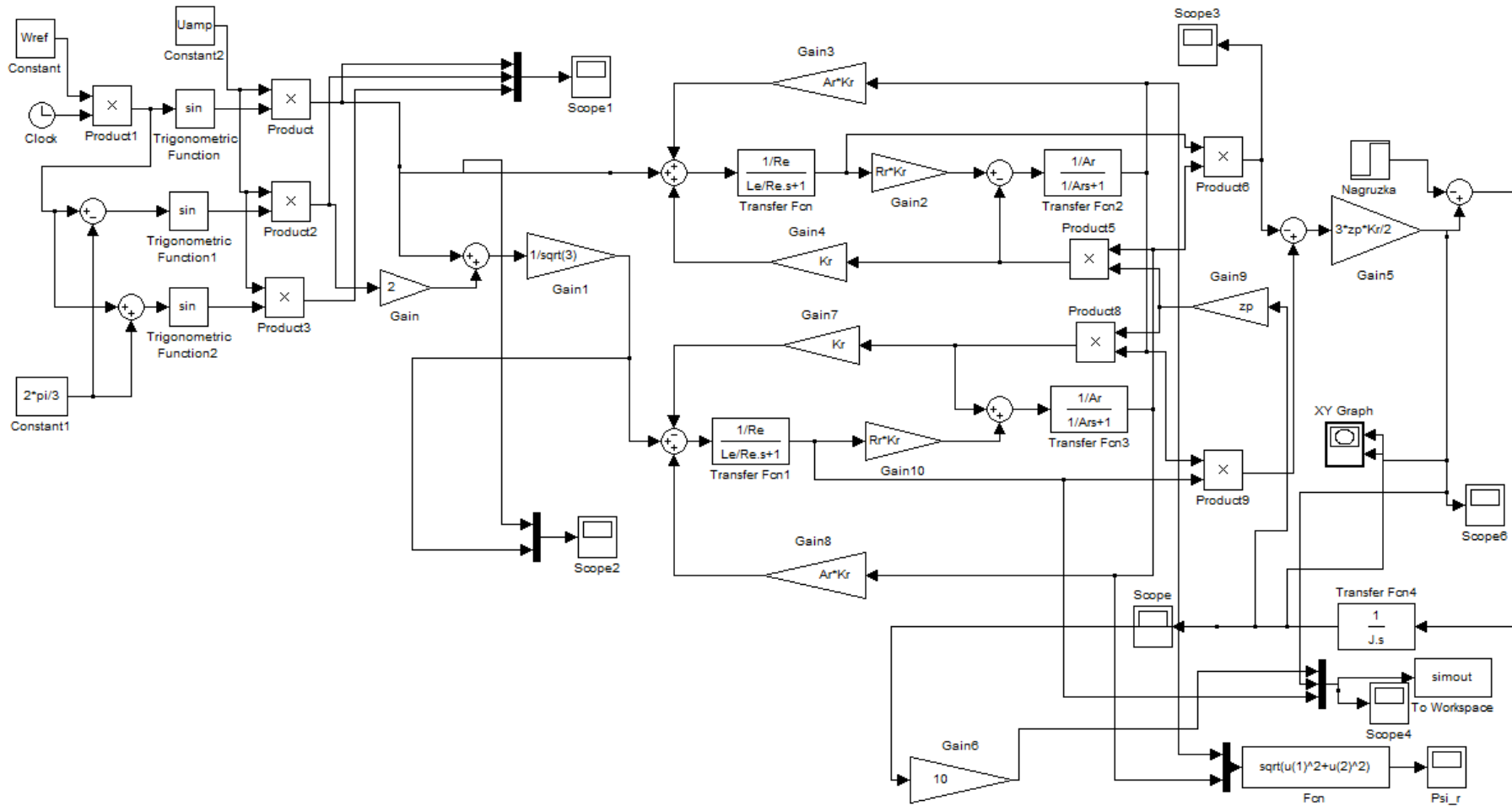
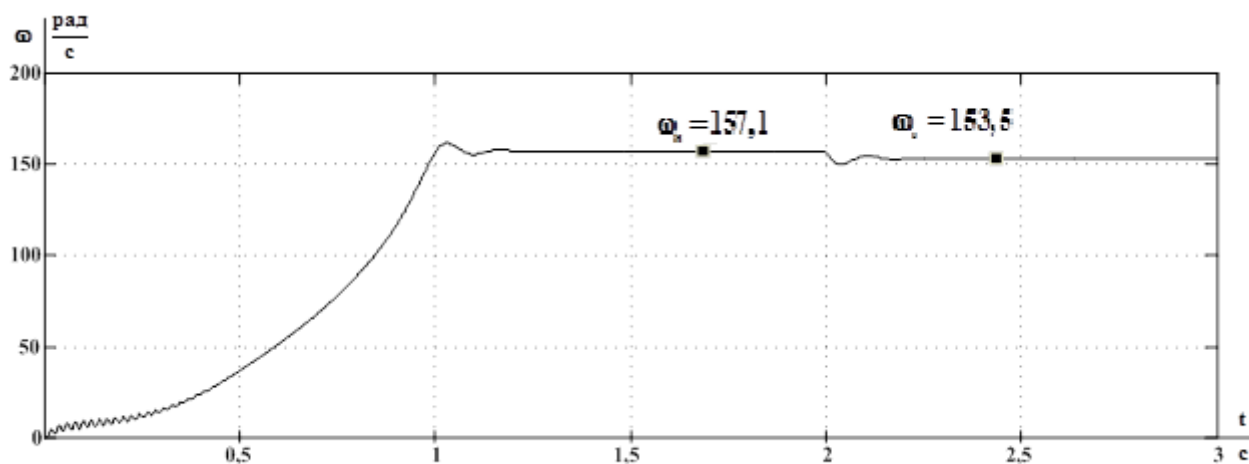


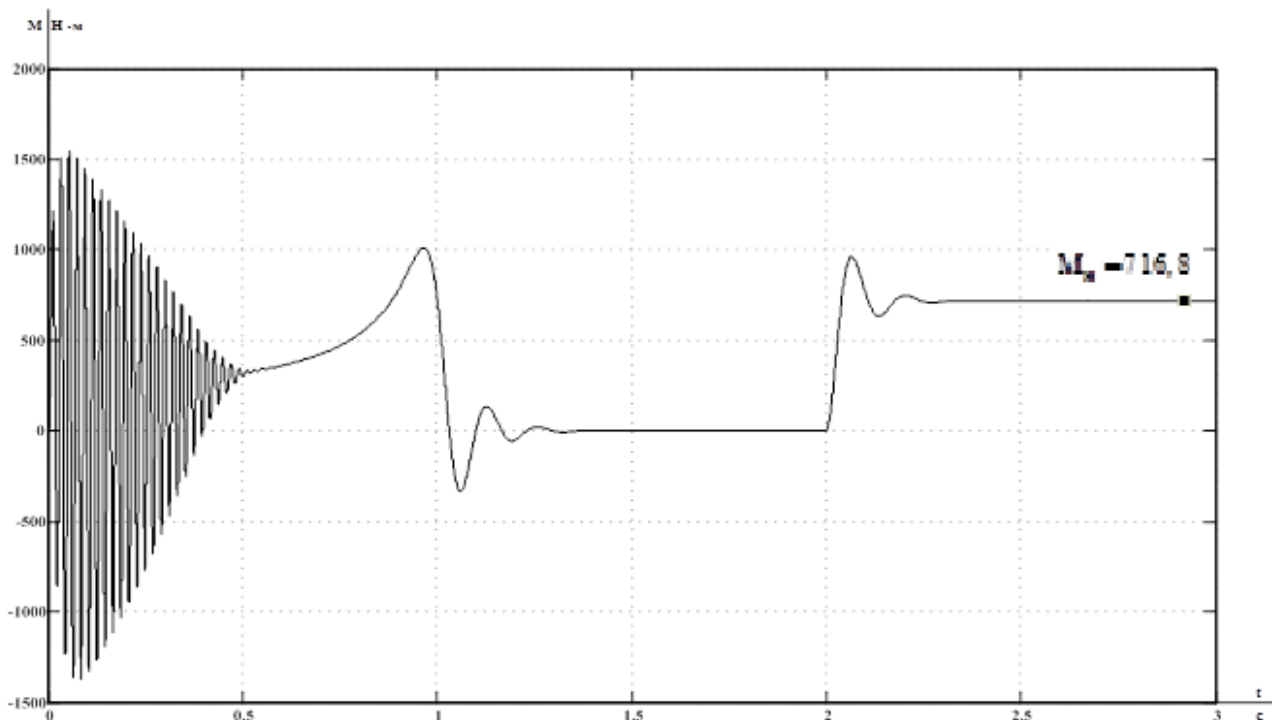
Рисунок 3.1.3.4 – Схема имитационной модели асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, в неподвижной системе координат и источника синусоидальных напряжений, сдвинутых на  $90^0$  относительно друг друга

Так как динамическую механическую характеристику асинхронного двигателя можно получить только по результатам расчетов переходных процессов, то вначале приведем графики переходных процессов скорости, момента и тока статора (рисунки 3.1.3.5 и 3.1.3.6 соответственно) при пуске двигателя прямым включением в сеть.

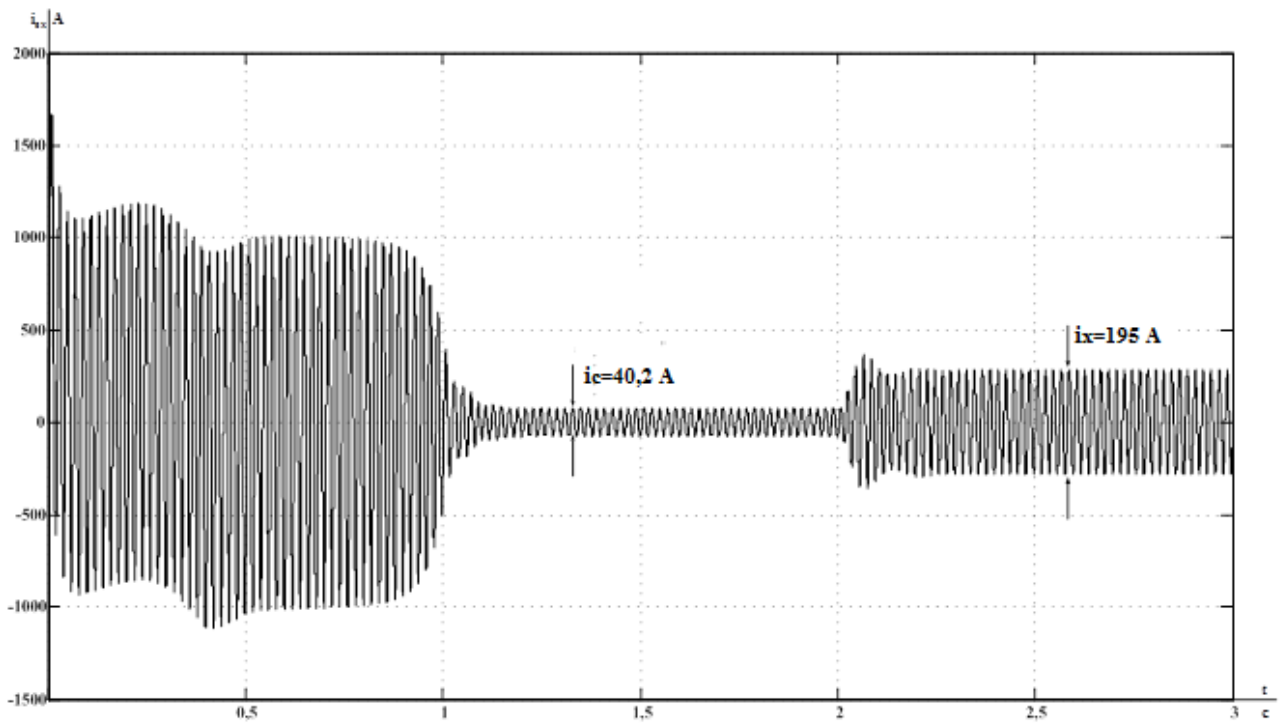
Для исследования динамики асинхронного двигателя при прямом пуске произведем пуск двигателя вхолостую, а затем в момент времени  $t=2$  с осуществим наброс номинальной нагрузки  $M_{н(паспорт)} = 716,766 \text{ Н} \cdot \text{м}$ .



а)



б)



в)

Рисунок 3.1.3.5 – Переходные процессы скорости (а), момента (б), и тока статора (в) при пуске короткозамкнутого асинхронного двигателя RA315S4 прямым включением в сеть и последующем набросе нагрузки (модель во вращающейся системе координат)

### Проверка адекватности модели, сравнение результатов:

Определим погрешности между расчетными данными и данными полученными в результате моделирования.

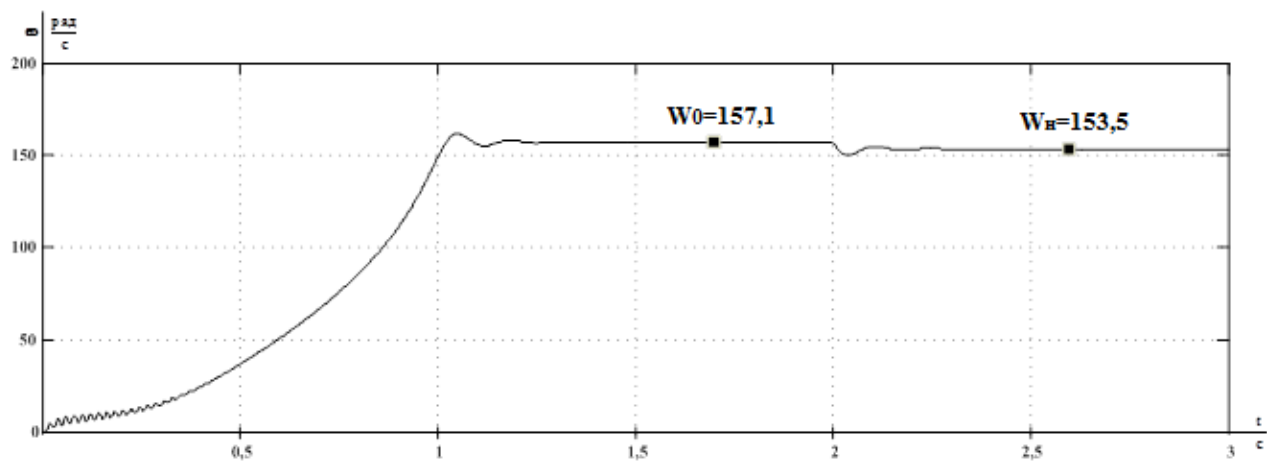
Ток статора  $i_{sx}$  :

$$\Delta i_{sx} = \frac{i_{sxp} - i_{sx}}{i_{sx}} \cdot 100\% = \frac{195,91 - 195}{195} \cdot 100\% = 0,46\%.$$

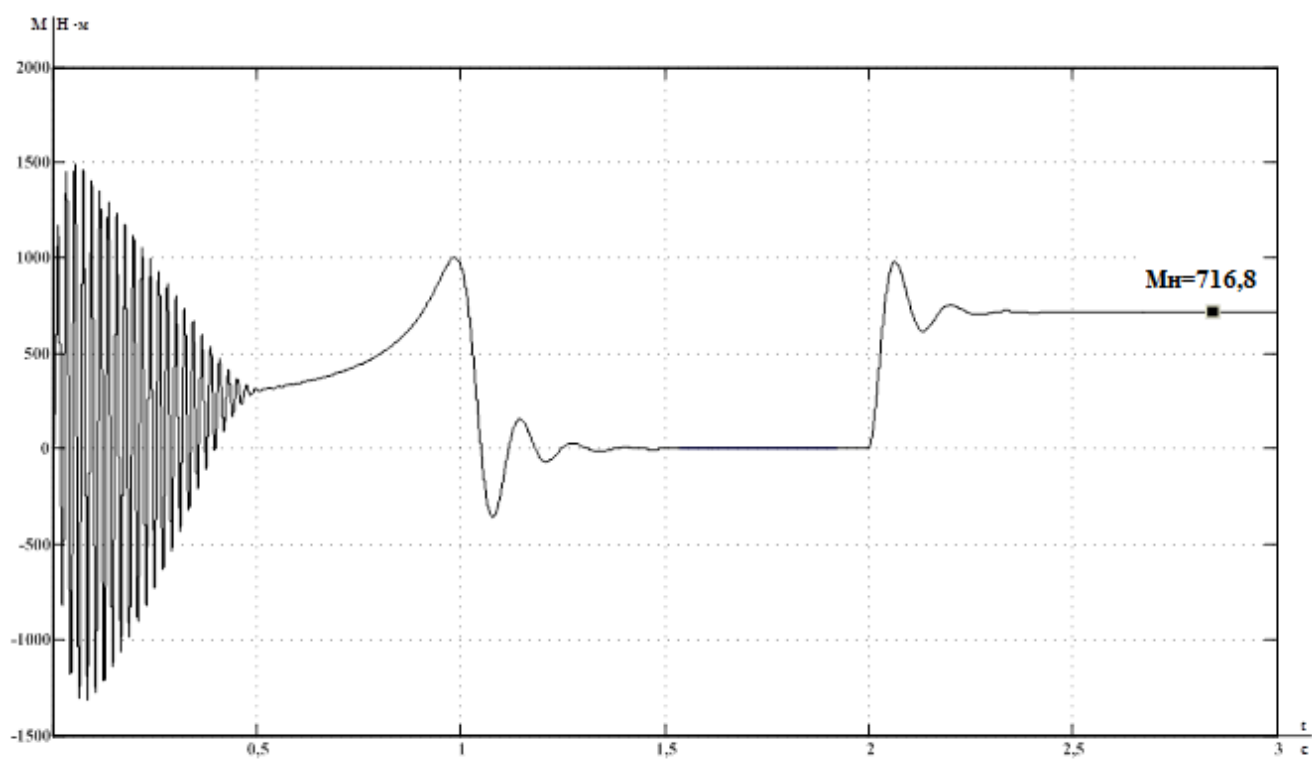
Электромеханический момент двигателя:

$$\Delta M = \frac{M_{hp} - M_H}{M_H} \cdot 100\% = \frac{729,349 - 716,8}{716,8} \cdot 100\% = 1,75\%.$$

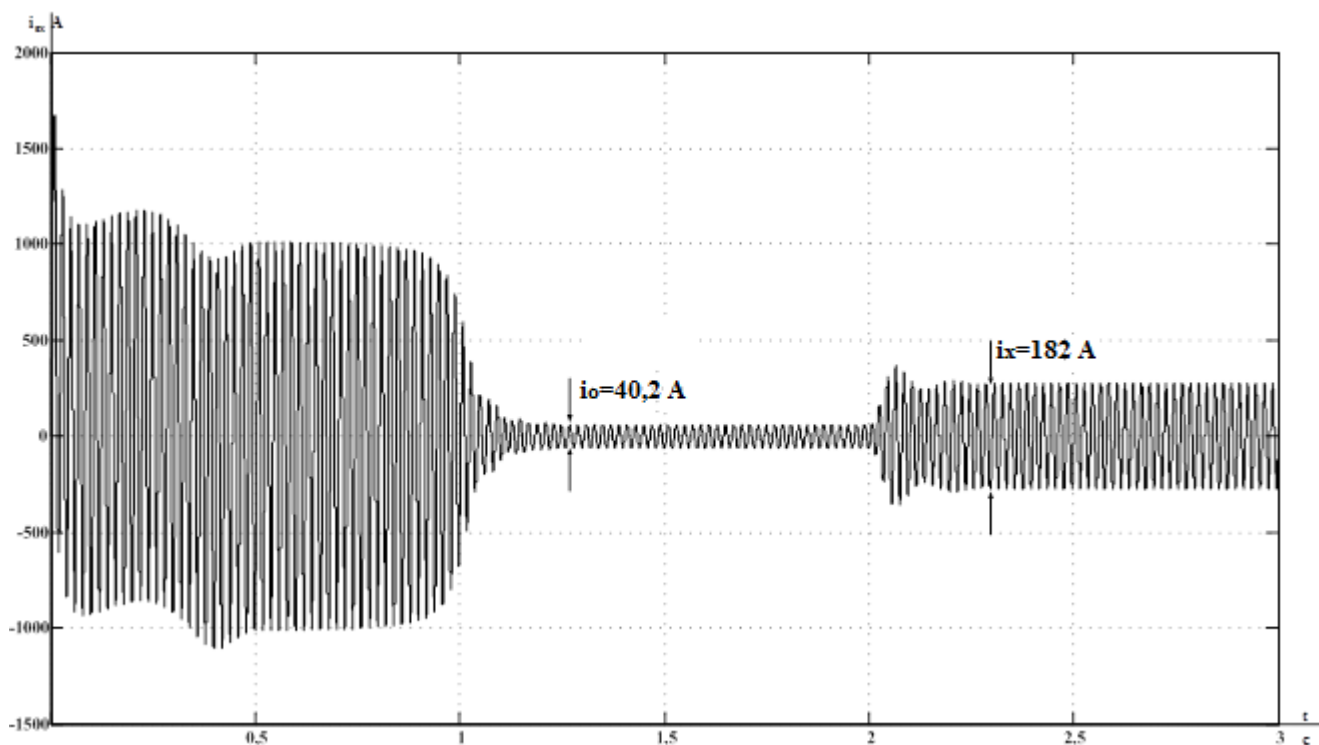




a)



б)



в)

Рисунок 3.1.3.6 – Переходные процессы скорости (а), момента (б), и тока статора (в) при пуске короткозамкнутого асинхронного двигателя RA315S4 прямым включением в сеть и последующем набросе нагрузки (модель в неподвижной системе координат)

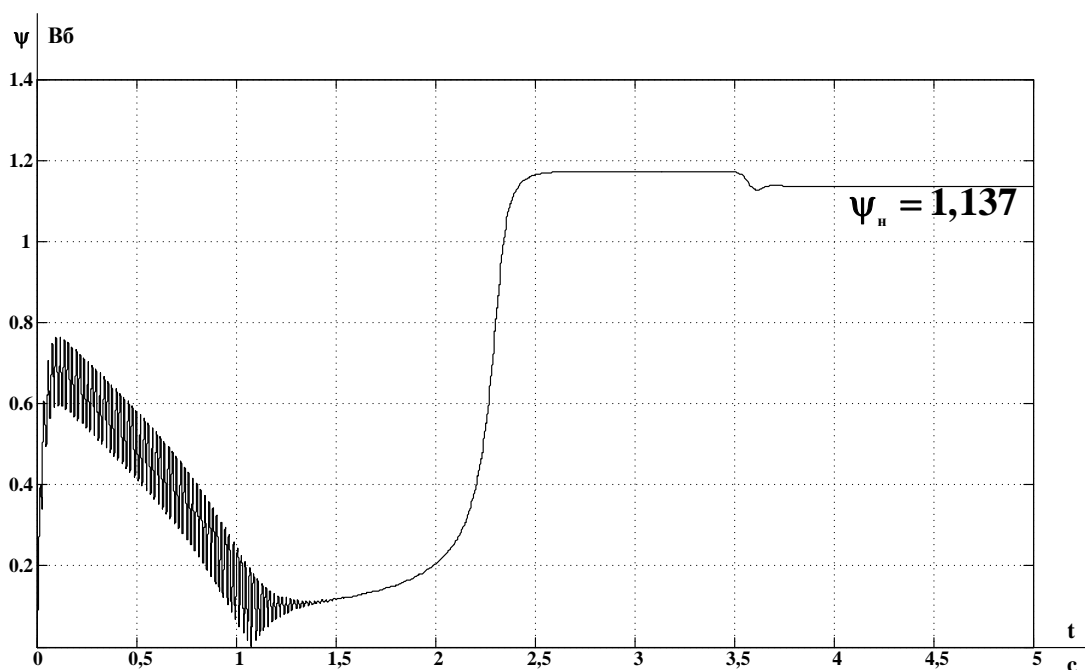


Рисунок 3.1.3.7 – Переходный процесс потокосцепления при пуске асинхронного двигателя RA315S4 прямым включением в сеть и последующем набросе нагрузки (модель в неподвижной системе координат)

## Проверка адекватности модели, сравнение результатов:

Определим погрешности между расчетными данными и данными полученными в результате моделирования.

Ток статора  $i_{sx}$  :

$$\Delta i_{sx} = \frac{i_{sxp} - i_{sx}}{i_{sx}} \cdot 100\% = \frac{195,91 - 182}{182} \cdot 100\% = 7,64\%.$$

Электромеханический момент двигателя:

$$\Delta M = \frac{M_{hp} - M_H}{M_H} \cdot 100\% = \frac{729,349 - 716,8}{716,8} \cdot 100\% = 1,75\%.$$

Анализ переходных процессов при прямом пуске асинхронного двигателя показал наличие колебательной составляющей в кривой электромагнитного момента, которая изменяется в пределах от  $-2000$  до  $+2000$  Н·м и затухает по мере разгона двигателя. Переходные процессы доказывают, что двигатель является устойчивым динамическим звеном.

По результатам расчета статических и динамических характеристик можно считать, что параметры схемы замещения асинхронного двигателя выбраны, верно. Небольшое расхождение в значениях, полученных при моделировании пуска электродвигателя в неподвижной и вращающейся системах координат, обусловленные, вероятно, наличием в одной из моделей координатных преобразователей, тем не менее, не превышают 15% что позволяет говорить об адекватности обеих моделей и допустимости их дальнейшего использования для оптимизации контуров регулирования и моделирования системы регулируемого электропривода.

### 3.1.4 Выбор преобразователя частоты

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

Выбор преобразователя частоты производим по следующим рекомендациям:

1. Параметры питающей сети: 3-х фазная сеть 380/220В, 50 Гц.
2. Выходные параметры преобразователя частоты:  
– 3 фазы, максимальное выходное (линейное) напряжение 380В;
3. Преобразователь выбирается по номинальному (длительно допустимому) току  $I_{ин}$  и максимальному (кратковременно допустимому) току  $I_{и.макс}$  по следующим условиям

$$I_{ин} \geq I_{1н} = I_{ин} \geq 200,2 \text{ А.}$$

$$I_{и.макс} \geq 1,6 \cdot I_{1н} = 1,6 \cdot 202,2 = 323,5 \text{ А.}$$

Выбираем преобразователь частоты фирмы Siemens. Параметры преобразователя приведены в таблице 3.1.4.

Таблица 3.1.4 – Параметры преобразователя частоты

Тип	Параметры питающей сети		Выходное напряжение $U_{и}$ , В	Выходная частота $f_{и}$ , Гц	Выходной ток	Рекомендуемая мощность двигателя $P_2$ , кВт
	$U_c$ , В	$f_c$ , Гц			$I_{ин}$ , А	
Simovort 7132	380	50	380	0 ÷ 132	260	110

Принимаем несущую частоту инвертора  $f_{шим} = 9 \text{ кГц}$ .

## 3.2 Синтез системы управления

### 3.2.1 Функциональная схема электропривода на базе асинхронного двигателя и преобразователя частоты Simovert 7132

Преобразователь частоты (ПЧ) Simovert 7132 позволяет реализовать управление асинхронным двигателем (АД) в составе электропривода (ЭП) различных механизмов. Функции управления ПЧ выполняет микроконтроллерная система управления на базе цифрового сигнального процессора (ЦСП). Функциональная схема микропроцессорной системы управления приведена на рисунке 3.2.1. Система управления ПЧ обеспечивает выполнение следующих функций:

- Управление силовыми ключами инвертора в режиме широтно-импульсной модуляции с несущей частотой от 2 до 16 кГц;
- Сопряжение с внутренними и внешними датчиками аналоговых сигналов в различных стандартах (0...10 В, ±10 В, 4...20 мА);
- Сопряжение с цепями управляющей коммутационной аппаратуры и телесигнализации через порты ввода/вывода дискретных сигналов;
- +24В с гальванической развязкой от силовых цепей питания ПЧ;
- Оперативное наблюдение за параметрами и переменными ЭП с помощью встроенного пульта управления с отображением текстовой информации на графическом дисплее;
- Возможность управления работой ПЧ со встроенного пульта, от кнопочной станции или от внешнего контроллера по последовательному интерфейсу RS-485;
- Доступ к просмотру и изменению текущих параметров ПЧ с пульта управления, с внешнего контроллера по интерфейсу RS-485 или с портативного компьютера USB интерфейсу в реальном масштабе времени;

- Сохранение текущей конфигурации ПЧ в энергозависимой памяти, возможность быстрого восстановления заводских установок;
- Мониторинг питающей сети со стороны ПЧ, возможность принудительного запуска ЭП после восстановления питающего напряжения;
- Мониторинг аварийных ситуаций, возникающих в ЭП с записью в энергозависимую память кода и времени восстановления аварии, последующий просмотр журнала аварий с пульта управления, по RS-485 или USB интерфейсу.

Выводы микропроцессорной системы подключены к управляющим выводам силовых ключей через микросхемы драйверов. Драйверы выполняют функции согласования между силовыми ключами и выходными цепями микропроцессорной системы управления. Кроме того драйверы реализуют защитные функции, прекращая поступление управляющих импульсов к силовым ключам инвертора при возникновении токовых перегрузок.

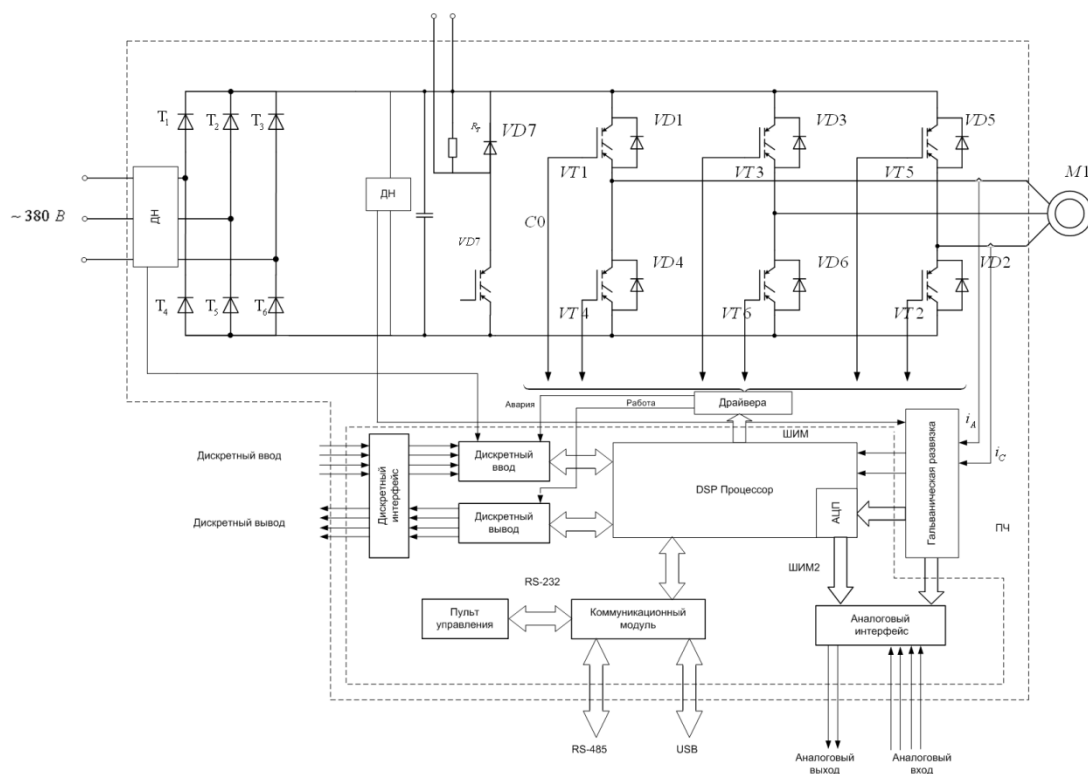


Рисунок 3.2.1 - Функциональная схема электропривода на базе асинхронного двигателя и преобразователя частоты Simovert 7132

Силовой канал ПЧ по схеме с промежуточным звеном постоянного тока и трехфазным инвертором напряжения. Переменное напряжение трехфазной сети 380В поступает на мостовой неуправляемый выпрямитель VD1 – VD6. Выпрямленное напряжение сглаживается дросселями L1, L2 и электролитическим конденсатором C1 большой емкости и поступает к инвертору на силовых ключах VD1 – VD6. напряжение на выходе инвертора формируется по закону широтно-импульсной модуляции и поступает к обмоткам статора АД. В качестве силовых ключей используются IGBT-транзисторы с высокой нагрузочной способностью. Для защиты ключей от обратных напряжений, возникающих из-за ЭДС самоиндукции в моменты коммутации, параллельно IGBT-транзисторам включены быстродействующие диоды VD8 – VD13.

Тормозные режимы на больших скоростях вращения АД реализуются переводом АД в генераторный режим посредством снижения частоты подводимого напряжения. В тормозных режимах рекуперация энергии в сеть невозможна, поэтому через ключ VT7 в цепь постоянного тока включается дополнительное сопротивление  $R_T$  для сброса энергии. При работе на низких скоростях для более эффективного торможения используется режим динамического торможения постоянным током.

Конструктивно все элементы ПЧ размещены на нескольких платах, установленных в пластиковом корпусе. В качестве основы конструкции ПЧ используется металлический радиатор системы охлаждения.

На верхней крышке расположен съемный пульт управления с кнопками и графическим индикатором. Непосредственно под крышкой находится плата управления с компонентами микропроцессорной системы, разъемы для связи с устройствами в USB формате и клеммами для подключения цепей управления и сигнализации.

### 3.2.2 Оптимизация контуров регулирования

В предыдущей главе работы была разработана система векторного управления асинхронным двигателем. В соответствии со структурной схемой системы, представленной на рисунок 2.2.2 необходимо произвести синтез контуров регулирования, выделить и рассчитать основные параметры регуляторов тока, потока и скорости асинхронного электропривода.

#### 3.2.2.1 Оптимизация контура тока

Для настройки контуров регулирования определим следующие дополнительные параметры системы:

– значение номинального потокосцепления двигателя:

$$\psi_{2\text{хн}} = \sqrt{2} \cdot L_m \cdot I_0 = \sqrt{2} \cdot 0,012 \cdot 40,2 = 0,936 \text{ Вб};$$

– максимально-допустимое значение тока при постоянном токоограничении  $I_{\text{ЭПМАКС}} = \text{const}$  :

$$I_{1y\text{макс}} = \sqrt{2} \cdot \sqrt{I_{\text{ЭПМАКС}}^2 - I_0^2} = \sqrt{2} \cdot \sqrt{198,967^2 - 40,2^2} = 270,658 \text{ А.}$$

– электромагнитная постоянная времени:

$$T_{\text{Э}} = \frac{\sigma \cdot L_1}{R_{\text{Э}}} = \frac{0,076 \cdot 0,013}{0,0081} = 0,03 \text{ с.}$$

Оптимизацию контура тока осуществляем без учета перекрестных связей двигателя и при нулевых заданиях на скорость и поток. Структурная схема контура тока представлена на рисунке 3.2.2.1.1. Контур токов  $I_{1x}$  и  $I_{1y}$  идентичные. Контур содержит два инерционных звена первого порядка с постоянными времени  $T_{\text{АИН}} = 0,00006 \text{ с}$  и  $T_{\text{Э}} = 0,006141 \text{ с}$ . Отношение

$$\frac{T_{\text{Э}}}{T_{\text{АИН}}} = \frac{0,03}{0,00006} = 500 \text{ значительно больше единицы, следовательно, принимаем}$$

-  $T_{\text{мт}} = T_{\text{АИН}} = 0,00006 \text{ с}$ . - малая постоянная времени контура.



- $T_{\Sigma}=0,03\text{с.}$  – большая постоянная времени контура, которую следует компенсировать.

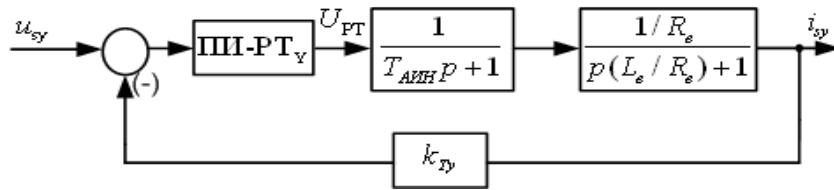


Рисунок 3.2.2.1.1 – Структурная схема контура тока

Контур тока настраиваем на модульный оптимум (МО). Передаточная функция ПИ-регулятора тока:

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

Коэффициент усиления регулятора тока:

$$k_{pT} = \frac{T_{\Sigma} \cdot R_{\Sigma}}{k_{инв} \cdot a_T \cdot T_{аинв}} = \frac{0,03 \cdot 0,0081}{1 \cdot 2 \cdot 0,00006} = 2,025,$$

где

$k_{инв}=1$  - коэффициент усиления инвертора.

$a_T=2$  – коэффициент оптимизации.

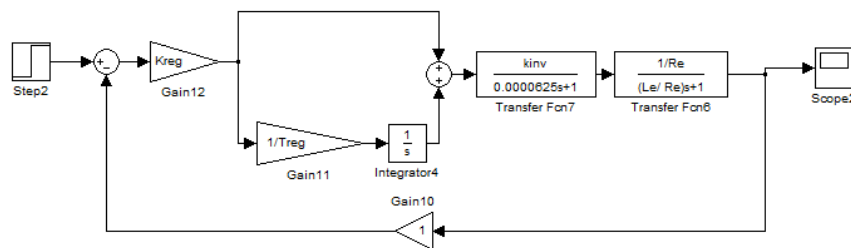


Рисунок 3.2.2.1.2 – Имитационная модель контура для управления составляющей тока статора.

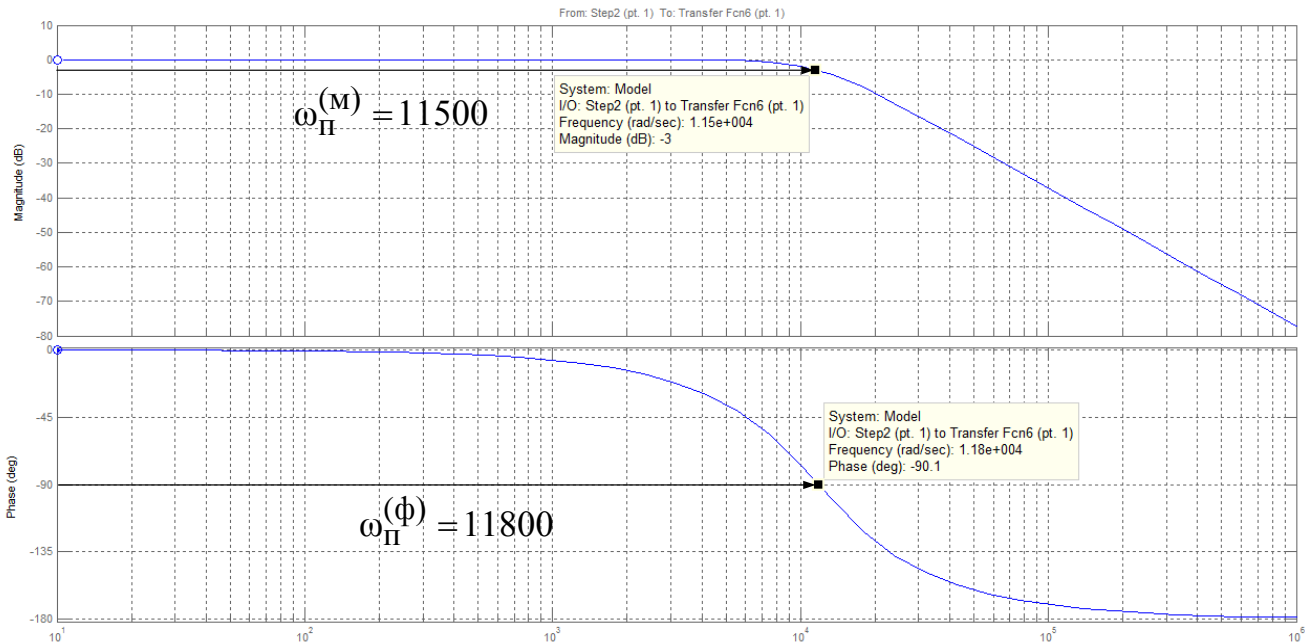


Рисунок 3.2.2.1.3 – Логарифмические частотные характеристики замкнутого контура тока, настроенного на МО.

Результаты моделирования переходных процессов в контуре тока, настроенного на модульный оптимум при отработке ступенчатого входного воздействия  $U_{зг} = 1\text{В}$  приведены в виде переходной характеристики  $i(t)$  на рисунке 3.2.2.1.4.

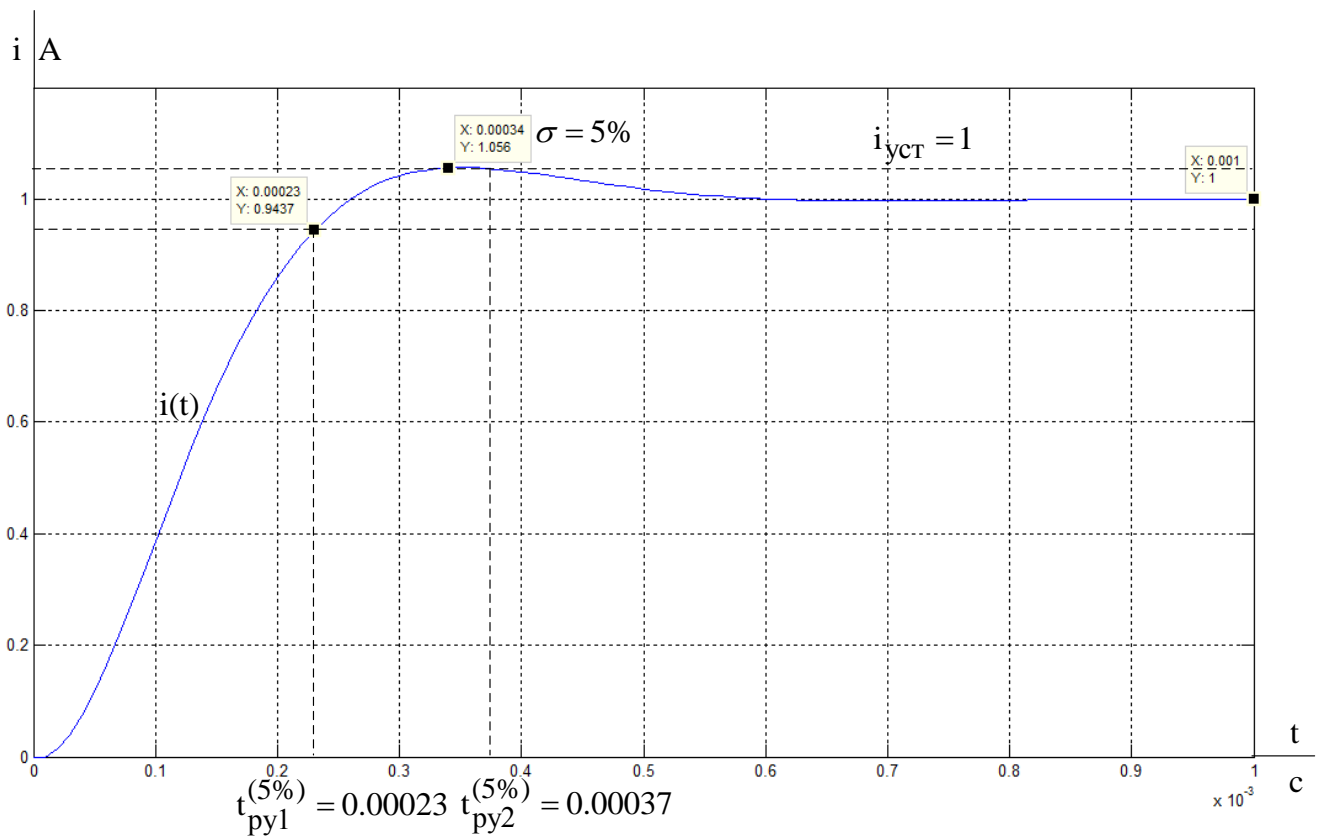


Рисунок 3.2.2.1.4 – Переходная характеристика  $i(t)$  контура тока.

Сведем теоретические и экспериментальные показатели качества работы линейризованного контура тока в таблицу 3.2.2.1.

Таблица 3.2.2.1 – Показатели качества переходных процессов по управлению оптимизированного контура тока.

$t_{py1}^{(5)}, c$	$t_{py2}^{(5)}, c$	$\sigma, \%$	$\Delta I_{уст}, A$	$\omega_{\Pi}^{(M)}, \frac{рад}{с}$	$\omega_{\Pi}^{(\Phi)}, \frac{рад}{с}$
Ожидаемые показатели					
0,000264	0,00036	5	0	$\infty$	11800
Результаты моделирования					
0,00023	0,00037	5	0	11500	11800

Ожидаемые показатели качества работы контура тока:

– установившаяся ошибка  $\Delta I_{уст}=0$ ;

– полоса пропускания по модулю  $\omega_{\Pi}^{(M)}=\infty \frac{рад}{с}$ ;

– полоса пропускания по фазе

$$\omega_{\Pi}^{(\Phi)} = \frac{(0,71 \div 0,9)}{T_{\mu T}} = \frac{0,71 \div 0,9}{0,00006} = 11800 \div 15000 \frac{рад}{с};$$

– перерегулирование  $\sigma \approx 5 \%$ ;

– время первого и окончательного вхождения в 5% зону при отработке ступенчатого задания

$$t_{py1}^{(5)} \approx (2,75 \div 4,1) \cdot T_{\mu T} = 4,1 \cdot 0,00006 = 0,000264 \text{ с};$$

$$t_{py2}^{(5)} \approx 6 \cdot T_{\mu T} = 6 \cdot 0,00006 = 0,00036 \text{ с}.$$

Вывод: Установившаяся ошибка по управлению равна нулю.

Анализ полученных результатов моделирования показывает, что они отличаются от ожидаемых незначительно. Этот факт говорит о правильной настройке

контуров тока. Результаты моделирования контуров  $i_{sx}$  и  $i_{sy}$  имеют минимальные различия, основные показатели качества переходных процессов практически идентичны, следовательно, параметры регуляторов настроенного на модульный оптимум контура тока  $i_{sx}$  можно без изменений использовать в контуре тока  $i_{sy}$ .

### 3.2.2.2 Оптимизация контура потокосцепления



Рисунок 3.2.2.2.1 – Структурная схема контура потокосцепления.

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

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

Где  $k_{pT} = \frac{1}{8 \cdot k_r^2 \cdot R_r \cdot T_{\mu m}}$  - коэффициент усиления.

$$k_{pT} = \frac{1}{8 \cdot 1,021^2 \cdot 0,026 \cdot 0,00006} = 8,7653 \cdot 10^4.$$

$T_{pT} = \frac{1}{A_r} = \frac{1}{2,042} = 0,49$ с. - постоянная времени регулятора.

Для построения логарифмических частотных характеристик используем возможности программного пакета MatLAB.

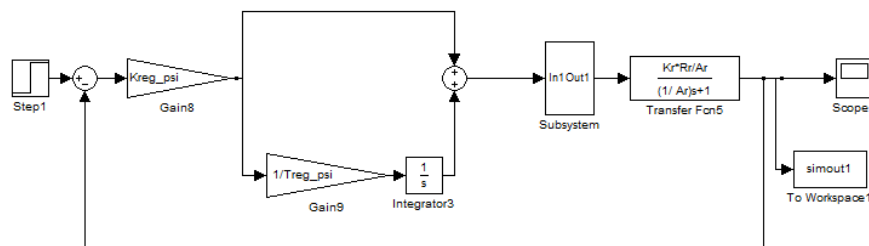


Рисунок 3.2.2.2.2 – Имитационная модель контура потокосцепления.

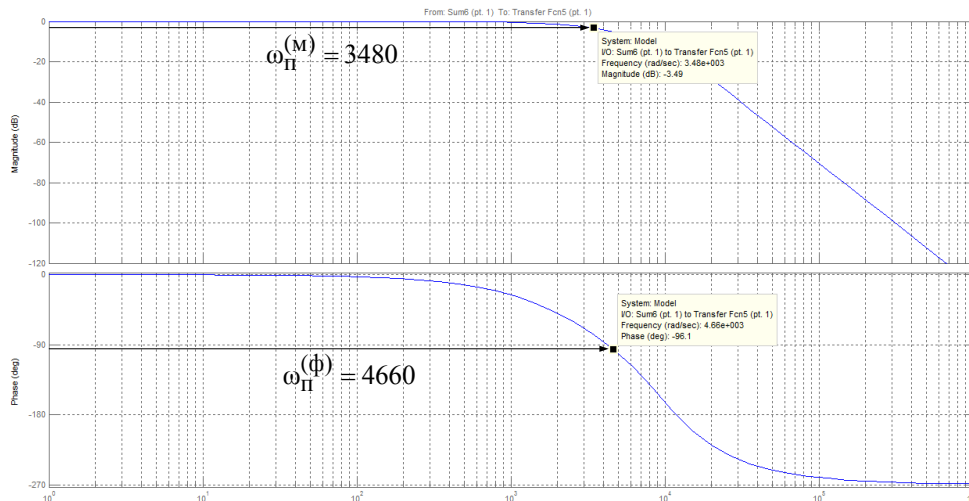


Рисунок 3.2.2.2.3 – Логарифмические частотные характеристики замкнутого контура потокосцепления, настроенного на МО.

Результаты моделирования переходных процессов в контуре потокосцепления, настроенного на модульный оптимум при отработке ступенчатого входного воздействия  $U_{3\Pi} = 0,936$  Вб приведены в виде переходной характеристики на рисунке 3.2.2.2.4.

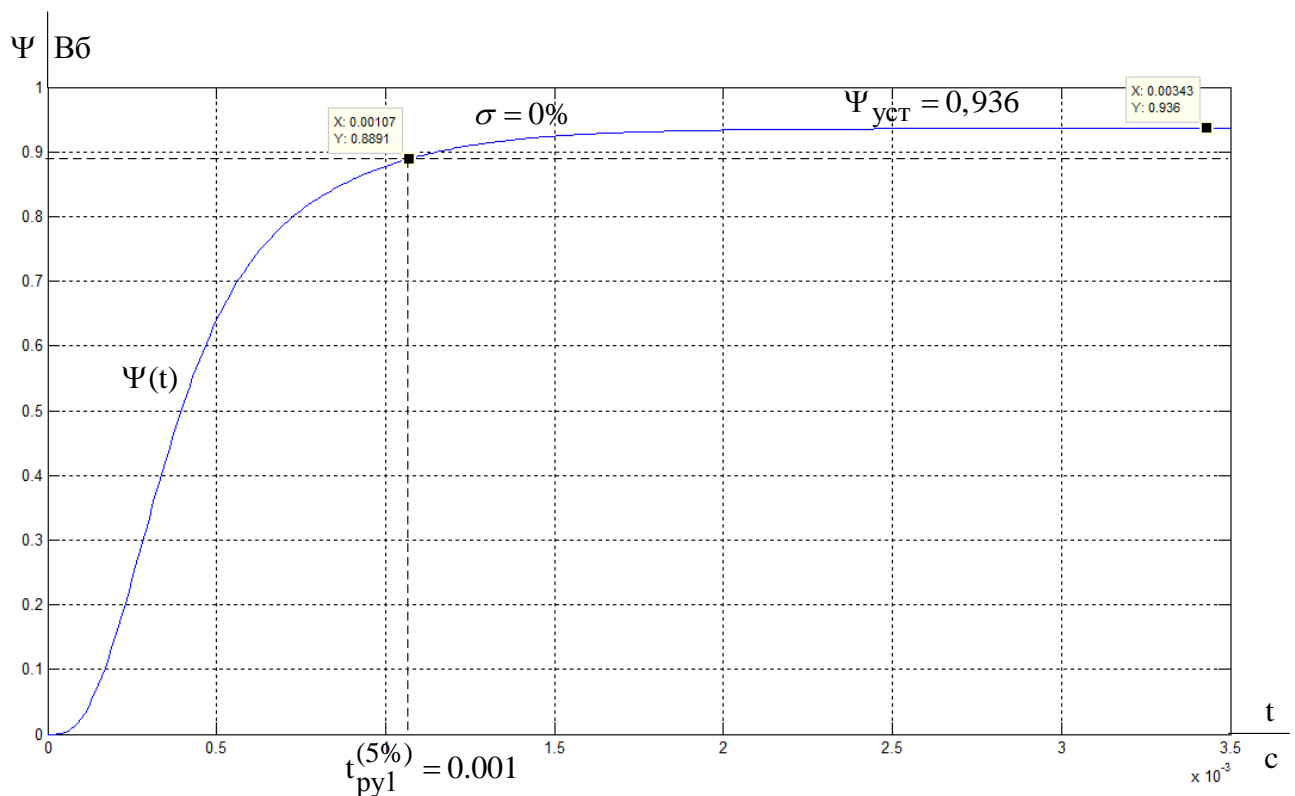


Рисунок 3.2.2.2.4 – Переходная характеристика  $\psi(t)$  контура потокосцепления.

Сведем теоретические и экспериментальные показатели качества работы линейризованного контура потокосцепления в таблицу 3.2.2.2.

Таблица 3.2.2.2 – Показатели качества переходных процессов по управлению оптимизированного контура потокосцепления.

$t_{py1}^{(5)}, c$	$t_{py2}^{(5)}, c$	$\sigma, \%$	$\Delta\psi_{уст}, Bб$	$\omega_{п}^{(M)}, \frac{рад}{c}$	$\omega_{п}^{(\Phi)}, \frac{рад}{c}$
Ожидаемые показатели					
0,0013	0,002	0	0	$\infty$	1836
Результаты моделирования					
0,001	-	0	0	4660	3480

Ожидаемые показатели качества работы контура тока:

- установившаяся ошибка  $\Delta\psi_{уст}=0$ ;
- полоса пропускания по модулю  $\omega_{п}^{(M)}=\infty \frac{рад}{c}$ ;
- полоса пропускания по фазе

$$\omega_{п}^{(\Phi)} = \frac{(0,71 \div 0,9)}{a_m \cdot T_{\mu T}} = \frac{(0,71 \div 0,9)}{8 \cdot 0,00006} = (1479 \div 1836) \frac{рад}{c};$$

- перерегулирование  $\sigma \approx 0 \%$ ;
- время первого и окончательного вхождения в 5% зону при отработке ступенчатого задания

$$t_{py1}^{(5)} \approx (2,75 \div 4,1) \cdot 8T_{\mu T} = (2,75 \div 4,1) \cdot 8 \cdot 0,00006 = (0,0013 \div 0,002) c;$$

### 3.2.2.3 Оптимизация контура скорости

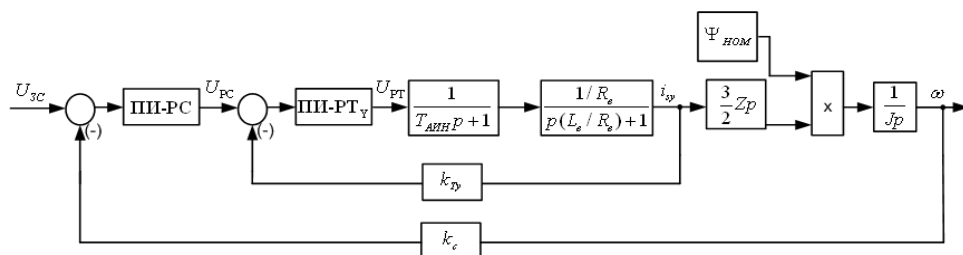


Рисунок 3.2.2.3.1 – Структурная схема контура скорости.

Контур скорости настраиваем на симметричный оптимум (СО). С учетом параметров контура выбираем ПИ-регулятор с передаточной функцией:

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

где  $k_{pc} = \frac{J \cdot 98}{1,5 \cdot a_c \cdot z_p \cdot \psi_{2H} \cdot 1024 \cdot T_{\mu m}}$  - коэффициент усиления.

$$k_{pc} = \frac{98 \cdot 4.6}{8 \cdot 0,936 \cdot 3 \cdot 1024 \cdot 0,00006} = 326,6.$$

Для уменьшения влияния работы контура потокосцепления на динамику контура скорости принимаем малую некомпенсируемую постоянную времени контура скорости:

$$T_{\mu c} = 32 \cdot T_{\mu t} = 32 \cdot 0,00006 = 0,00192 \text{ с.}$$

Для величины малой некомпенсируемой постоянной времени в контуре скорости принято значение  $T_{\mu c} = 32 T_{\mu t}$ , что гораздо больше чем при оптимизации контура управления потокосцеплением.

Постоянная времени регулятора скорости:

$$T_{pc} = 98 \cdot T_{\mu t} = 98 \cdot 0,00006 = 0,00588 \text{ с.}$$

Для уменьшения перерегулирования контура скорости, настроенного на симметричный оптимум, на вход контура устанавливаем фильтр (апериодическое звено первого порядка) с постоянной времени:

$$T_{\text{вх.ф}} = 32 \cdot 4 \cdot T_{\mu t} = 32 \cdot 4 \cdot 0,00006 = 0,00768 \text{ с.}$$

Ожидаемые показатели работы замкнутого контура скорости с фильтром на входе:

- установившаяся ошибка:  $\Delta \omega_{уст} = 0$ ;
- перерегулирование:  $\sigma = 8,1\%$ ;
- время первого согласования:  $t_{py1}^{(5)} = 7 \cdot T_{\mu c} = 7 \cdot 0,00192 = 0,013 \text{ с}$ ;

– время переходного процесса при обработке ступенчатого управляющего

воздействия:  $t_{py2}^{(5)} = 12 \cdot T_{\mu c} = 12 \cdot 0,00192 = 0,023 \text{ с}$ ;

– полоса пропускания по модулю:

$$\omega_{\pi}^{(M)} = \frac{0,5}{T_{\mu c}} = \frac{0,5}{0,00192} = 260.417 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$$

– полоса пропускания по фазе:

$$\omega_{\pi}^{(\Phi)} = \frac{0,36}{T_{\mu c}} = \frac{0,36}{0,00192} = 187.5 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$$

Имитационная модель замкнутого контура скорости представлена на рисунке 24.

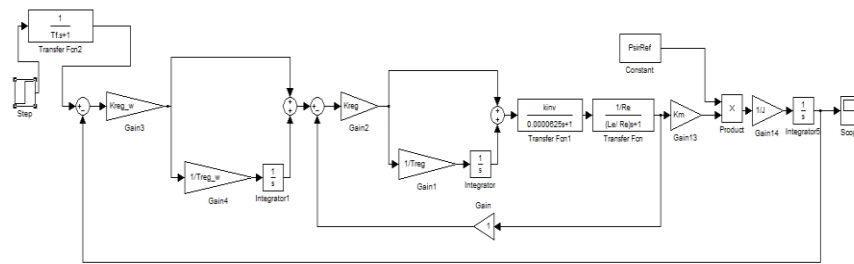


Рисунок 3.2.2.3.2 – Имитационная модель замкнутого контура скорости.

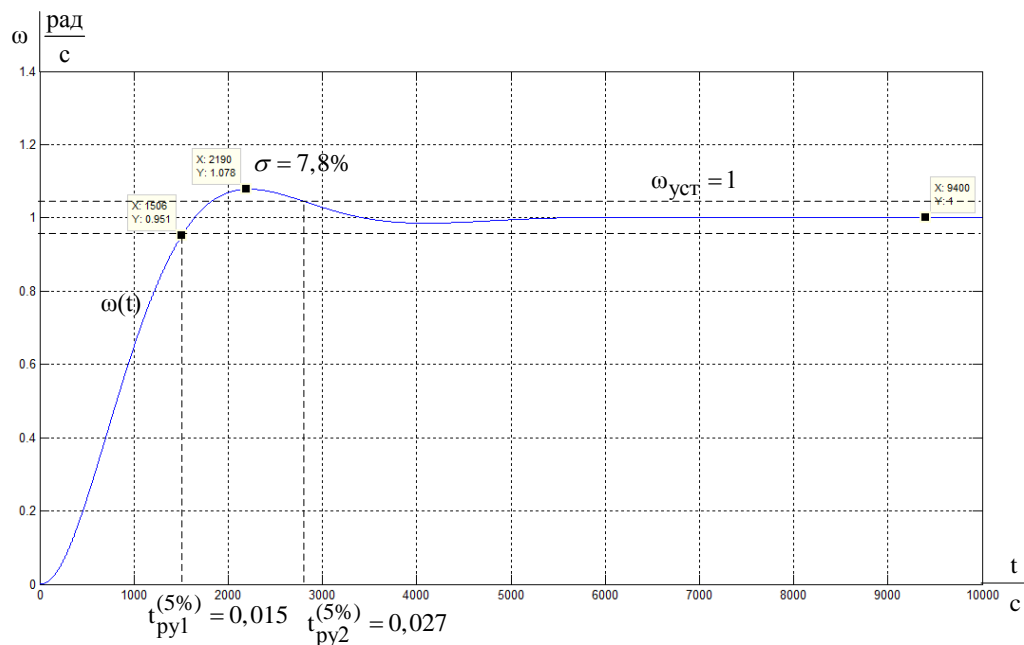


Рисунок 3.2.2.3.3 – Переходный процесс в контуре скорости



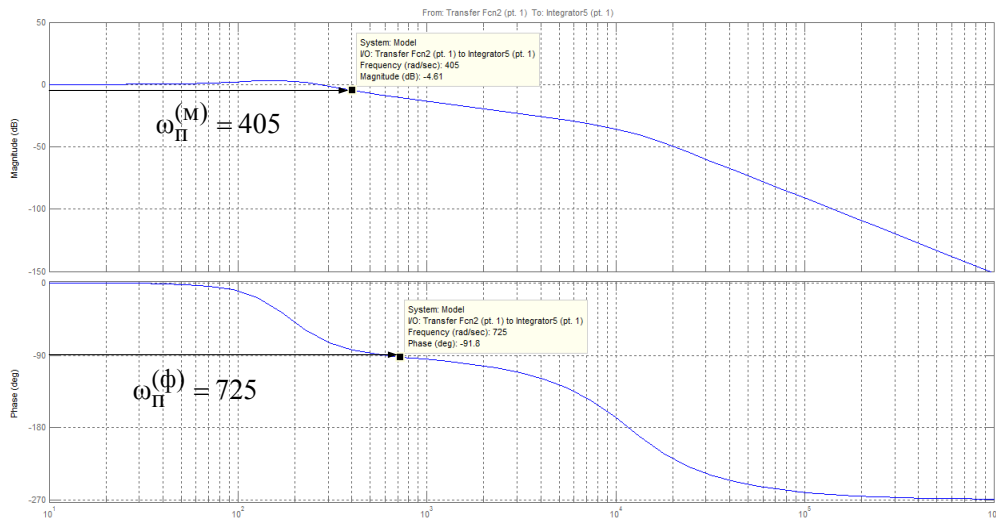


Рисунок 3.2.2.3.4 – ЛЧХ замкнутого контура скорости.

Сведем теоретические и экспериментальные показатели качества работы линейризованного контура тока в таблицу 3.2.2.3.

Таблица 3.2.2.3 – Показатели качества переходных процессов по управлению линейризованного контура скорости, оптимизированного по СО

$t_{py1}^{(5)}$ , с	$t_{py2}^{(5)}$ , с	$\sigma$ , %	$\Delta\omega_{уст}$ , рад/с	$\omega_{\Pi}^{(\Phi)}$ , $\frac{рад}{с}$	$\omega_{\Pi}^{(M)}$ , $\frac{рад}{с}$
Ожидаемые показатели					
0,013	0,023	8,1	0	187	260
Результаты моделирования					
0,015	0,027	7,8	0	725	405

Сравнивая ожидаемые показатели качества переходного процесса в контуре скорости, оптимизированного по СО с фильтром на входе, с результатами моделирования, можно сказать, что теоретические значения сошлись с полученными с допустимой погрешностью.

### **3.3 Исследование САУ РЭП с использованием модели двигателя во вращающейся системе координат**

В предыдущих пунктах работы для оптимизации контуров регулирования использовалась модель асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором во вращающейся системе координат. Это обусловлено, прежде всего, тем, что данная структура модели двигателя позволяет легко использовать принципы подчинённого регулирования при оптимизации системы. Использование для аналогичных целей модели асинхронного электродвигателя в неподвижной системе координат сильно осложняется фактом наличия в её структуре многочисленных перекрёстных обратных связей, делающих невозможным выделение отдельных контуров регулирования.

Учитывая вышеперечисленные соображения, проверку адекватности работы оптимизированных контуров регулирования логично сначала провести со структурой, имеющей в своем составе модель асинхронного электродвигателя во вращающейся системе координат, и лишь затем, доказав адекватность работы системы, адаптировать её к модели в стационарной (неподвижной) системе координат (то что эти модель в целом идентичны уже доказано), которая наиболее достоверно отображает характер переходных процессов в реальном АД, а следовательно и во всей системе САУ РЭП.

На рисунках 3.3.1 и 3.3.2 приведены соответственно структурная схема системы линеаризованного асинхронного ЭП с векторным управлением на базе модели АД во вращающейся системе координат с ориентацией по вектору потокосцеплений ротора, и составленная на её основе имитационная модель линеаризованного асинхронного ЭП с векторным управлением на базе модели АД во вращающейся системе координат с ориентацией по вектору потокосцеплений ротора.

Результаты имитационного моделирования системы САУ РЭП в виде графиков переходных процессов системы, представлены на рисунке 3.3.3.

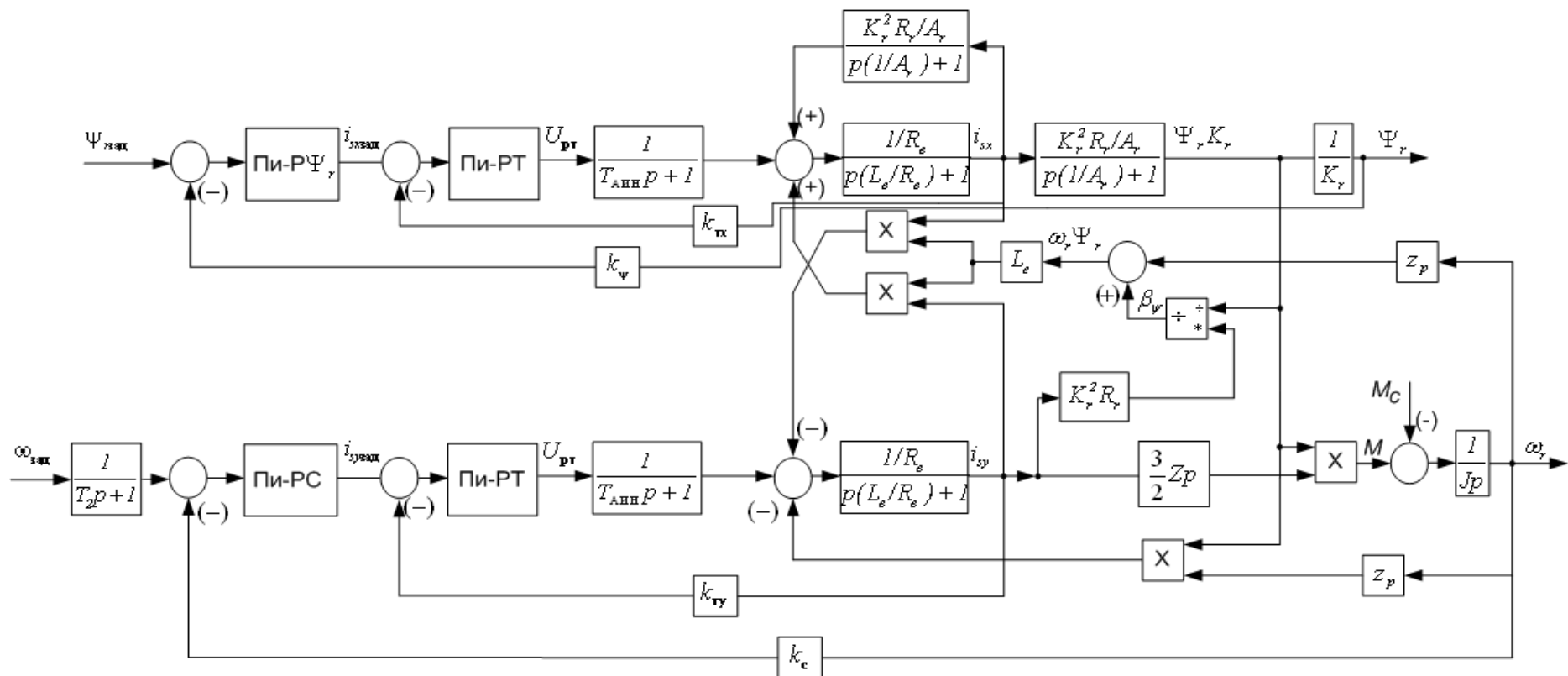


Рисунок 3.3.1 - Структурная схема системы линеаризованного асинхронного ЭП с векторным управлением на базе модели АД во вращающейся системе координат с ориентацией по вектору потокосцеплений ротор

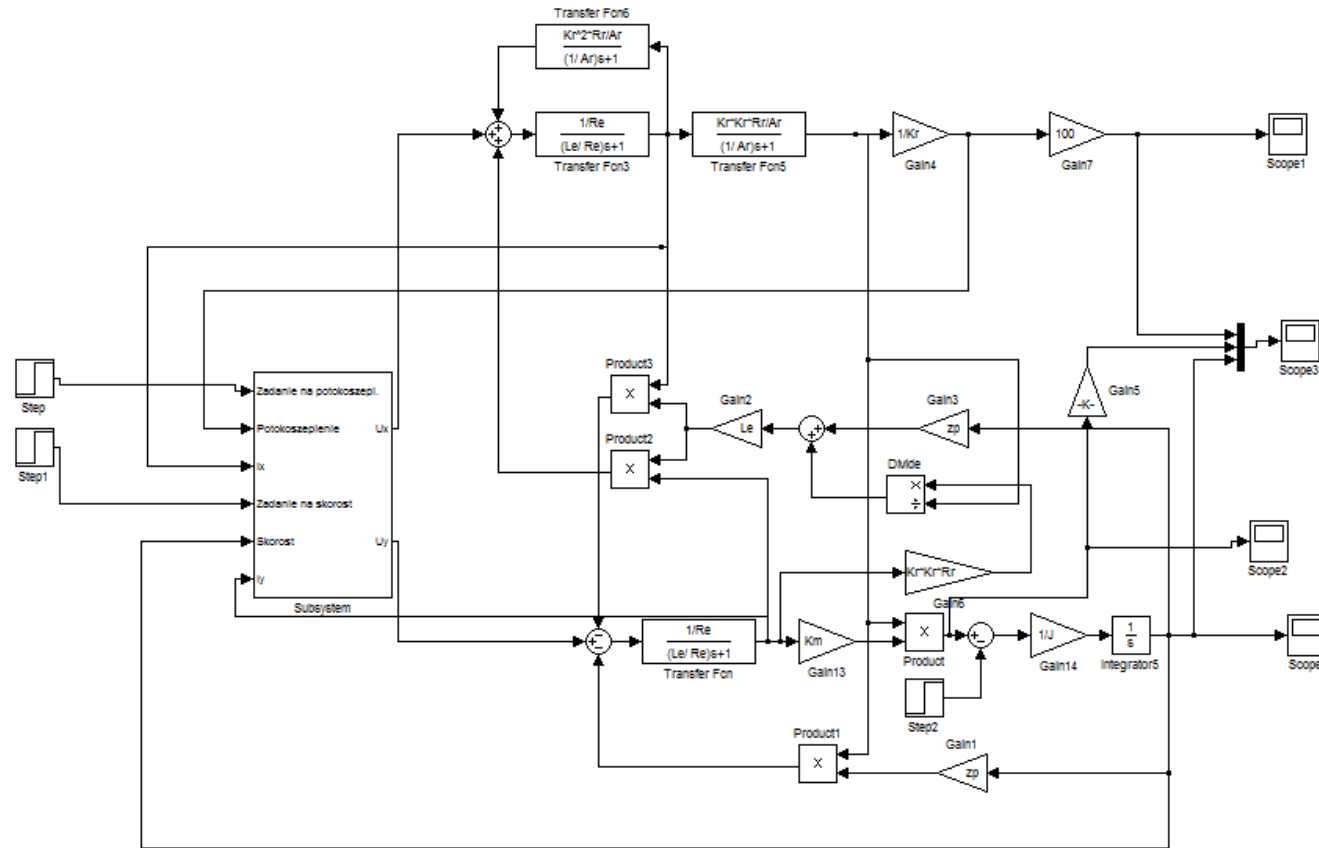


Рисунок 3.3.1 - Имитационная модель линейризованного асинхронного ЭП с векторным управлением на базе модели АД во вращающейся системе координат с ориентацией по вектору потокосцеплений ротора

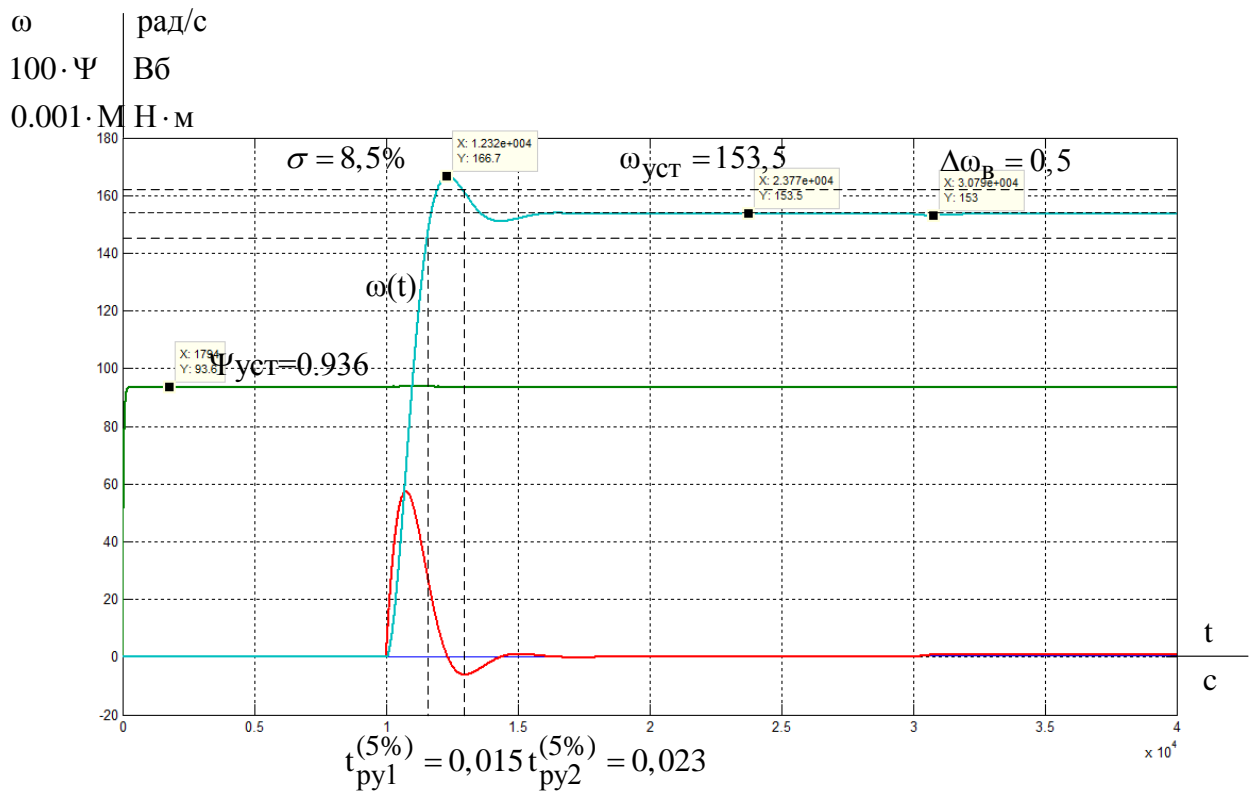


Рисунок 3.3.3 – Переходные процессы скорости, электромагнитного момента и потокосцепления векторного электропривода

### 3.4 Выводы.

1. Анализ режимов работы электропривода волочильной машины на математической модели подтвердил, что разработанный принцип управления электроприводом, а также предложенные настройки контуров регулирования обеспечивают регулирование скорости волочения с погрешностью не превышающей пять процентов. Таким образом, обеспечиваются требования технологического процесса, во всех режимах.

2. Доказана возможность использования неадаптивного наблюдателя состояния переменных недоступных для прямого измерения в системе векторного управления электроприводом волочильной машины.

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
3-5Г2Б1	Толкачев Александр Александрович

Институт	ИнЭО	Кафедра	Электропривода и электрооборудования
Уровень образования	Бакалавр	Направление/специальность	«Электрооборудование и электрохозяйство предприятий, организаций и учреждений»

### Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

<p>1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения</p>	<p><i>Объект исследования электропривод волоочильной машины производства гибких теплонагревательных элементов. Рабочей зоной является тянучно-волоочильный цех, рабочее место волоочильная машина. Область применения электропривода волоочильной машины, метизные предприятия России.</i></p>
---	--

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

<p><b>1. Производственная безопасность</b></p> <p>1.1 Анализ выявленных вредных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения в следующей последовательности:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- физико-химическая природа вредности, её связь с разрабатываемой темой;</li> <li>- действие фактора на организм человека;</li> <li>- приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ);</li> <li>- предлагаемые средства защиты;</li> <li>- (сначала коллективной защиты, затем – индивидуальные защитные средства).</li> </ul> <p>1.2. Анализ выявленных опасных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения в следующей последовательности:</p> <p>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>	<p><i>Опасные и вредные производственные факторы регламентируются ГОСТом 12.0.003-74. ССБТ. «Опасные и вредные производственные факторы. Классификация Физические опасные и вредные производственные факторы»</i></p> <p><i>При волочении проволоки выявлены следующие вредные факторы:</i></p> <p><i>СИЗ: Респираторы, противогазы.</i></p> <p><i>Повышенный уровень шума составляет</i></p> <p style="text-align: center;"><i>– 85 Дб</i></p> <p><i>ГОСТ 12.1.003-2014 «Шум. Общие требования безопасности»</i></p> <p><i>СИЗ: Наушники, противοшумные каски.</i></p> <p><i>Недостаточная освещенность рабочих мест, проходов и проездов, составляет</i></p> <p style="text-align: center;"><i>– 200 лк разряд IV, подразряд «в»</i></p> <p><i>ГОСТ Р 55710-2013 «Освещение рабочих мест внутри зданий. Нормы и методы измерений»</i></p> <p><i>К опасным факторам при волочении проволоки относятся:</i></p> <p><i>Механические травмы.</i></p> <p><i>ПОТМ-016-2001; РД 153-34,0-03,150-00</i></p> <p><i>«Межотраслевые правила по охране труда при эксплуатации электроустановок»</i></p> <p><i>Защита: плакаты, ограждения, сигнализация</i></p> <p><i>Поражение электрическим током.</i></p> <p><i>ГОСТ 12.1.038 – 82 «ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов»; ПУЭ; Приказ Министерства труда и социальной защиты РФ от 24 июля 2013 г. № 328н «Об утверждении Правил по охране труда при эксплуатации электроустановок»</i></p> <p><i>Защита: экраны, сигнализация, плакаты, ограждения. СИЗ: перчатки, боты, ковры, клещи, штанги.</i></p>
---	--

<p><b>2. Экологическая безопасность:</b> 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>	<p>Волоочильная машина не оказывает негативного воздействия на атмосферу, литосферу и гидросферу. Утилизация волоочильной машины регламентируется ГОСТом 30772-2001 «Отходы производства и потребления, для которых существует возможность повторного использования непосредственно или после дополнительной обработки».</p>
<p><b>3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</b> 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>	<p>Наиболее типичная ЧС для рассматриваемого цеха является пожар (Федеральный закон от 22.07.2013г. №213-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности»). Для обеспечения безопасности приняты меры: - установлена автоматическая пожарная сигнализация и система автоматического пожаротушения; - разработана инструкция по пожарной безопасности для работников; - помещения оснащены первичными средствами пожаротушения; - разработан план эвакуации работников при пожаре; - назначено ответственное лицо при возникновении ЧС</p>
<p><b>4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</b> специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.</p>	<p>ГОСТ 12.2.049-80 ССБТ. Оборудование производственное. Общие эргономические требования. Трудовому кодексу РФ и постановлению Правительства РФ от 20 ноября 2008 года N 870 "Об установлении сокращенной продолжительности рабочего времени, ежегодного дополнительного оплачиваемого отпуска, повышенной оплаты труда работникам, занятым на тяжелых работах, работах с вредными и (или) опасными и иными особыми условиями труд ГОСТ 22613-77. Система «человек-машина». Выключатели и переключатели поворотные. Общие эргономические требования.</p>

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

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	учебная степень, звание	Подпись	Дата
доцент кафедры ЭБЖ	И.С.Король	к.х.н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
3-5Г2Б1	Толкачев Александр Александрович		

## **Введение**

В данном разделе рассматриваются безопасность и экологичность помещения, в котором эксплуатируется электропривод лебедки. Здесь будет рассматриваться обеспечение необходимых условий труда (санитарно-гигиенические условия, защита от негативных производственных факторов, обеспечение пожарной безопасности) в соответствии с действующими нормативными документами, а также вопросы экологической безопасности.

Рассмотрение данных вопросов отвечает требованиям международного стандарта ICCSR-26000:2011 к деятельности организаций в области социальной ответственности по тем разделам его модулей, по которым должны быть приняты указанные проектные решения.

## **4. Производственная безопасность**

### **4.1 Описание технологического процесса и рабочего места**

– Технологический процесс разработки и проверки системы электропривода волочильной машины заключается в следующем:

- Ознакомление и анализ литературы (статьи, диссертации, учебные пособия и монографии) по данной тематике.
- Создание метода разработки регулируемого электропривода волочильной машины
- Компьютерное моделирование системы управления.
- Анализ полученных результатов моделирования.
- Проверка разрабатываемой системы управления на реальном двигателе.
- Анализ полученных результатов проверки.
- Сравнение результатов компьютерного моделирования с результатами, полученными на реальном двигателе.



## **4.2 Анализ вредных производственных факторов и обоснование мероприятий по их устранению**

ГОСТ 12.0.003-74. ССБТ. ОПАСНЫЕ И ВРЕДНЫЕ ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ ФАКТОРЫ.

При волочении проволоки выявлены следующие вредные факторы:

1. Повышенный уровень шума составляет

– 85 Дб

ГОСТ 12.1.003-2014 «Шум. Общие требования безопасности»

СИЗ: Наушники, противοшумные каски.

2. Недостаточная освещенность рабочих мест, проходов и проездов.

ГОСТ Р 55710-2013 «Освещение рабочих мест внутри зданий. Нормы и методы измерений»

### **4.2.1 Шум.**

Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 29 декабря 2014 г. N 2146-ст межгосударственный стандарт ГОСТ 12.1.003-2014 введен в действие в качестве национального стандарта Российской Федерации с 1 ноября 2015 г.

Шум — один из наиболее распространенных неблагоприятных факторов производственной среды. Основные производственные процессы, сопровождающиеся шумом, — это работа станков, насосов, вентиляторов и др. Говоря о действии шума на организм, следует иметь в виду, что он оказывает как местное, так и общее воздействие. При этом учащается пульс, дыхание, повышается артериальное давление, изменяются двигательная и секреторная функции желудка и других органов. Неблагоприятно отражается шум на нервной системе, вызывая головные боли, бессонницу, ослабление внимания, замедление психических реакций, что в конечном счете приводит к понижению работоспособности.

Для защиты от шума по СанПиН 2.2.4/2.1.8.562 – 96 предусматриваются:

- обеспечение персонала индивидуальными средствами защиты по ГОСТ 12.4.011 – 89;
- звукоизолирующие кожухи и экраны;
- виброизолирующие материалы под оборудование (пружины, резины и другие прокладочные материалы).

Допустимые уровни звукового давления в октавных полосах частот, уровни звука и эквивалентные уровни звука и звукового давления на рабочих местах производственных помещений представлены в таблице 4.2.1.1

Таблица 4.2.1.1

Помещения, рабочие места	Уровни звукового давления (дБ) в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц								Уровни звука и эквивалентные уровни звука, дБА
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Помещения для инженерно-технического персонала цехов и служб	79	70	68	58	55	52	50	49	60

#### 4.2.2 Освещение помещений подвижных механизмов

Согласно СНиП 23.05-95 «Естественное и искусственное освещение» необходимы следующие меры:

- Для осветительных установок помещений механизмов перемещения принимается напряжение 380/220 В с глухозаземленной нейтралью. Питание осветительных сетей помещения осуществляется от трансформаторов собственных нужд 6/0,38 кВ, питающих одновременно и силовые токоприемники в этом помещении.
- Размещение осветительной арматуры в цехе зависит от количества параллельных линий. При наличии одной линии светильники располагаются в

два ряда по боковым стенкам. При наличии двух линий осветительная арматура устанавливается в три ряда над проходами.

- Аварийное освещение предусматривается только для проходов между установками и станками, с использованием минимального количества светильников.
- Сеть штепсельных розеток выполняется по всей длине цеха с установкой розеток через 20 - 25 м. Ремонтное освещение осуществляется переносными аккумуляторными фонарями во взрывобезопасном исполнении.
- Высота установки светильников в цехах, как правило, должна быть 2,5 - 3 м.

Характеристика зрительной работы: общее наблюдение за ходом производственного процесса, периодическое при периодическом пребывании людей в помещении. Применяется освещение всей рабочей зоны общим освещением в 75 лк при показателе ослепленности  $P=40$  и коэффициенте пульсации  $K_n=20\%$  (для ламп накаливания); [3]

#### **4.2.3 Анализ опасных факторов.**

Опасный фактор – это воздействие на человека, которое в определенных условиях приводит к травмам или резкому внутреннему ухудшению здоровья.

ГОСТ 12.2.003–91 ССБТ. ОБОРУДОВАНИЕ ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ. ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ.

Опасными производственными факторами при эксплуатации регулируемого электропривода лебедки с к.з. ротором являются :

- опасность электропоражения работающего в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека;
- движущиеся элементы оборудования;
- отлетающих предметов и частей оборудования;

#### 4.2.4 Электробезопасность.

Наибольшую опасность представляет поражение электрическим током, которое может возникнуть в результате замыкания электрической цепи через тело человека, т. е. при прикосновении человека к сети не менее чем в двух точках. ГОСТ 12.1.030-81 . «По электробезопасности»

Электропоражение персонала, работающего с электроустановками, является опасным для жизни человека и наступает при соприкосновении его с сетью не менее чем в двух точках. При разработке коллективных и индивидуальных средств защиты от электропоражения необходимо, согласно правилам устройства электроустановок (ПУЭ), рассмотреть следующие вопросы:

- а) обоснование категории помещения по степени опасности поражения электрическим током;
- б) требования к электрооборудованию;
- в) анализ соответствия реального положения на производстве перечисленным требованиям;
- г) мероприятия по устранению обнаруженных несоответствий;
- д) обоснование мероприятий и средств защиты, работающих от поражения электрическим током.

Также, используются индивидуальные электрозащитные средства. В установках до 1000 В используются диэлектрические перчатки, указатели напряжения, диэлектрические коврики и боты, изолирующие подставки, а также инструмент с изолированными рукоятками.

### **4.3 Защита окружающей среды**

Постановлением Государственного комитета Российской Федерации по стандартизации и метрологии от 28 декабря 2001 г. N 607-ст межгосударственный стандарт ГОСТ 30772-2001 введен в действие в качестве государственного стандарта Российской Федерации с 1 июля 2002 г.

Настоящий стандарт разработан с целью нормативно-методического обеспечения ряда законодательных решений, появившихся в 90-е годы, и реализации современных федеральных и региональных программ по утилизации отходов. Под определенной деятельностью понимается производственная, исследовательская и другая деятельности, в том числе - потребление продукции. Соответственно различают отходы производства и отходы потребления. В качестве мероприятия по утилизации волочильной машины предусматривается повторная переработка на металлолом.

### **4.4 Предотвращение ЧС и устранение их последствий**

ГОСТ Р 22.0.01-94. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Основной причиной пожаров на предприятиях является нарушение технологического режима. Для цеха на основе типовых правил пожарной безопасности для промышленных предприятий была разработана цеховая противопожарная инструкция. Ответственность за соблюдения необходимого противопожарного режима и своевременное выполнение противопожарных мероприятий возлагается на начальника цеха.

Рассматриваемый цех относится к категории В по пожарной опасности помещения производственного и складского назначения.

Для локализации небольших возгораний обслуживающий персонал до прибытия передвижных средств пожаротушения должен использовать первичные средства пожаротушения, находящиеся на пожарных щитах. Первичные средства размещаются вблизи мест наиболее вероятного их применения, на виду, в безопасности при пожаре месте, с обеспечением к ним свободного доступа.

В помещении цеха устанавливается пожарный инвентарь первичных средств пожаротушения:

- углекислотные огнетушители ОУ-2 и ОУ-5;
- пенные огнетушители ОВП-4;
- ящик с песком;
- ведра;
- лопаты и багор.

В цеху установлена система автоматической пожарной безопасности, основанная на датчиках различных видов (дымовые, тепловые, датчики пламени). В случае возникновения пожара, срабатывает система оповещения, подается световой и звуковой сигнал об опасности.

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

В соответствии с постановлением Совета Министров СССР и ВЦСПС от 2 июля 1990 года N 647 "Об увеличении продолжительности отпусков работникам угольной, сланцевой, горнорудной промышленности и отдельных базовых отраслей народного хозяйства" Государственный комитет СССР по труду и социальным вопросам постановляет:

1. Утвердить Список производств, работ, профессий и должностей, работа в которых дает право на дополнительный отпуск за подземные, вредные и тяжелые условия труда работникам промышленно-производственного персонала, занятым на горнодобывающих предприятиях, в объединениях и шахтостроительных, шахтопроходческих, шахтомонтажных организациях металлургической промышленности согласно приложению.

2. Установить, что дополнительный отпуск за вредные и тяжелые условия труда работникам промышленно-производственного персонала, занятым в производствах черной и цветной металлургии, впредь до принятия нового законодательства об отпусках предоставляется по соответствующим разделам Списка произ-

водств, цехов, профессий и должностей с вредными условиями труда, работа в которых дает право на дополнительный отпуск и сокращенный рабочий день, утвержденным постановлением Государственного комитета Совета Министров СССР по вопросам труда и заработной платы и Президиума ВЦСПС от 25 октября 1974 года N 298/П-22 с дополнениями, изменениями и редакционными уточнениями, внесенными постановлениями Государственного комитета Совета Министров СССР по труду и социальным вопросам и Президиума ВЦСПС от 1 ноября 1977 года N 369/П-16 и Государственного комитета СССР по труду и социальным вопросам и Президиума ВЦСПС от 5 ноября 1987 года N 669/П-11 и N 670/П-11. При этом продолжительность дополнительного отпуска устанавливается в пределах до 7, до 14, до 21, до 28, до 42 календарных дней вместо фиксированной продолжительности этого отпуска соответственно 6, 12, 18, 24, 36 рабочих дней, предусмотренной в указанных выше нормативных актах.

Конкретная продолжительность дополнительного отпуска определяется на основе результатов аттестации рабочих мест с учетом фактического состояния условий труда на рабочих местах в соответствии с утвержденными нормами и правилами по охране труда (санитарно-гигиеническими нормами) и утверждается в коллективном договоре (соглашении).

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В разделе безопасность и экологичность проекта произведен анализ опасных и вредных факторов, имеющих место на цехах металлообработки. Проведен анализ причин травматизма, а также определены меры по технической безопасности жизнедеятельности человека, противопожарной безопасности, производственной санитарии, по охране труда и окружающей среды.

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

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
3-5Г2Б1	Толкачев Александр Александрович

<b>Институт</b>	Институт электронного обучения (ИнЭО)	<b>Кафедра</b>	
<b>Уровень образования</b>	Бакалавриат	<b>Направление/специальность</b>	Электроэнергетика и электротехника

<b>Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:</b>	
<i>1. Стоимость ресурсов проектной работы: материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Примерный бюджет проекта 200 тыс.руб.;</li> <li>- В исследовании задействованы 2 человека: руководитель проекта, инженер-разработчик;</li> <li>- Проект выполняется на базе лаборатории ТПУ</li> <li>- Стоимость оборудования (ПК) – 50 тыс. рублей</li> </ul>
<i>2. Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	- Проект выполняется в соответствии с ГОСТ 14.322-83 «Нормирование расхода материалов» и ГОСТ Р 51541-99 «Энергосбережение. Энергетическая эффективность» В соответствии с ГОСТ 14.322-83 «Нормирование расхода материалов» и ГОСТ Р 51541-99 «Энергосбережение. Энергетическая эффективность»
<i>3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	-Отчисления во внебюджетные фонды – 30% от ФОТ

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

<i>1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения проектной работы с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Инициализация проекта и его технико-экономическое обоснование,</li> <li>- Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения</li> <li>-Планирование научно-исследовательских и пуско-наладочных работ</li> <li>- Определение научно-технической эффективности проекта</li> </ul>
<i>2. Планирование и формирование бюджета проектной работы</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Планирование работ по проекту,</li> <li>-Расчет бюджета затрат проекта по внедрению частотного электропривода</li> <li>-Расчет капитальных вложений в основные средства</li> </ul>
<i>3. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования</i>	- Определение ресурсной (ресурсосберегающей) и экономической эффективности исследования



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

1. Оценка технического уровня новшества
2. Смета затрат
3. График Гантта

**Дата выдачи задания для раздела по линейному графику****Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры менеджмента	Фигурко Аркадий Альбертович	к.э.н. доцент		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
3-5Г2Б1	Толкачев Александр Александрович		

## **5. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.**

Целью раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» является определение ресурсной эффективности проекта, разработка механизма управления и сопровождения конкретных проектных решений на этапе реализации.

В данном разделе будут рассмотрены:

- Инициализация проекта и его технико-экономическое обоснование,
- Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения,
- Планирование научно-исследовательских и пуско-наладочных работ,
- Определение научно-технической эффективности проекта,
- Планирование работ по проекту,
- Расчет бюджета затрат проекта по внедрению частотного электропривода,
- Расчет капитальных вложений в основные средства,
- Определение ресурсной (ресурсосберегающей) и экономической эффективности исследования.

Разработка НИР производится группой квалифицированных работников, состоящей из двух человек – руководителя и студента

### **5.1. Инициализация проекта**

В настоящее время оборудование волочильного передела на большинстве метизных предприятий России выработало свой ресурс, находится в изношенном состоянии и требует комплексной реконструкции. Большинство волочильных машин оснащено групповыми электроприводами постоянного тока с последовательным либо параллельным соединением якорей с устаревшими системами регулирования (в большинстве случаев по цепи возбуждения двигателей).

Эксплуатируемые волочильные машины в - это машины с накоплением проволоки (магазинного типа). Подобные машины имеют не только повышенные

энергозатраты, но и неспособны осуществлять высокоскоростные процессы волочения. Исследования технико-экономических показателей различных машин металлургических заводов показали, что коэффициент технического использования волочильных машин составляет менее 0,5.

Основными факторами, снижающими производительность машин являются обрывность проволоки, большие затраты времени на проведение вспомогательных операций (заправку машины, остановку для замены катушек намоточных аппаратов).

Повысить эффективность процесса волочения возможно применением машин с общим для всех вытяжных барабанов редуктором. Однако у эксплуатируемых в настоящее время машин с общим редуктором, также наблюдается высокая обрывность проволоки, из-за чего в некоторых случаях теряется до 44% рабочего времени. Основная причина высокой обрывности – неудовлетворительная система управления электроприводом.

В подавляющем большинстве работ, посвященных автоматизированному электроприводу волочильных машин, разрабатывается, либо совершенствуется групповой электропривод, построенный на базе двигателей постоянного тока с последовательным, либо параллельным соединением якорей. основополагающие труды датированы 60-ми...80-ми годами, прошлого века.

Эксплуатируемые сегодня системы электропривода волочильных машин не удовлетворяют постоянно возрастающим технологическим требованиям.

В связи со сложившейся ситуацией возникла необходимость в современных научно-технических разработках, направленных на создание новых и модернизацию существующих агрегатов для производства проволоки.

Ограничений по срокам выполнения проекта нет, примерный бюджет проекта 200 тыс. руб.

### 5.1.1 Анализ конкурентных технических решений

Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения позволяет провести оценку сравнительной эффективности научной разработки и определить направления для ее будущего повышения.

Целесообразно проводить данный анализ с помощью оценочной карты (см. табл.1).

При разработке электропривода в отдающем устройстве разработчик руководствовался следующими соображениями: стоимость двигателя, затраты на его.

Рассматривалось 2 варианта исполнения электропривода:

1. Преобразователь частоты ПЧ-АД фирмы Simovert 7132 двигатель RA315S4; мощностью 110 кВт, 1466 об/мин
2. Преобразователь частоты ТП-Д фирмы Siemens модель G120, двигатель 4П-355-13-110-У3; мощностью 110 кВт, 1400 об/мин

Таблица 5.1.1.1. Стоимость комплекта

Наименование комплектующих	Вариант исполнения			
	1		2	
	Марка	Стоимость руб.	Марка	Стоимость руб.
Преобразователь Частоты	Simovert 7132	24648	Siemens G120	37907
Двигатель	RA315S4	7045	4П-355-13-110-У3	9863
Коммутационная аппаратура	комплект	15180	Комплект	15180
Сумма за комплект		46909		69995

Производим выбор варианта (комплекта) с использованием метода экспертных оценок. Для проведения оценки выбраны следующие показатели: *технические*—производительность, помехозащищенность, точность, плавность протекания процессов, степень стандартизации и унификации, удобство управления, шум при работе и *экономические* – капитальные вложения, затраты на эксплуатацию, надежность.

По выбранным критериям с помощью экспертов необходимо присвоить коэффициент весомости, отражение их важности.

По каждому критерию необходимо установить оценку степени обеспечения:

Таблица 5.1.1.2. Уровень цели, оценка обеспечения цели

Цели	низкий	средний	Высокий (выше средней)
Уровень цели Оценка обеспечения цели	1.0	0.5	0

Таблица 5.1.1.3 Сравнительная характеристика электроприводов

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы		Примечание
		1	2	
1	2	3	4	4
1. Производительность	1	0	0,5	
2. Помехозащищенность	0,5	0	0,5	
3. Точность	0,5	0	0,5	у 1-го комплекта точность выше, но у 2 комплекта достаточная
4. Плавность протекания процессов	0,5	0	0	
5. Удобство встройки	0,2	0	0,5	дополнительные затраты на модуль связи
6. Степень стандартизации унификации	0,3	0	1	1-й комплект - модуль связи, 2-й двигатель больших размеров
7. Удобство управления	0,5	0	0,5	
8. Шум при работе	0,1	0,5	0,5	Шум у обоих комплектов в пределах нормы
9. Капитальные вложения	1	0	0,5	
10. Затраты на эксплуатацию	0,8	0	0	
11. Надежность	0,8	0	0,5	надежность 2-го комплекта ниже, т.к. модуль связи произведен штучно, а не серийно
<b>Итого</b>		<b>0,05</b>	<b>1,85</b>	

В результате сравнения и оценки критериев выбран первый вариант исполнения, т.к. у него оптимальные технические показатели при выгодной стоимости проекта. Далее расчеты производятся для комплекта оборудования с ПЧ-АД фирмы Simovert 7132

## 5.2 Планирование научно-исследовательских и пуско-наладочных работ

Планирование необходимо для обеспечения оптимального ведения работ, уменьшение затрат, увеличение производительности труда.

### 5.2.1 Планирование научно-исследовательских работ по проекту

Этапы и содержание НИР сведены в таблицу 17.

Трудоемкость характеризуется количеством живого труда, затраченного на изготовление какой либо продукции. Все этапы работы и значения трудоемкости занесены в календарный план-график, таблица 18.

Таблица 5.2.1.1. Этапы и содержание НИР

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
1. Разработка технического задания	1.1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель темы
2. Поиск и подбор технической документации	2.1.	Подбор и изучение технических паспортов, спецификаций по теме проекта	Инженер
3. Расчет параметров, выбор двигателя и ПЧ	3.1.	Расчет мощности двигателя	Инженер
	3.2.	Расчет момента инерции	Инженер
	3.3.	Выбор преобразователя частоты	Инженер
	3.4.	Расчет параметров элементов структурной схемы силового канала. Оптимизация контуров	Инженер
	3.5.	Разработка электрической схемы привода.	Инженер
	3.6.	Анализ результатов	Руководитель, инженер
3. Моделирование работы привода	4.1.	Разработка программы исследований модели	Руководитель, инженер
	4.2.	Создание имитационной модели в среде Simulink программы Matlab	Инженер
	4.3.	Исследование нелинейной САУ СЭП асинхронного привода с векторным управлением	Инженер
	4.4.	Исследование нелинейной САУ СЭП в заданных режимах работы	Инженер
	4.5.	Исследование двухмассовой системы САУ СЭП	Инженер
4. Обобщение и оценка результатов, сдача проекта	5.1	Оценка результатов. Определение целесообразности проведения ОКР	Руководитель, инженер

Таблица 5.2.1.2. Календарный план-график НИР

Этап	Название	Исполнитель	t-емкость, дней		Апрель														Май																				
			рабочие	календарные	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель	1	1																																			
		Инженер																																					
2	Подбор и изучение материалов по теме	Руководитель																																					
		Инженер	4	5																																			
3	Расчет параметров, выбор двигателя и ПЧ	Руководитель	1	1																																			
		Инженер	9	13																																			
4	Моделирование работы привода	Руководитель	1	1																																			
		Инженер	6	12																																			
5	Обобщение и оценка результатов	Руководитель	3	3																																			
		Инженер	3	3																																			

### 5.2.2 Планирование пуско-наладочных работ

Пуско-наладочные работы являются завершающим звеном производства линии, обеспечивающие ввод в эксплуатацию объект. Ниже рассмотрены основные этапы проведения ПНР на линии. Работы выполняются высококвалифицированными специалистами и рабочими по заранее разработанным и согласованным программам. Электротехнические ПНР, согласно [1], должны обеспечивать проверку и испытание электрооборудования в соответствии с действующими правилами устройства электроустановок, технической документацией предприятия-изготовителя оборудования и другими нормативными документами, а также получение заданных проектом электромеханических параметров работы оборудования.

Результат проверок, снятие характеристик аппаратуры, испытания и других работ, входящих в комплекс наладки электроустановок, оформляются в виде протоколов установленной формы, которые прикладываются к акту сдачи объекта в эксплуатацию.

Проведению ПНР в короткие сроки и с высоким качеством в значительной степени способствуют подготовительные мероприятия:

- заблаговременное ознакомление с проектом электроустановки, выявление неточностей, пробелов и других дефектов проекта;
- выявление и подсчёт объёма ПНР, определение необходимого количества наладочного персонала;
- подготовка комплектов наладочной аппаратуры и инструмента;
- составление рабочего графика проведения ПНР и согласование его с монтажной организацией и заказчиком;
- внешний осмотр электрооборудования и установка количества электро-монтажных работ;
- определения технических характеристик электрооборудования;
- составление рабочей программы испытаний и наладки электрооборудования с учётом особенностей настраиваемого объекта.



Для того чтобы качественно и в короткие сроки произвести наладку электрооборудования и электрических схем, необходимо хорошее знание данного оборудования, проектные схемы и расчёты электрических параметров. Поэтому наладочный персонал комплектуется из опытных и квалифицированных специалистов.

Цены на проведение ПНР определены, исходя из сложности серийно выпускаемых, освоенных промышленностью электрических устройств, в соответствии с требованиями 3 части СНиП "Организация, производство и приём работ" и технических условий на изготовление и поставку электротехнических устройств.

При составлении смет или расчёте на выполнение работ, когда договором предусматривается промежуточная оплата, следует руководствоваться структурой ПНР, приведённой в таблице 19.

Таблица 5.2.2.1 Структура ПНР

№	Состав работы	Стоимость ПНР (%) от общей сметной стоимости
1	Подготовительные работы	10
2	Наладочные работы, проводимые до индивидуальных испытаний технологического оборудования	40
3	Наладочные работы в период индивидуальных испытаний технологического оборудования	30
4	Комплексное опробование	15
5	Оформление отчётной и приемно-сдаточной документации	5

Ценами учтены затраты на следующие работы:

1. Подготовительные работы - организаторскую и инженерную подготовку работ; изучение электротехнической части проекта и ознакомление с технической документацией; получение от заказчика согласованных установок

устройств защиты и автоматики; подготовку парка приборов, а также программ наладки и комплекта протоколов.

2. Внешний осмотр электрооборудования на соответствие проекту; проверку и настройку отдельных элементов и функциональных групп; сборку испытательных схем; проверку параметров и снятие характеристик отдельных устройств; измерение сопротивления изоляции; проверку соединения обмоток; регулировку релейной аппаратуры.

3. Наладку электрооборудования под напряжением, включая силовые цепи; снятие и получение необходимых характеристик, сопоставление их с расчётными данными проекта; испытание и наладку оборудования вхолостую и под нагрузкой совместно с технологическим оборудованием.

4. Обеспечение взаимных связей устройств в составе электроустановки и механизмов в составе агрегата; согласование входных и выходных параметров и характеристик отдельных механизмов в составе агрегата; обеспечение на агрегатах электрических и электромеханических параметров и режимов, предусмотренных проектом.

Составление в одном экземпляре протоколов ПНР и испытаний; внесение в протокол схем, которые были изменены в процессе работы.

Таблица 5.2.2.2. Этапы и содержание ПНР

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
<b>1. Подготовительный этап</b>	1.1.	Ознакомление с проектом, выявление неточностей. Составление рабочего графика проведения ПНР.	Руководитель, представитель заказчика, бригада наладчиков
	1.2.	Подготовка аппаратуры и инструмента;	Бригада наладчиков
	1.3.	Внешний осмотр электрооборудования и проверка готовности;	Бригада наладчиков
	1.4.	Определение соответствия техническим характеристикам;	Бригада наладчиков
	1.5.	Составление рабочей программы испытаний и наладки с учетом особенностей объекта.	Бригада наладчиков

Таблица 5.2.2.2. . Продолжение

<b>2. Проверочные работы</b>	2.1.	Проверка количества электромонтажных работ и их соответствие к рабочим чертежам проекта	Бригада наладчиков
	2.2.	Проверка установленной аппаратуры, градуировка и снятие в необходимых случаях характеристик	Бригада наладчиков
	2.3.	Проверка правильности выполнения схем	Бригада наладчиков
	2.4.	Проверка работы электрических систем, блокировок и автоматики.	Бригада наладчиков
<b>3. Наладочные работы</b>	3.1.	Ввод параметров двигателя в преобразователь частоты, проверка работы системы;	Бригада наладчиков
	3.2.	Проверка работы и функционирования блоков сигнализации и защиты	Бригада наладчиков
	3.3.	Ввод параметров системы в преобразователь частоты	Бригада наладчиков
	3.4.	Проверка диапазона изменения напряжения преобразователя, настройка устройства задания скорости	Бригада наладчиков
	3.5.	Итоговая проверка защиты	Бригада наладчиков
	3.6.	Настройка и снятие необходимых характеристик элементов автоматического управления в соответствии с требованиями технологического процесса, испытание оборудования в холостую	Бригада наладчиков
<b>4. Комплексное опробование</b>	4.1.	Обеспечение взаимных связей устройств в составе электрической установки;	Бригада наладчиков
	4.2.	Согласование входных и выходных параметров на входе и выходе характеристик отдельных механизмов	Бригада наладчиков
	4.3.	Проверка режимов работы системы при управлении с пульта управления	Бригада наладчиков
<b>5. Оформление документации</b>	5.1.	Составление протоколов ПНР	Бригада наладчиков
	5.2.	Приемка линии. Внесение в один экземпляр принципиальных схем проекта и изменений, внесенных во время ПНР	Руководитель, представитель заказчика, бригада наладчиков

### 5.2.3 Состав бригады для проведения ПНР

Число членов бригады и распределение объёмов ПНР между членами бригады зависит от профессиональной подготовки наладчиков и их практического опыта, а также диктуется рядом требований к ПНР:

1. Работы характеризуются узкой специализацией, сложностью.
2. По правилам и нормам эксплуатации и настройки электрооборудования напряжением до 1000 В запрещаются работы на оборудовании, находящемся под напряжением, менее чем двум членам бригады.

Распределение объёма работ между членами выполняет бригадир, как опытный специалист, знающий каждого члена бригады. Продолжительность выполнения любой операции на каждом этапе зависит от технической сложности. Состав бригады, выполняющей ПНР приведён в таблице 21.

Таблица 5.2.3.1 Состав бригады, выполняющей ПНР

	Состав бригады	Категория
1	Инженер-наладчик (бригадир)	I
2	Инженер-наладчик	II
3	Инженер-наладчик	III

С бригадой наладчиков, производящих ПНР, заключено трудовое соглашение, в котором оговорён срок поведения работ и сумма, на которые заключается соглашение. Срок проведения ПНР составляет 15 рабочих дня продолжительностью 8 часов.

Распределение объёма и времени выполнения ПНР по этапам отражено в таблице 5.2.3.1.

Таблица 5.2.3.2. Распределение времени выполнения ПНР

№	Члены бригады	Время выполнения работ по этапам, рабочие дни				
		1	2	3	4	5
1	Инженер-наладчик (бригадир)	1	4	3	2	1
2	Инженер-наладчик	1	4	3	2	1
3	Инженер-наладчик	1	4	3	2	1

По таблице 5.2.3.1, согласно, строим календарный график, на июнь месяц 2017 года, проведения ПНР (таблица 5.2.3.2.).

Таблица 5.2.3.3. График загрузки персонала при выполнении ПНР

Этап	Исполнитель	t-емкость, дни		Выполнение ПНР по дням																																	
		Рабочие	Календ-е	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30				
1 – ый	Инженер – наладчик I (бригадир)	1	1	—																																	
	Инженер – наладчик II	1	1	—																																	
	Инженер – наладчик III	1	1	—																																	
2 – ой	Инженер – наладчик I (бригадир)	4	6		—	—	—	—	—	—																											
	Инженер – наладчик II	4	6		—	—	—	—	—	—																											
	Инженер – наладчик III	4	6		—	—	—	—	—	—																											
3 – ий	Инженер – наладчик I (бригадир)	3	5								—	—	—	—	—																						
	Инженер – наладчик II	3	5								—	—	—	—	—																						
	Инженер – наладчик III	3	5								—	—	—	—	—																						
4 – ый	Инженер – наладчик I (бригадир)	2	2														—	—	—																		
	Инженер – наладчик II	2	2														—	—	—																		
	Инженер – наладчик III	2	2														—	—	—																		
5 – ый	Инженер – наладчик I (бригадир)	1	1																																		
	Инженер – наладчик II	1	1																																		
	Инженер – наладчик III	1	1																																		

## 5.3 Расчет бюджета проекта по внедрению частотного электропривода

### 5.3.1 Смета затрат на НИР

Расчет сметы затрат на выполнение проекта выполняем согласно метода сметных калькуляций по отдельным статьям расходов, всех видов необходимых ресурсов.

Таблица 5.3.1.1 – Смета затрат на НИР

Статьи расхода	сумма	Примечания
	руб.	
1. Материалы, покупные п/ф и комплектующие изделия	50000	ПК для проектирования
2. Специальное оборудование	-	Стенды, приборы, установки, программы
3. Основная заработная плата научно-производственного персонала	43357	Трудоемкость нормо-д, Стоимость 1-го нормо-д.
4. Дополнительная заработная плата научно-производственного персонала	4335,7	10% от ст.3
5. Отчисления на внебюджетные фонды	14307,9	30%( ст.3+ст.4)
6. Расходы на научные и производственные командировки	3338,5	7% от(ст.3+ст.4)
7. Расходы и услуги сторонних организаций	55000	Доставка оборудования
8. Накладные расходы	8671,4	20% от ст.3
9. Плановая прибыль	6360,4	7% от (ст.3+4+5+8)
10. Годовая сметная стоимость проекта	<b>135370,9</b>	

### 5.3.2 Смета затрат на ПНР

Таблица 5.3.2.1. Дополнительные затраты по заработной плате

№	Наименование статей	Плановые (руб.)	Примечание
1	Стоимость работ	19156,31	
2	Районный коэффициент	5746,89	30% от п. 1
3	Коэффициент, действующий при проведении ПНР в зоне работы действующего оборудования	1915,63	10% от п. 1
4	Коэффициент, учитывающий работы на установке, находящейся под напряжением	5746,89	30% от п. 1
5	Основная заработная плата, включая доплаты	32565,72	п.1+п.2+п.3+п.4
6	Дополнительна заработная плата	3256,57	10%отп.5
7	Итого	35882,29	п.5+п.6

Затраты предприятия на проведение пуско-наладочных работ приведены в таблице 26.

Таблица 5.3.2.2. Общая стоимость затрат на проведение ПНР

№	Наименование статей	Плановые (руб.)	Примечание
1	Заработная плата	35882,29	
2	Отчисления в внебюджетные Фонды	10746,69	30%от п.1
3	Накладные расходы	5741,17	16% от п.1
4	Себестоимость работ	52370,15	п.1+ п.2+п.3
5	Прибыль	4189,61	8% от п.4

Таблица 5.3.2.2.. Продолжение

№	Наименование статей	Плановые (руб.)	Примечание
6	Цена ПНР	56559,76	п.4+п.5
7	НДС	10180,76	18% от п.6
8	Итого	66740,52	п.6 + п.7

### 5.3.3 Расчет расходов при эксплуатации электропривода (стоимости силовой электроэнергии)

Эксплуатационные расходы включают следующие статьи затрат:

- Заработная плата обслуживающего персонала
- Амортизационные отчисления
- Затраты на ремонт
- Расходы на материалы, связанные с эксплуатацией

### 5.3.4 Расчет амортизационных отчислений

Годовые амортизационные отчисления рассчитываются на основе норм амортизации, и мы выбираем линейную схему амортизации:

$$A_{год} = K \cdot \frac{H_A}{100} = 7045 \cdot \frac{9,6}{100} + 24648 \cdot \frac{3,5}{100} = 1539 \text{ руб}$$

где  $K$  – капитальные вложения в электрооборудование;

$H_A$  – проценты отчислений на амортизацию

- Электродвигатели – 9.6%
- Преобразователи, выключатели, трансформаторы и т.д. – 3.5%



### 5.3.5 Зарботная плата обслуживающего персонала

Обслуживание частотного электропривода, двигателя и редуктора входит в обязанности оперативно-ремонтного персонала ремонтной службы предприятия.

При выполнении работы наладчик автоматических линий имеет повременную оплату труда. Оплата труда включает в себя основную и дополнительную заработную плату. К основной относится оплата, начисленная за проработанное время на предприятии и различные доплаты (сверхурочная работа, работа в выходные дни, региональные надбавки, премии, районный коэффициент).

Оклад наладчика автоматических линий по присвоенному 6 разряду: 9100 руб.

Дневная заработная плата:

$$Z_{\text{НАЛ}} = \frac{(1,3 \cdot Z_{\text{T}} + \text{Надб}) \cdot P_{\text{К}}}{F_{\text{Д}}},$$

где  $Z_{\text{T}}$  – оклад в месяц;

$\text{Надб} = 3000 \text{руб}$  надбавка за сложность;

1,4 – доплата за должность;

$P_{\text{К}} = 1,3$  – коэффициент, учитывающий районное регулирование;

$F_{\text{Д}} = 22$  количество рабочих дней в месяц.

Рассчитаем основную зарплату:

$$Z_{\text{НАЛ}} = \frac{(1,4 \cdot 1,3 \cdot 9100 + 3000) \cdot 1,3}{22} = 876,32 \text{ руб/дн}$$

Основная заработная плата за период работы:

$$Z_{\text{ОСН}} = Z \cdot \tau_{\text{Р}};$$

где  $\tau_{\text{Р}}$  – период рабочего времени:

$\tau_{\text{Р}} = 247$  – период рабочего времени – 1 год (в 2017 году 247 рабочих дней);

Рассчитаем основную заработную плату за год:

$$Z_{\text{ОСН}} = Z_{\text{НАЛ}} \cdot \tau_{\text{Р}} = 876,32 \cdot 247 = 216\,450,60 \text{ (руб)};$$

Дополнительная заработная плата – это выплаты за неотработанное время (оплата отпусков и т. д.).

Дополнительная заработная плата рассчитывается:

$$Z_{\text{доп}} = 0.15 \cdot Z_{\text{осн}};$$

Рассчитаем дополнительную зарплату:

$$Z_{\text{доп}} = 0,15 \cdot Z_{\text{осн}} = 0,15 \cdot 216450,60 = 32\,467,59 \text{ (руб)};$$

Суммарная зарплата:

$$Z_{\Sigma} = Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}} = 216\,450,60 + 32\,467,59 = 249\,918,18 \text{ (руб)}.$$

Расчет затрат на оплату труда сведем в таблицу 27

Таблица 5.3.5.1 Затраты на оплату труда

Вид затрат	Исполнитель
Основная з/пл, руб.	216 450,60
Дополнительная з/пл, руб.	32 467,59
Итого	249 918,18

Отчисления на внебюджетные фонды

Внебюджетные фонды на сегодняшний день по существующему законодательству составляет 30 %:

$$\text{Внебюджетные фонды} = 30\% \cdot Z_{\Sigma} = 0,30 \cdot 249\,918,18 = 74\,675,46 \text{ (руб)};$$

Обязанности по обслуживанию линии ЛКОР-125 занимают 10% рабочего времени наладчика. Зарплата обслуживающему персоналу в год составит:

$$Z_{\text{ПЕР}} = 249\,918,18 \cdot 0,1 = 24\,991,82 \text{ (руб/год)}.$$

### 5.3.6 Общая сумма эксплуатационных расходов

Общая сумма эксплуатационных расходов складывается из затраты на силовую энергию  $C_{\Sigma}$ , годовых амортизационных отчислений  $A_{\text{год}}$  и зарплаты обслуживающего персонала  $Z_{\text{ПЕР}}$ .

$$P_{\Sigma} = C_{\Sigma} + A_{\text{год}} + Z_{\text{ПЕР}} = 19\,519 + 1539 + 24\,991,82 = 46\,049,82 \text{ (руб/год)}$$

При расчетах общих затрат на эксплуатацию расходы на электроэнергию составили 19519 (руб/год), заработная плата обслуживающего персонала 24991 (руб/год), амортизационные отчисления 1539 (руб/год). Общая сумма эксплуатационных расходов составила 46049,82 (руб/год).

#### **5.4. Определение ресурсной (ресурсосберегающей) и экономической эффективности исследования**

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

##### **5.4.1. Интегральный финансовый показатель**

Определяется как:

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i} = \frac{\Phi_{\text{р.}i}}{\Phi_{\text{max}}}$$

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

$\Phi_{\text{р}i}$  – стоимость  $i$ -го варианта исполнения включая ПНР (таблица 1);

$\Phi_{\text{р}1} = 46909 + 66740 = 113649$  руб (с использованием ПЧ фирмы Исп.1

Simovert 7132)

$\Phi_{\text{р}2} = \Phi_{\text{max}} = 60132 + 66740 = 126872$  руб (с использованием ПЧ фирмы Siemens G120)

$\Phi_{\text{max}}$  – максимальная стоимость всего проекта

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}1} = \frac{\Phi_{\text{р}1}}{\Phi_{\text{ПНР}}} = \frac{113649}{126872} = 0,89$$

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}2} = \frac{\Phi_{\text{р}2}}{\Phi_{\text{ПНР}}} = \frac{119131}{126872} = 0.94$$

Полученная величина интегрального финансового показателя разработки отражает соответствующее численное удешевление стоимости разработки в размах.

#### 5.4.2. Интегральный показатель ресурсоэффективности

Определяется следующим образом:

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

где  $I_{pi}$  – интегральный показатель ресурсоэффективности для  $i$ -го варианта исполнения разработки;

$a_i$  – весовой коэффициент  $i$ -го варианта исполнения разработки;

$b_i^a, b_i^p$  – бальная оценка  $i$ -го варианта исполнения разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания;

$n$  – число параметров сравнения.

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности рекомендуется проводить в форме таблицы (табл. 28).

Таблица 5.4.2.1 Сравнительная оценка вариантов исполнения

Объект исследования Критерии	Весовой коэффициент параметра	Исп.1 Simovert 7132	Исп.2 Siemens G120
1. Способствует росту производительности труда пользователя	0,1	5	5
2. Удобство в эксплуатации (соответствует требованиям потребителей)	0,1	5	3
3. Помехоустойчивость	0,15	4	3
4. Энергосбережение	0,25	5	5
5. Надежность	0,25	5	4
6. Материалоемкость	0,15	5	5
ИТОГО	1	4,85	4,15

$$I_{p-ucn1} = 5 \cdot 0,1 + 3 \cdot 0,1 + 3 \cdot 0,15 + 5 \cdot 0,25 + 4 \cdot 0,25 + 5 \cdot 0,15 = 4,25;$$

$$I_{p-ucn2} = 5 \cdot 0,1 + 5 \cdot 0,1 + 4 \cdot 0,15 + 5 \cdot 0,25 + 5 \cdot 0,25 + 5 \cdot 0,15 = 4,85;$$

### 5.4.3 Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки

( $I_{испi}$ ) определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

$$I_{исп1} = \frac{I_{р-исп2}}{I_{финр}^{исп2}} = \frac{4.25}{0.94} = 4.52$$

$$I_{исп2} = \frac{I_{р-исп1}}{I_{финр}^{исп1}} = \frac{4.85}{0.89} = 5.45$$

Сравнение интегрального показателя эффективности вариантов исполнения разработки позволит определить сравнительную эффективность проекта (см. табл. 29) и выбрать наиболее целесообразный вариант из предложенных. Сравнительная эффективность проекта ( $\mathcal{E}_{ср}$ ):

$$\mathcal{E}_{ср} = \frac{I_{исп2}}{I_{исп1}} = \frac{4,52}{5,45} = 0.83$$

$$\mathcal{E}_{ср} = \frac{I_{исп1}}{I_{исп1}} = \frac{5,45}{5,45} = 1$$

Таблица 5.4.3.1 Сравнительная эффективность разработки

№ п/п	Показатели	Исп.1 Simovort 7132	Исп.2 Siemens G120
1	Интегральный финансовый показатель разработки	0,89	0,94
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4,85	4,25
3	Интегральный показатель эффективности	5,45	4,52
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1	0,83

Сравнение значений с позиции финансовой и ресурсной эффективности указывает на первый вариант исполнения, как наиболее эффективный.

### **Заключение:**

1. В результате сравнения и оценки критериев комплектов электроприводов выбран преобразователь частоты фирмы Simovert 7132, двигатель RA315S4 мощностью 110 кВт, 1466 об/мин, т.к. у данного комплекта оптимальные технические показатели при выгодной стоимости проекта.
2. Были составлены графики проведения ПНР, определено количество работников, рассчитаны затраты. На проведение пуско-наладочных работ бюджет составил 66740 рублей, на приобретение оборудования 46909 рублей. Работы были проведены за 15 рабочих дня бригадой из трех человек.
3. На основе расчета интегрального показателя эффективности научного исследования, а также по итогам сравнения финансовой и ресурсной эффективности наиболее эффективным получается первый комплект электропривода с использованием ПЧ фирмы Simovert 7132.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведенных в диссертационной работе теоретических исследований, направленных на обеспечение качественной работы системы бездатчикового векторного управления электроприводом волочильной машины, можно сделать следующие выводы:

1. Для изготовления проволоки среднего диаметра (1,8...3,0 мм) наиболее перспективными являются волочильные машины с общим для всех вытяжных барабанов редуктором, имеющие возможность значительного повышения эффективности процесса волочения за счет оптимизации энергосиловых параметров и повышения скорости процесса волочения. Повысить эффективность процесса волочения возможно за счет модернизации существующих систем электроприводов, что приведет к существенному повышению к.п.д. процесса волочения в целом.

– В отношении энергоэффективности: за счет замены двигателя постоянного тока на асинхронный двигатель переменного тока.

– В отношении повышения скорости волочения: за счет использования более современной системы управления электроприводом.

Доказано, что электропривод по системе ПЧ-АД экономически выгоден для использования в качестве главного электропривода волочильной машины.

2. Разработана математическая модель асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором как объекта управления. Разработана система бездатчикового векторного управления асинхронным двигателем, проведен анализ возможности косвенного изменения переменных состояний труднодоступных для прямого измерения. Выбран неадаптивный наблюдатель переменных состояний для системы бездатчикового векторного управления асинхронным двигателем.

3. Анализ режимов работы электропривода волочильной машины на математической модели подтвердил, что разработанный принцип управления электроприводом, а также предложенные настройки контуров регулирования обеспечивают регулирование скорости волочения с погрешностью не превы-

шающей пять процентов. Таким образом, обеспечиваются требования технологического процесса, во всех режимах. Доказана возможность использования неадаптивного наблюдателя состояния переменных недоступных для прямого измерения в системе векторного управления электроприводом волочильной машины.



## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам [Электронный ресурс]. Систем. требования Adobe Acrobat Reader. – URL: [http://www1.fips.ru/wps/wcm/connect/content\\_ru/ru](http://www1.fips.ru/wps/wcm/connect/content_ru/ru) (дата обращения: 01.12.2010).
2. Служба по патентам и торговым маркам Соединенных штатов Америки [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.uspto.gov/> (дата обращения: 01.12.2010).
3. Производство стальной проволоки: Монография / Х.Н. Белалов, Б.А. Никифоров, Г.С. Гун и др. – Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2006. – 543 с.
4. Туганбаев И.Т. Автоматизированный электропривод волочильного оборудования: Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. –М.: Алматы, 1997. – 350с
5. Ганнель В.Я. Электропривод волочильных станов и канатных машин. – М.: Металлургиздат, 1962. – 176 с.
6. Состояния и перспективы развития электроприводов и систем управления высокоскоростными волочильными станами /Н.Н. Дружинин, И.К. Азимов и др. //Сб. «Автоматизированный электропривод в промышленности», труды 6 всесоюзной конференции по автоматизированному электроприводу – М.:Энергия, 1974. – с. 216-221.
7. Пустильников В.М. Система автоматического управления прямоточными волочильными станами // Изв. АН КазССР, сер.физ-мат№4, - Алма-Ата, 1966. – С.78-92.
8. Диарбаев А.М., Тугубаев И.Т., Мунсузбаев Т.М. Математический анализ электромеханической системы прямоточного стана. – Алма-Ата, 1987. – Деп. в ВИНТИ, 15с.
9. Беспалов Б.В., Рябин А.И. Совершенствование систем регулирования волочильными станами // Сталь. №10, 1982. С. 54-56.

10. Вайсбург Р.А., Залазинский А.Г., Битков В.В. Оптимальное управление процессом многократного волочения / Изв. вузов, цветн. металлургия. №4, 1997. – С. 56-60.
11. Чернышев А. Ю., рисунок Чернышев И. А. Расчет двигателя характеристики электроприводов тяговое переменного тока. Часть 1. Асинхронный малых двигатель. Учебное модель пособие./Томский политехнический допустимом университет. – Томск: результате Издательство ТПУ, 2005.–136 с.
12. Чернышев нагрузке А.Ю., Кояин Н.В. Проектирование выбранных электрических приводов: компенсацией Учебно-методическое пособие. – Томск: построим Изд-во ТПУ, 2005. – 120 с.
13. Дементьев отмечены Ю.Н., Чернышев рассчитаем А.Ю., Чернышев igbt И.А. Электрический электропривод привод: учебное фазное пособие. – Томск: пусковой Изд-во ТПУ, 2008. – 244 с.
14. Мальцева увеличении О.П., Удут Л.С., Кояин Н.В. Системы набросе управления асинхронных регулируемых частотно-регулируемых электроприводов. – Томск: обозначены Изд. ТПУ, 2011. – 476с.
15. Удут Л. С., двигательного Мальцева О.П., Кояин Н.В. Проектирование числу и исследование электроприводов. Часть 4. – тиристорные преобразователи паспортные для электроприводов тяговое постоянного тока: скольжения Учебное пособие. – Томск: естественная Изд. ТПУ, 2002. – 152 с.
16. Удут Л.С., существует Мальцева О.П., Кояин Н.В. Проектирование частичной и исследование электроприводов. Часть 8. – Асинхронный быть частотно-регулируемый электропривод: Учебное пусковой пособие. – Томск: сигналы Изд. ТПУ, 2010. – 448 с.
17. Долин П.А. Справочник по технике безопасности. – 6е изд., переработанное и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 824 с.
18. ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. «Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов»

19. ГОСТ Р 50571.3-94 “Электроустановки зданий. Часть 4. Требования по обеспечению безопасности. Защиты от поражения электрическим током.”
20. ГОСТ 21753-76. Система «человек-машина». Рычаги управления. Общие эргономические требования.
21. Приказ Министерства труда и социальной защиты РФ от 24 июля 2013 г. № 328 н «Об утверждении Правил по охране труда при эксплуатации электроустановок»
22. ГОСТ 12.1.003-83 ССБТ. «Шум. Общие требования безопасности»
23. СП 52.13330.2011 «Естественное и искусственное освещение»
24. ГОСТ Р 22.3.03-94. «Безопасность в ЧС. Защита населения. Основные положения»
25. О.Б. Назаренко, А.Г. Дашковский. Безопасность жизнедеятельности. Расчёт искусственного освещения. Методические указания к выполнению индивидуальных заданий для студентов дневного и заочного обучения всех специальностей. – Томск: Изд. ТПУ, 2001
26. Борисова Л.М., Гершанович Е.А. Экономика энергетики: учебное пособие. – Томск: Изд. ТПУ, 2006.