

Школа ИШЭ

Направление подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

Отделение школы (НОЦ) электроэнергетики и электротехники

### БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
Электропривод литцекрытильной машины

УДК 62-83:679.7.053

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5А6К	Ефименко Ростислав Сергеевич		

Руководитель ВКР

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

### КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Подопригора И. В.	к.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Мезенцева И. Л.			

### ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
13.03.02 Электроэнергетика и электротехника	Тютева П. В.	к.т.н.		

Томск – 2020 г.  
 Результаты обучения по направлению  
 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

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

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

Школа ИШЭ  
 Направление подготовки (специальность) 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника  
 Отделение школы (НОЦ) электроэнергетики и электротехники

УТВЕРЖДАЮ:  
 Руководитель ООП  
Тюева П.В.  
 (Подпись)    (Дата)    (Ф.И.О.)

**ЗАДАНИЕ  
на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

бакалаврской работы
---------------------

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

Студенту:

Группа	ФИО
5А6К	Ефименко Ростиславу Сергеевичу

Тема работы:

Электропривод литцекрытильной машины	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	59-78/с 28.02.2020

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<p><b>Исходные данные к работе</b></p> <p><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>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Электропривод литцекрытильной машины;</li> <li>- Режим работы – продолжительный;</li> <li>- Обеспечение регулирования скорости.</li> </ul>
---	---

<p><b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b></p> <p><i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Изучить технологический процесс;</li> <li>- Выбрать преобразователь частоты и двигатель;</li> <li>- Рассчитать статические характеристики электродвигателей;</li> <li>- Разработать имитационную модель электропривода;</li> <li>- Исследовать изменение скорости вращения.</li> </ul>
--	---

<p><b>Перечень графического материала</b></p> <p><i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	
--	--

**Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы**  
*(с указанием разделов)*

Раздел	Консультант
<b>Социальная ответственность</b>	Мезенцева Ирина Леонидовна
<b>Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение</b>	Подопригора Игнат Валерьевич

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

Все разделы выпускной квалификационной работы написаны на русском языке.

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

**Задание выдал руководитель:**

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

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5А6К	Ефименко Ростислав Сергеевич		

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

Студенту:

Группа	ФИО
5А6К	Ефименко Ростислав Сергеевич

Школа	ИШЭ	Отделение школы (НОЦ)	Электроэнергетики и Электротехники
Уровень образования	Бакалавр	Направление/специальность	13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»

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

<i>1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	Стоимость материальных ресурсов определялась по средней стоимости по г. Томску Оклады в соответствии с окладами сотрудников НИ ТПУ
<i>2. Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	30 % премии; 20 % надбавки; 16% накладные расходы; 30% районный коэффициент.
<i>3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	27,1% отчисления на социальные нужды

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

<i>1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения</i>	Анализ конкурентных технических решений. Оценки перспективности проекта по технологии QuaD.
<i>2. Планирование и формирование бюджета научных исследований</i>	Формирование плана и графика разработки: -определение структуры работ; -определение трудоемкости работ; -разработка графика Ганта. Формирование бюджета затрат на научное исследование: -материальные затраты; -заработная плата (основная и дополнительная); -отчисления на социальные цели; -амортизация; -накладные расходы.
<i>3. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования</i>	

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

1. Оценка конкурентоспособности технических решений
2. Матрица SWOT
3. Альтернативы проведения НИ
4. График проведения и бюджет НИ
5. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НИ

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

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Подопригора И.В.	К.Э.Н		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5А6К	Ефименко Ростислав Сергеевич		

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
5А6К	Ефименко Ростислав Сергеевич

<b>Школа</b>	<b>ИШЭ</b>	<b>Отделение (НОЦ)</b>	<b>Электроэнергетики и Электротехники</b>
<b>Уровень образования</b>	Бакалавриат	<b>Направление/специальность</b>	13.03.02 «Электроэнергети ка и электротехника»

Тема ВКР:

<b>Электропривод литцекрытальной машины</b>	
<b>Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:</b>	
1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	<i>Объект исследования: разработка имитационной модели системы преобразователь частоты- асинхронный двигатель Область применения: литцекрытальные машины</i>
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
<b>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>– специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства;</li> <li>– организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 27.12.2018)</li> <li>- ГОСТ 12.4.011-89 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Средства защиты работающих. Общие требования и классификация</li> <li>- ПНД Ф 12.13.1-03. Методические рекомендации. Техника безопасности при работе в аналитических лабораториях (общие положения).</li> <li>- СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы.</li> </ul>
<b>2. Производственная безопасность:</b> 2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов 2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия	Вредные факторы: - Недостаточная освещенность рабочей зоны. - Отклонение показателей микроклимата. - Повышение уровня вибрации. - Повышение уровня шума. Опасные факторы: - Поражение электрическим током.
<b>3. Экологическая безопасность:</b>	Способы борьбы с сбросами и выбросами в окружающую среду
<b>4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</b>	Возможные ЧС: наводнение, ураган, пожар. Наиболее типичная ЧС: пожар.

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

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ООД	Мезенцева И.Л.			

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5А6К	Ефименко Ростислав Сергеевич		

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

Школа ИШЭ  
 Направление подготовки (специальность) 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника  
 Уровень образования бакалавр  
 Отделение школы (НОЦ) электроэнергетики и электротехники  
 Период выполнения (осенний / весенний семестр 2019 /2020 учебного года)

Форма представления работы:

Бакалаврская работа

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

### КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы:

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
	Литературный обзор	
	Выбор оборудования электропривода литцекрытальной машины	
	Расчет статических характеристик электропривода	
	Разработка и исследование систем электропривода со скалярным управлением	
	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	
	Социальная ответственность	
	Оформление работы	
	Итог	

**СОСТАВИЛ:**

**Руководитель ВКР**

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

**СОГЛАСОВАНО:**

**Руководитель ООП**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Тютеева П. В.	к.т.н.		

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа содержит 135 с., 49 рисунков, 21 таблицу, источников.

Объектом исследования является асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором и преобразователем частоты.

Цель работы – рассмотрение законов регулирования скорости, системы преобразователь частоты – асинхронный двигатель для построения имитационной модели во вращающейся системе координат с целью возможной реализации в системе регулируемого электропривода литцекрытальной машины.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, литцекрытальная машина, крытальная машина, преобразователь частоты, регулирование скорости, скалярное управление, механические характеристики, электромеханические характеристики.

В работе произведены исследования электропривода переменного тока литцекрытальной машины.

Выпускная квалификационная работа оформлена в текстовом редакторе Microsoft Word 2010. Схемы и рисунки обработаны в Microsoft Visio 2011

## **ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ, СОКРАЩЕНИЯ И НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ**

**АД** – асинхронный двигатель

**КПД** – коэффициент полезного действия

**ЭДС** – электродвижущая сила

**ПЧ** – преобразователь частоты

**ШИМ** – широтно-импульсная модуляция

**РЭП** – регулируемый электропривод

## Технические требования

Разработать и исследовать электропривод крутильной машины, проведя расчет параметров и исследования элементов силовой цепи электропривода.

Электропривод должен быть настроен так чтобы обеспечить следующие технические требования:

Диапазон регулирования скорости  $D = 1:5$ . Погрешность поддержания скорости на нижней регулировочной характеристики  $\delta \leq 5 \%$

Пуск электропривода обеспечить от датчика интенсивности время разгона  $t \geq 0,6 \text{ с}$

Электропривод должен работать от промышленной сети трехфазного переменного напряжения. Номинальное питающее линейное напряжение  $380\text{В} \pm 10\%$ .

Частота питающей сети  $f_{1н} = 50 \pm 1 \text{ Гц}$ .

Электропривод устанавливается в закрытом помещении с температурой окружающего воздуха от  $10 \text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $30 \text{ }^{\circ}\text{C}$  и относительной влажностью не более 80%.

Режим работы электропривода продолжительный.

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	16
<b>1. Обзор отечественной и зарубежной научной литературы по вопросу исследования</b> .....	18
1.1. История развития технологии скрутки кабелей .....	18
1.2. Общие сведения о крутильной машине ХМ-400 .....	21
1.2.1 Описание основных узлов.....	25
1.2.2. Порядок заправки и пуска машины .....	27
1.3. Электроприводы с асинхронными двигателями.....	28
1.3.1. Определение параметров схемы замещения асинхронного двигателя по каталожным данным.....	29
1.3.2. Модель асинхронного электродвигателя в неподвижной системе координат.....	34
1.3.3 Короткозамкнутый асинхронный двигатель во вращающейся системе координат .....	40
1.3.4 Асинхронный электропривод с частотным регулированием угловой скорости .....	43
<b>2 Выбор двигателя, расчёт параметров и построение механических и электромеханических характеристик</b> .....	50
2.1 Выбор двигателя .....	50
2.2 Расчёт параметров двигателя.....	53
2.3 Механические характеристики асинхронного двигателя.....	56
2.4 Электромеханические характеристики асинхронного двигателя.....	58
2.5 Расчет динамических характеристик асинхронного двигателя 4А160М4УЗ .....	60
<b>3. Выбор преобразователя частоты</b> .....	66
3.1 Устройство ПЧ модели EI-9001 «ВЕСПЕР» .....	67
<b>4. Статические характеристики скалярного управления регулируемым электроприводом</b> .....	75
4.1 Регулирование скорости электропривода с помощью закона $U_{1\phi} / f_1 = const$ .....	75
4.2 Регулирование скорости электропривода с помощью закона $U_{1\phi} / f_1 = const$ с $IR$ -компенсацией.....	78
<b>5. Модель электропривода с задатчиком интенсивности</b> .....	83
5.1. Расчет динамических характеристик скалярной системы преобразователь частоты – асинхронный двигатель.....	83

<b>6 ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСНАБЖЕНИЕ .....</b>	<b>96</b>
6.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения .....	96
6.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования .....	96
6.1.2 Анализ конкурентных технических решений.....	98
6.1.3 Технология QUAD .....	100
6.1.4 SWOT-анализ .....	102
6.2 Определение возможных альтернатив проведения научных исследований .....	105
6.3 Планирование научно-исследовательских работ .....	105
6.3.1 Структура работ в рамках научного исследования.....	105
6.3.2 Определение трудоемкости выполнения работ.....	106
6.3.3 Разработка графика проведения научного исследования.....	107
6.3.4 Бюджет затрат на проектирования.....	111
6.3.4.1 Расчет материальных затрат проектирования .....	111
6.3.4.2 Затраты на заработную плату исполнителей .....	111
6.3.4.3 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления) .....	113
6.3.4.4 Амортизация.....	113
6.3.4.5 Накладные расходы .....	114
6.3.4.6 Формирование бюджета затрат на проектирование .....	114
6.4 Определение ресурсоэффективности исследования .....	115
6.4.1 Интегральный показатель финансовой эффективности .....	115
6.4.2 Интегральный показатель ресурсоэффективности .....	115
<b>Выводы по разделу.....</b>	<b>118</b>
<b>7 Социальная ответственность .....</b>	<b>119</b>
<b>Введение .....</b>	<b>119</b>
7.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности ....	119
7.2 Производственная безопасность .....	121
7.2.1 Анализ опасных и вредных производственных факторов.....	122
7.2.1.1 Недостаточная освещенность рабочей зоны .....	122
7.2.1.2 Отклонение показателей микроклимата .....	123
7.2.1.3 Повышенный уровень вибраций.....	125

7.2.1.4 Повышенный уровень шума.....	127
7.2.1.5 Поражение электрическим током .....	128
7.3 Экологическая безопасность.....	129
7.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях .....	130
7.4.1 Пожар (загорание) как источник ЧС.....	131
<b>Вывод по разделу.....</b>	<b>132</b>
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....</b>	<b>133</b>
<b>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....</b>	<b>134</b>

## ВВЕДЕНИЕ

Возрастающие технологические требования к качеству производственных процессов и необходимость внедрения высоких технологий определяют постоянство тенденции к внедрению регулируемых электроприводов в различные отрасли промышленного и сельскохозяйственного производства.

Высокая энергоёмкость предприятий, к которым относится кабельная промышленность, предъявляет серьезные требования к обоснованию и выбору систем электропривода наиболее важных технологических механизмов, поскольку совершенство систем электропривода решающим образом определяет эффективность потребления электроэнергии. Режимы работы технологических механизмов существенно отличаются друг от друга. Многие из этих механизмов в технологических условиях для обеспечения необходимого качества продукции требуют регулирования скорости в пределах от 1:2 до 1:10. Литцекрытительные машины, используемые на предприятиях по производству кабелей, требуют регулирования скорости в диапазоне от 1:3 до 1:5 в соответствии с технологическим процессом.

Дальнейшее совершенствование технологических процессов выдвигает задачу создания и использования регулируемых электроприводных систем для изготовления кабельной продукции. Во многих случаях использование управляемого электропривода приводит к экономии электроэнергии в дополнение к повышению производительности труда.

В наше время подавляющее большинство механизмов может приводиться в движение асинхронным короткозамкнутым двигателем, управляемым статическим преобразователем частоты. Частотное регулирование скорости может осуществляться плавно, в широком диапазоне и по обе стороны от естественной характеристики. При этом регулировочные характеристики имеют высокую жёсткость, а двигатель сохраняет высокую перегрузочную способность. По сравнению с приводом постоянного тока

преимущества системы преобразователь частоты - асинхронный двигатель заключаются в простоте эксплуатации и настройке, недостатком является относительно большая стоимость преобразователя частоты.

Целью выпускной квалификационной работы является вопрос исследования системы асинхронный двигатель – преобразователь частоты, и рассмотрение законов регулирования скорости, для построения имитационной модели во вращающейся системе координат с целью возможной реализации в системе регулируемого электропривода литцекрытальной машины.

## **1. Обзор отечественной и зарубежной научной литературы по вопросу исследования**

### **1.1. История развития технологии скрутки кабелей**

Производство кабельной продукции включает в себя ряд процессов. Одним из самых распространенных является скрутка. Процесс скрутки осуществляется комбинацией двух движений элементов, которые подвержены скручиванию; прямолинейно-поступательного и вращательного (вокруг оси скрутки). В этом случае, либо все единичные элементы (жилы, пары, четверки, пучки) могут вращаться вокруг оси поступательно-движущегося изделия, либо само поступательно-движущееся изделие вокруг своей оси.

Крутильные машины появились в 1837 – 1840 гг., они были предназначены для скручивания стальных тросов. В 1837 г. Wurm (Австрия) создал клетьевую машину, в которой скрутка проволоки достигалась благодаря эксцентричному расположению центров тяжести отдающих катушек. Такое расположение обеспечивало параллельное перемещение клетей в пространстве осей катушек. Сами катушки были расположены перпендикулярно оси клетки. Скрученный таким способом трос обладал механической устойчивостью [1].

Созданные в 1838 г. Opderbeck (Германия), в 1839 г. Olsson (Швеция) и в 1840 г. Nawal (Шотландия) 36-катушечные машины клетьевого типа имели механизм открутки в виде планетарной передачи. В 1857 г. Smith (Англия) создал относительно быстроходную сигарную машину с тремя катушками, основанную на новом принципе открутки.

Как правило, все типы крутильных машин, которые существовали до относительно недавнего времени (за исключением малых литцекрутильных машин), были основаны на вышеупомянутых базовых машинах, и их развитие происходило совершенствованием конструкции и применением более качественных материалов. Это позволяло увеличить их производительность

путем повышения частоты вращения, создания лучших условий для технического обслуживания и механизации, а также облегчения установки и снятия приемных и отдающих катушек (барабанов).

Применение нового метода так называемой двойной скрутки позволило достичь значительное повышение производительности труда в послевоенные годы. Двойная скрутка осуществляется вращением рамки вокруг приемной катушки, подвешенной внутри описываемого рамкой пространства. Эта система скрутки подходит не для всех типов кабельной продукции; она позволяет получить два шага скрутки за один оборот вращающейся рамки. В сочетании с повышенной частотой вращения легкой рамки (по сравнению с клетью или ротором сигары) это привело к повышению производительности труда при изготовлении стренг и кабелей пучковой скрутки [2].

Все вышеупомянутые машины предлагают такие способы скрутки, при которых отдающие или приемные устройства либо рамки (роторы), охватывающие эти устройства, вращаются вокруг оси изделия. При этих способах скрутка идет в одну сторону на всем протяжении изделия.

Необходимость повышения производительности труда в кабельной промышленности вынуждала искать новые пути и резервы в области скрутки. Совмещение различных операций скрутки между собой и с другими смежными операциями, например, с наложением изоляции, могло оказаться эффективным способом наряду с увеличением скорости крутильных машин. Такое комбинирование приводило бы к значительной экономии времени, которое затрачивается на операции по съему и установке кабельной тары, а также на транспортировку от одного станка к другому.

Попытки объединить процессы скрутки и наложения бумажной изоляции давно имели место и привели к созданию комбинированных крутильно-изолирующих машин. Однако опыт работы этих машин показал, что сочетание крутильных и изолирующих узлов в одной машине в большинстве случаев неэффективно из-за различных технологических характеристик, поскольку линейная скорость прохождения изделия через

машину ограничена частотой вращения лентообмотчиков, а коэффициент машинного времени – разрывом бумажных лент и продолжительностью смены роликов. На практике такое совмещение сохранилось только на крупных тихоходных машинах общей скрутки и на специальных крутильных машинах транспонирующего типа, в которых жилы прямоугольного поперечного сечения скручиваются в общий провод (также прямоугольного поперечного сечения). В большинстве случаев являлось целесообразнее обслуживать одной литцекрутильной машиной сразу две, а иногда и три изолировочные машины.

Впоследствии, из-за широкого внедрения в производство пластмасс, для изоляционных материалов и оболочек, накладываемых на экструдерах, темпы наложения изоляции резко возросли. В некоторых случаях стало целесообразно сочетать опрессовку с другими технологическими процессами, а, в частности, с процессом скрутки. Однако, в этих условиях необходимо было увеличить скорость скручивания и, по возможности, сделать непрерывным этот процесс [2].

То же требовалось и при попытках объединить процессы скрутки, которые ранее производились по отдельности (скрутка жил в пары или четверки со скруткой их в пучок и скрутка отдельных пучков в общий пучок).

Новые требования было трудно достичь с помощью классической технологии скрутки. В большей степени им соответствовал процесс «ложной крутки», применяющийся в текстильной промышленности, которому было дано название разнонаправленной или SZ-скрутки. При такой скрутке направление вращения периодически изменяется, и каждый последующий участок изделия скручивается в направлении, противоположном от того, в которое был закручен предыдущий участок.

Машины такого вида скрутки появились в США, Японии, Англии, Франции, ФРГ и других странах в середине 1960-х годов. Такие крутильные машины имели стационарные (не вращающиеся вокруг оси изделия) отдающие и приемные части, не охваченные вращающимися рамками, между

которыми располагалось крутильное устройство. Таким образом, удалось осуществить непрерывный процесс скрутки и объединить его с другими технологическими операциями, что определило перспективы использования этого метода для поточных и автоматических линий в кабельной промышленности [2].

## 1.2. Общие сведения о крутильной машине ХМ-400

Данная литцекрутильная машина является оборудованием двойного действия, принцип ее работы основан на скручивании параллельного пучка проволок с шагом, в два раза превышающим заданный, и дальнейшим ее докручиванием до требуемых параметров, причем обе операции выполняются за один оборот крутильной рамы. Предел эксплуатации вращающейся рамы при максимальной скорости, указанной в технических данных, определяется разрывом литцы между двумя ниппелями, расположенными на вращающейся раме, который происходит под действием центробежной силы, создающейся при вращении. На основании определённого допустимого значения этой силы можно определить максимально допустимое значение частоты вращения рамы, при котором обеспечивается обработка литцы с соответствующим диаметром [3]. Общий вид машины показан на рисунке 1.



Рисунок 1 – Крутильная машина марки ХМ-400

Проволоки или жилы 1 поступающие с отдающих устройств, входят в ниппель А, который расположен на оси вращения крутильной рамы, на участке АБ происходит скручивание в пучок 3. Этот пучок проходит вдоль крутильной рамы и на участке ВГ дополнительно подкручивается. Где затем, через тяговое устройство 2 и механизм раскладки поступает на приемный барабан 4, расположенный внутри крутильной рамы. На рисунке – 2 приведена схема двойной скрутки [1].

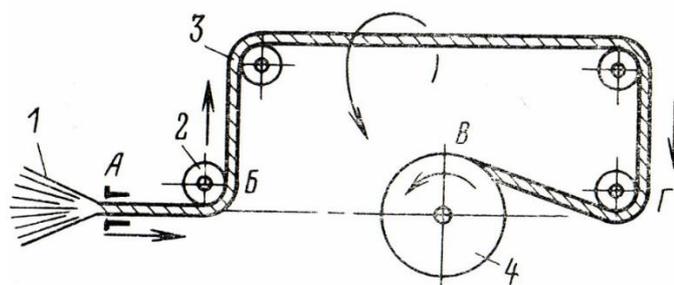


Рисунок 2 – Схема двойной скрутки

Технические характеристики машины приведена в таблице 1 [3].

Таблица 1 – Техническая характеристика машины

Поперечное сечение скрученной литцы	0,15 мм <sup>2</sup> , мин. 8,50 мм <sup>2</sup> , макс.
Диаметр скрученной пасмы сверх скрутки	0,5 мм, мин. 3,8 мм, макс.
Предельные значения диаметров скручиваемой проволоки	0,1 – 0,65
Число оборотов вращающейся рамы	10 – 40 сек <sup>-1</sup>
Теоретическая производительность машины	0,15 – 7,5 м/сек
Допустимая температура окружающей среды	263 К <sup>0</sup> , мин. 323 К <sup>0</sup> , макс.
Масса машины без отдельных принадлежностей и Электрооборудования	200 кг

Окончание таблицы 1

Материал проволоки	- отожженная красная медь - отожженная красная медь с оловянным покрытием - алюминий.
Размеры приемной катушки	
диаметр щеки	400 мм
диаметр шейки	160 мм
внутренняя ширина	250 мм
полная ширина	300 мм
диаметр отверстия	56 мм
Габариты машины	
длина	3100 мм
ширина	1190 мм
высота	1290 мм
Мощность приводного электродвигателя	15 кВт
Число оборотов приводного электродвигателя	1480 сек <sup>-1</sup>
Мощность вентилятора проветривания	0,56 м <sup>3</sup> /сек
Мощность электродвигателя вентилятора проветривания	0,1 кВт
Параметры электрической сети, необходимой для работы электрооборудования машины	380 В, 50 Гц
Защищенность электрооборудования	IP 20
Класс защиты электрооборудования от прикосновения	1

Литцекрутильная машина марки ХМ-400 имеет левозаходное исполнение. Это значит, что если смотреть на машину со стороны обслуживания, то отдающее устройство, обеспечивающее проволоку для машины, оказывается справа от машины. Проволока поступает в машину справа на лево [3].

На рисунке 3 изображена крутильная часть машины ХМ-400. Тяговое устройство состоит из двух колес, установленных в горизонтальной плоскости. Направляющее устройство представлено фигурным рольгангом, обеспечивающим подачу скрученной заготовки. После чего заготовка с тягового устройства направляется в вилку раскладчика. Применение такой конструкции тягового устройства позволило укоротить люльку и крутильную раму.

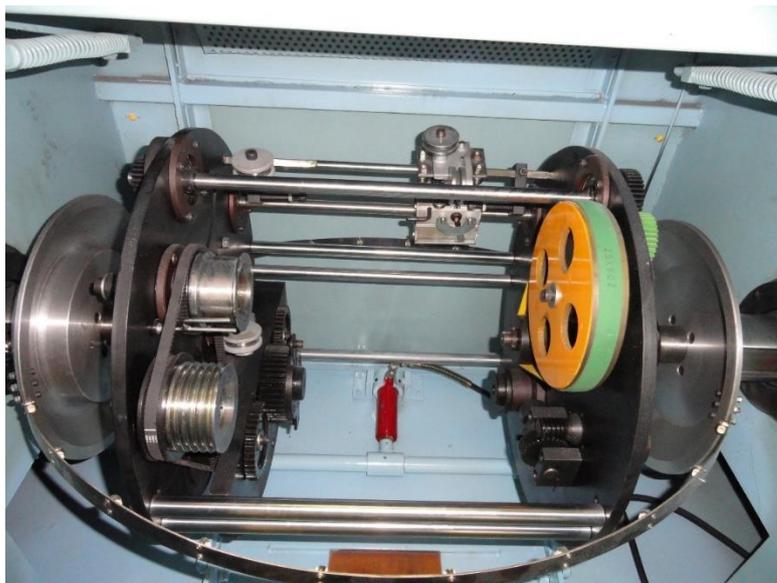


Рисунок 3 – Крутильная часть машины

Станина машины состоит из рамы основания и двух стоек, которые представляют собой конструкции, сваренные из профильной и листовой стали. Стойки крепятся к раме основания с помощью болтов, и соединяются между собой балкой жесткости. Такой узел в сборке является самонесущей конструкцией, что означает, что его можно поднять вместе с укрепленными на нем механизмами и устанавливать на пол без необходимости сооружения специального фундамента.

На станину машины крепятся следующие узлы: корпуса подшипников трансмиссионного вала, приводной двигатель, корпуса главных подшипников роторной части и для некоторых модификаций - система замены катушки.

Стоечные части станины включают в себя подшипниковые узлы крайних участков трансмиссионного вала, и вентилятор проветривания.

### **1.2.1 Описание основных узлов**

Крутильная машина рамочного типа состоит из: отдающего устройства, крутильной рамы, рамы основания, двух стоек люльки и защитных кожухов.

Отдающее устройство представляет собой стальную плиту, на которой установлены стойки. На стойках расположены пальцы для размещения отдающих катушек.

Рама основания выполнена из листовой и швеллерной стали, к которой с помощью болтового соединения крепятся две стойки и корпуса подшипников.

Стойки также выполнены из листовой стали и представляют собой коробчатые сварные конструкции, в них установлены подшипники осей крутильной рамы.

В передней стойке установлен электродвигатель, который передает вращение на вал трансмиссии через клиноременную передачу.

На осях крутильной рамы закреплены подшипники, в которых установлена сварная рамная конструкция, называемая люлькой. Центр тяжести люльки находится ниже точек опоры, поэтому она не вращается.

Тяговое колесо, встроенное в люльку, получает вращение от главного вала, через две пары цилиндрических шестерней, а также через привод тягового колеса, который представляет собой сдвоенную реверсивную систему конических шестерен.

Привод приемного барабана крепится в люльке, и получает вращение от тягового колеса и раскладывающего устройства через зубчатые ремни.

Оси крутильной рамы, встроенные в подшипники передней и задней стоек, приводятся в движение от трансмиссионного вала с помощью зубчатых ремней.

Крутильные головки посажены на оси крутильной рамы с помощью шпонки и соединены между собой стальной пружинной проволокой.

К кожуху электродвигателя, размещенного на передней стойке, крепятся две направляющие, на которых установлены следующие узлы:

- а) распределительная розетка для проволок;
- б) калибродержатель;
- в) счетчик длины

Защитный кожух крутильной машины состоит из:

- неподвижных кожухов
- подвижных кожухов

Неподвижные кожухи применяют для ограждения подшипников осей крутильной рамы, вариатора и электродвигателя. На них установлены конечные выключатели, которые исключают запуск машины при открытых подвижных кожухах.

Два подвижных кожуха закрывают крутильные части машины. Они раздвигаются в стороны для заправки машины и установки в люльку приемного барабана. В подвижных кожухах имеются окна, которые позволяют контролировать работу машины.

Пульт управления машиной установлен на передней стойке, на нем расположены: переключатель направления вращения, кнопки «пуск», «стоп», «аварийный стоп», а также сигнальные лампы, фиксирующие включение главного выключателя.

Кинематическая схема крутильной машины ХМ-400 представлена на рисунке 4.

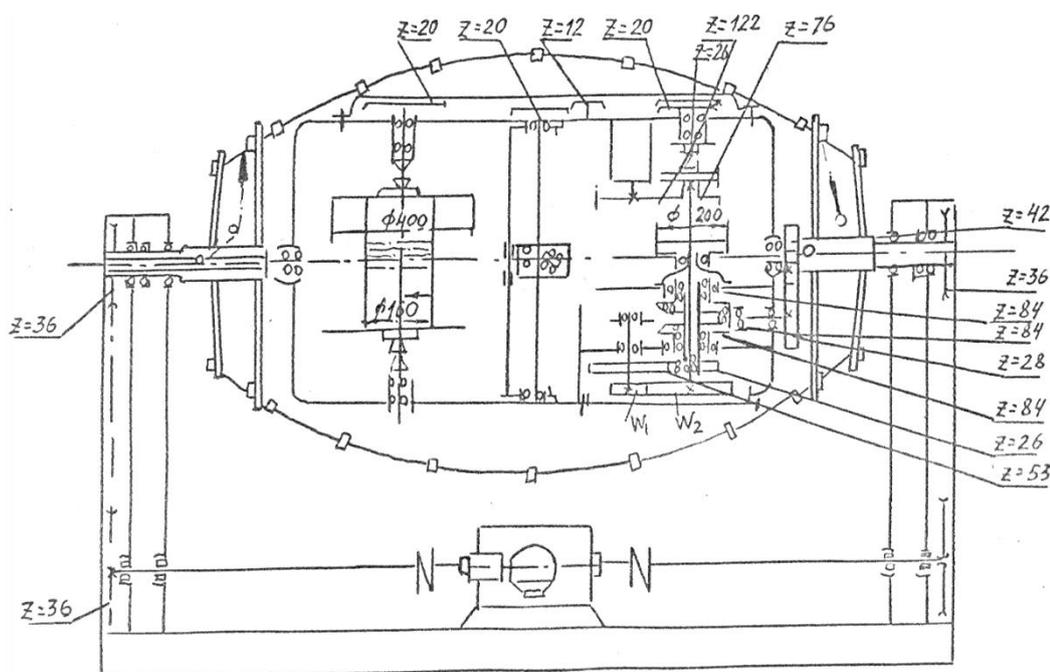


Рисунок 4 – Кинематическая схема крутильной машины XM-400

### 1.2.2. Порядок заправки и пуска машины

Заправка и пуск крутильной машины осуществляется по представленной ниже последовательности.

1. Установить отдающие катушки с проволокой на пальцах отдающего устройства.
2. Концы проволоки с катушек пропустить через направляющие втулки отдающего устройства, распределительную розетку, калибр, счетчик длины, направляющие ролики, втулки крутильной рамы, тяговое колесо, раскладочное устройство и закрепить на приемном барабане.
3. Включить главный выключатель, расположенный на шкафу управления. На пульте управления должны загореться сигнальные лампы.
4. При помощи тахометра установить необходимое число оборотов крутильной рамы.
5. С помощью переключателя в электрическом шкафу, установить степень торможения.

6. С помощью пары сменных шестерен установить требуемый шаг скрутки и шаг раскладки.
7. В соответствии с маршрутной или операционной картой установить направление вращения крутильной рамы.

### **1.3. Электроприводы с асинхронными двигателями**

Асинхронные двигатели были разработаны в Германии русским инженером Доливо-Добровольским М.О. в 1889 году. Они получили широкое применение благодаря низкой стоимости двигателя, а также простой и надёжной конструкции. В конструкции асинхронной машины удалось избавиться от ряда недостатков, которыми обладает электропривод постоянного тока. Отсутствие коллектора и щеток в короткозамкнутом АД способствовало увеличению предельной единичной мощности, двигатель стал иметь более высокую перегрузочную способность и допустимую скорость изменения момента, удалось увеличить скорость вращения и улучшить весогабаритные показатели, по сравнению с машинами постоянного тока.

Преимущества асинхронных двигателей наиболее полно реализуются при частотном управлении, поэтому в последнее время, все чаще происходит вытеснение регулируемого электропривода постоянного тока частотно-регулируемым асинхронным электроприводом практически во всех отраслях промышленности.

К недостаткам асинхронных двигателей относятся: квадратичная зависимость момента от напряжения (пусковой и критический момент значительно уменьшаются при падении напряжения в сети); опасность перегрева статора, особенно при повышении напряжения сети, и ротора при понижении напряжения; небольшой воздушный зазор, несколько снижающий надёжность двигателя.

### 1.3.1. Определение параметров схемы замещения асинхронного двигателя по каталожным данным

Для расчёта электромеханических и механических характеристик АД нужно использовать его математическую модель, которая представляется разными схемами замещения. Самый простой и удобной для инженерных расчётов АД является Т-образная схема замещения [9], рисунок 5.

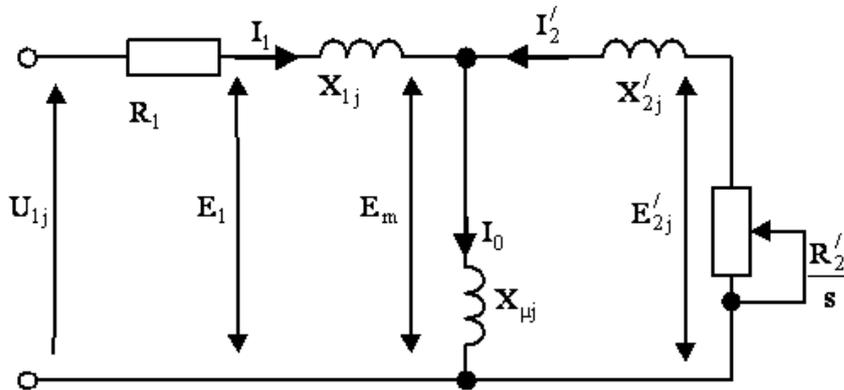


Рисунок 5 – Схема замещения асинхронного двигателя

Основные уравнения АД, соответствующие принятой схеме замещения:

$$U_{1\phi} - \bar{E}_m - j \cdot X_1 \cdot \bar{I}_1 - R_1 \cdot \bar{I}_1 = 0 \quad (1)$$

$$\bar{E}_m + j \cdot$$

Векторная диаграмма токов, ЭДС и напряжений, удовлетворяющая уравнениям (1), изображена на рисунке 6.

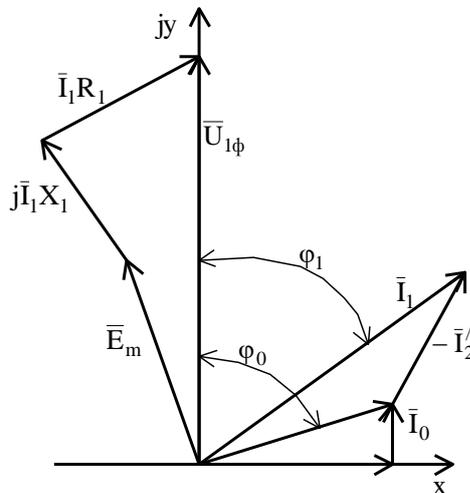


Рисунок 6 – Векторная диаграмма асинхронной машины

Для определения параметров Т-образной схемы замещения АД необходимы следующие технические данные (которые как правило приводятся в каталогах на асинхронные двигатели):

$P_n$  – номинальная мощность двигателя, кВт;

$U_{1n}$  – номинальное линейное напряжение, В;

$n_n$  – номинальная частота вращения, об/мин или

$s_n$  – номинальное скольжение, о.е.;

$\eta_n$  – КПД в режиме номинальной мощности (100 %-я нагрузка), %;

$\cos \phi_n$  – коэффициент мощности в режиме номинальной мощности, о.е.;

$k_i = \frac{I_n}{I_n}$  – кратность пускового тока, о.е.;

$k_n = \frac{M_n}{M_n}$  – кратность пускового момента, о.е.;

$k_{\max} = \frac{M_{\kappa}}{M_n}$  – кратность максимального момента, о.е.;

$k_{\min} = \frac{M_{\min}}{M_n}$  – кратность минимального момента, о.е.;

Эти данные позволяют определить параметры схемы замещения при следующих основных допущениях:

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

Ток холостого хода АД можно найти из выражения:

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

где  $I_{1n} = \frac{P_n}{3 \cdot U_{1\phi} \cdot \cos \phi_n \cdot \eta_n}$  – номинальный ток статора двигателя;

$s_n = \frac{n_0 - n_n}{n_0}$  - номинальное скольжение;

$n_0$  - синхронная частота вращения;

$U_{1\phi}$  - фазное напряжение.

Ток статора при частичной нагрузке:

$$I_{11} = \frac{p_* \cdot P_n}{3 \cdot U_{1\phi} \cdot \cos \phi_{p_*} \cdot \eta_{p_*}} \quad (3)$$

где  $\cos \phi_{p_*}$  - коэффициент мощности при частичной нагрузке;

$\eta_{p_*}$  - КПД при частичной нагрузке;

$p_* = P/P_n$  - коэффициент нагрузки 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 не присутствуют. Такие параметры можно определять, используя следующие соображения:

- АД нового поколения проектируются таким образом, что наибольший КПД достигается при нагрузке меньше на 10 – 15 % номинальной. Двигатели рассчитываются так потому, что многие из них в силу стандартной дискретной шкалы мощностей работают с недогрузкой. Поэтому КПД при номинальной нагрузке и нагрузке  $p_* = 0,75$  практически равны между собой, т.е.

$$\eta_{p_*} \approx \eta_n \quad (4)$$

- коэффициент мощности при нагрузке  $p_* = 0,75$  в значительной форме отличается от коэффициента мощности при номинальной нагрузке, а также отличие в значительной степени зависит от мощности двигателя и для известных серий АД с достаточной для практики точностью подчиняется зависимости, представленной на рисунке 7.

Из формулы Клосса определим соотношение для расчёта критического скольжения:

$$s_{\kappa} = s_{\text{H}} \cdot \frac{k_{\text{max}} + \sqrt{k_{\text{max}}^2 - (1 - 2 \cdot s_{\text{H}} \cdot \beta \cdot (k_{\text{max}} - 1))}}{1 - 2 \cdot s_{\text{H}} \cdot \beta \cdot (k_{\text{max}} - 1)} \quad (5)$$

$$\beta = R_1 / (C_1 \cdot R_2') \quad (6)$$

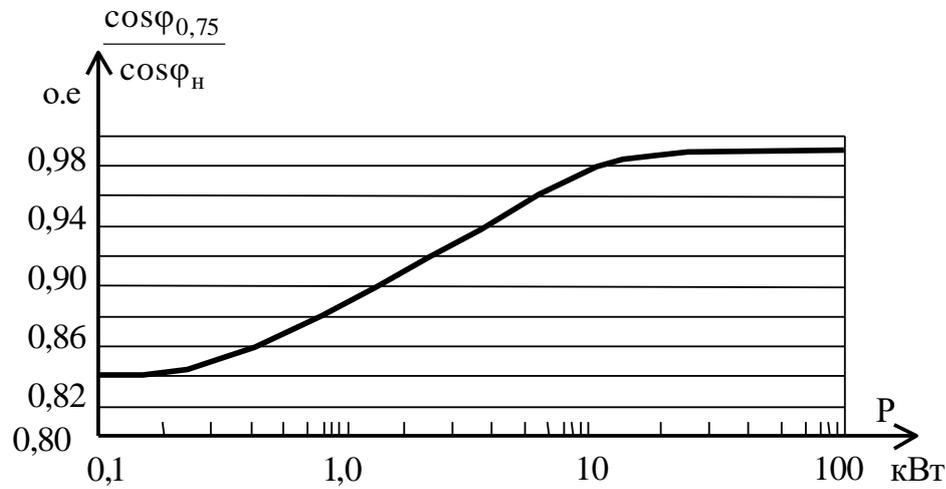


Рисунок 7 - Зависимость  $\cos \phi_{0,75} / \cos \phi_{\text{H}}$  от мощности асинхронного двигателя

Значение коэффициента  $\beta$  находится в диапазоне 0,6 – 4, поэтому в первом приближении принимаем  $\beta = 1$ .

Далее необходимо определить ряд промежуточных коэффициентов:

$$C_1 = 1 + \frac{I_0}{2 \cdot k_i \cdot I_{1\text{H}}} ; \quad (7)$$

$$A_1 = \frac{m \cdot U_{1\phi}^2 \cdot (1 - s_{\text{H}})}{2 \cdot C_1 \cdot k_{\text{max}} \cdot P_{\text{H}}} ; \quad (8)$$

$$A_0 = \frac{I_{1\text{H}} \cdot \cos \phi_{\text{H}} - I_0 \cos \phi_0}{U_{1\phi}} . \quad (9)$$

где  $\cos \phi_0 = \cos 82^\circ = 0,139$  - коэффициент мощности АД в режиме холостого хода;

$$B = \frac{1}{s_{\text{H}}} + \frac{1}{s_{\kappa}} - A_0 \cdot 2 \cdot \frac{A_1}{s_{\text{H}}} ; \quad (10)$$

$$C = \frac{1}{s_{\text{H}} \cdot s_{\kappa}} - \left( \frac{1}{s_{\kappa}^2} + \frac{1}{s_{\text{H}}^2} \right) \cdot A_0 \cdot A_1 . \quad (11)$$

Теперь по найденным значениям проверяем величину заданного в начале коэффициента  $\beta$ :

$$\beta_p = \left| \frac{-B}{2} + \sqrt{\frac{B}{2} - C} \right| \quad (12)$$

Если  $\beta_p$  больше  $\beta$ , необходимо уменьшить, а если  $\beta_p$  меньше  $\beta$ , то увеличить значение коэффициента  $\beta$  и повторить весь расчёт сначала. Как правило, за несколько итераций удаётся получить вполне удовлетворительные результаты.

Если разница между  $\beta_p$  и  $\beta$  не превышает установленной погрешности расчёта ( $\delta = 0,001$ ) можно переходить к непосредственному определению параметров АД.

Активное сопротивление ротора, приведённое к обмотке статора АД:

$$R_2' = \frac{A_1}{\left(\beta + \frac{1}{s_k}\right) \cdot C_1} \quad (13)$$

Активное сопротивление статорной обмотки можно определить по следующему выражению:

$$R_1 = C_1 \cdot R_2' \cdot \beta \quad (14)$$

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

$$\gamma = \sqrt{\frac{1}{s_k^2} - \beta^2} \quad (15)$$

Тогда:

$$X_{кн} = \gamma \cdot C_1 \cdot R_2' \quad (16)$$

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

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

$$X'_{2n} = \frac{0,58 \cdot X_{кн}}{C_1} \quad (17)$$

Индуктивное сопротивление статорной обмотки может быть определено по следующему выражению:

$$X_{1n} = 0,42 \cdot X_{кн} \quad (18)$$

Согласно векторной диаграмме (рисунок 10) ЭДС ветви намагничивания, наведённая потоком воздушного зазора в обмотке статора в номинальном режиме, равна:

$$E_1 = \sqrt{(U_{1\phi} \cdot \cos \phi_n - R_1 \cdot I_{1n})^2 + (U_{1n} \cdot \sin \phi_n - X_{1n} \cdot I_{1n})^2} \quad (19)$$

Тогда индуктивное сопротивление намагничивания:

$$X_{\mu n} = \frac{E_m}{I_0} \quad (20)$$

Используя параметры схемы замещения можно произвести расчёт механических и электромеханических характеристик.

### **1.3.2. Модель асинхронного электродвигателя в неподвижной системе координат**

Динамическая механическая характеристика АД определяет зависимость его угловой скорости от мгновенных значений электромагнитного момента. При моделировании динамических процессов трехфазный АД чаще всего сводят к двухфазной машине, у которой две обмотки  $a$  и  $b$  сдвинуты в пространстве на 90 градусов и совмещены с координатными осями  $a, jb$  (рисунок 8). Установлено, что при питании обмоток синусоидальными напряжениями, сдвинутыми на 90 эл. градусов

удается обеспечить в зазоре электрической машины круговое вращающееся электромагнитное поле.

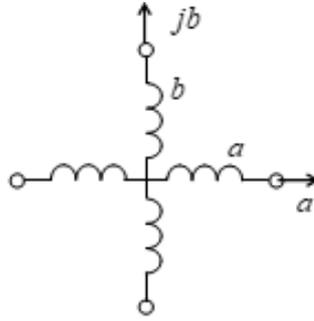


Рисунок 8 - Обмотки двухфазной электрической машины переменного тока

Уравнение динамической механической характеристики короткозамкнутого двухфазного АД, получающего питание от сети или индивидуального преобразователя, обладающего свойствами источника напряжения, можно получить из совместного решения следующей системы дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned}
 \frac{d\psi_{1a}}{dt} &= U_{1a} - \frac{R_1}{X_1 \cdot \sigma} \left( \psi_{1a} - \frac{X_m}{X_2} \psi_{2a} \right); \\
 \frac{d\psi_{1b}}{dt} &= U_{1b} - \frac{R_1}{X_1 \cdot \sigma} \left( \psi_{1b} - \frac{X_m}{X_2} \psi_{2b} \right); \\
 \frac{d\psi_{2a}}{dt} &= -\frac{R'_2}{X'_2 \cdot \sigma} \left( \psi_{2a} - \frac{X_m}{X_1} \psi_{1a} \right) - \omega \cdot \psi_{2b}; \\
 \frac{d\psi_{2b}}{dt} &= -\frac{R'_2}{X'_2 \cdot \sigma} \left( \psi_{2b} - \frac{X_m}{X_1} \psi_{1b} \right) + \omega \cdot \psi_{2a}; \\
 M_{\text{д}} &= \frac{3 \cdot z_p \cdot X_m}{2 \cdot X_1} (\psi_{1b} \cdot i_{2a} - \psi_{1a} \cdot i_{2b}).
 \end{aligned} \tag{21}$$

В системе уравнений (21) приняты следующие обозначения:

$\psi_{1a}$  – составляющая вектора потокосцепления обмотки статора, ориентированная вдоль оси *a* неподвижной системы координат;  
 $\psi_{1b}$  – составляющая вектора потокосцепления обмотки статора, ориентированная вдоль оси *b* неподвижной системы координат;

$i_{2a}$  – составляющая вектора тока обмотки ротора, ориентированная вдоль оси  $a$  неподвижной системы координат;

$i_{2b}$  – составляющая вектора тока обмотки ротора, ориентированная вдоль оси  $b$  неподвижной системы координат;

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

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

$R_1$  – активное сопротивление обмотки статора;

$R_2'$  – активное сопротивление обмотки ротора, приведенное к обмотке статора;

$X_1 = X_{1\sigma} + X_m$  – эквивалентное индуктивное сопротивление обмотки статора, равное индуктивному сопротивлению рассеяния обмотки статора и индуктивному сопротивлению от главного поля;

$X_2' = X_{2\sigma}' + X_m$  – эквивалентное индуктивное сопротивление обмотки ротора, приведенное к обмотке статора, равное индуктивному сопротивлению рассеяния обмотки ротора и индуктивному сопротивлению от главного поля;

$X_m$  – индуктивное сопротивление от главного поля (контура намагничивания), создаваемое суммарным действием токов статора;

$\sigma = 1 - \frac{X_m^2}{X_1 \cdot X_2'}$  – коэффициент рассеяния;

$z_p$  – число пар полюсов асинхронного двигателя;

$\omega$  – скорость вращения ротора.

Выражение для определения электромагнитного момента, используемое в системе уравнений (21) не единственное для АД. Ниже приведены другие равнозначные варианты уравнений электромагнитного момента АД в виде скалярных произведений векторов в их компактной и развернутой формах. Приведенные формулы позволяют в каждом конкретном случае выбирать наиболее благоприятный вариант вычисления момента.

$$M_{\delta} = \frac{3 \cdot z_p \cdot X_m}{2 \cdot X_1 \cdot X_2' \cdot \sigma} \text{Im}(\overline{\psi_1} \cdot \overline{\psi_2^*}) = \frac{3 \cdot z_p \cdot X_m}{2 \cdot X_1 \cdot X_2' \cdot \sigma} (\psi_{1b} \cdot \psi_{2a} - \psi_{1a} \cdot \psi_{2b}); \quad (22)$$

$$M_{\delta} = \frac{3 \cdot z_p}{2} \text{Im}(\overline{\psi_1^*} \cdot \overline{I_1}) = \frac{3 \cdot z_p}{2} (\psi_{1a} \cdot i_{1b} - \psi_{1b} \cdot i_{1a}); \quad (23)$$

$$M_{\delta} = \frac{3 \cdot z_p \cdot X_m}{2} \text{Im}(\overline{I_2^*} \cdot \overline{I_1}) = \frac{3 \cdot z_p \cdot X_m}{2} (i_{2a} \cdot i_{1b} - i_{2b} \cdot i_{1a}); \quad (24)$$

$$M_{\delta} = \frac{3 \cdot z_p \cdot X_m}{2 \cdot X_2'} \text{Im}(\overline{\psi_2^*} \cdot \overline{I_1}) = \frac{3 \cdot z_p \cdot X_m}{2 \cdot X_2'} (\psi_{2a} \cdot i_{1b} - \psi_{2b} \cdot \psi_{1a}); \quad (25)$$

$$M_{\delta} = \frac{3 \cdot z_p}{2} \text{Im}(\overline{\psi_2} \cdot \overline{I_2^*}) = \frac{3 \cdot z_p}{2} (\psi_{2b} \cdot i_{2a} - \psi_{2a} \cdot i_{2b}), \quad (26)$$

где  $\overline{I_1}$  - вектор тока статора;  $\overline{I_2^*}$  - вектор тока, комплексно сопряженный с вектором тока ротора  $\overline{I_2}$ ;  $\overline{\psi_1}$  - вектор потокосцепления обмотки статора;  $\overline{\psi_1^*}$  - вектор потокосцепления, комплексно сопряженный с вектором потокосцепления обмотки статора;  $\overline{\psi_2}$  - вектор потокосцепления обмотки ротора;  $\overline{\psi_2^*}$  - вектор потокосцепления, комплексно сопряженный с вектором потокосцепления обмотки ротора;  $\psi_{2a}$  - составляющая вектора потокосцепления обмотки ротора, ориентированная вдоль оси  $a$  неподвижной системы координат;  $\psi_{2b}$  - составляющая вектора потокосцепления обмотки статора, ориентированная вдоль оси  $b$  неподвижной системы координат;  $i_{1a}$  - составляющая вектора тока обмотки статора, ориентированная вдоль оси  $a$  неподвижной системы координат;  $i_{1b}$  - составляющая вектора тока обмотки статора, ориентированная вдоль оси  $b$  неподвижной системы координат.

Структурная схема динамической модели короткозамкнутого АД, соответствующая системе уравнений (21), приведена на рисунке 9.

Анализ динамических процессов преобразования энергии в АД представляет собой сложную задачу в связи с существенной нелинейностью уравнений описывающих АД обусловленной произведением переменных. Поэтому



моделирования и позволяет устранить многие проблемы при моделировании, а диапазон численных значений переменных, как правило, значительно меньше, чем в системе с абсолютными значениями переменных – токов, моментов, мощностей.

Для описания моделей АД будем использовать следующую систему относительных единиц, приняв в качестве базисных:

- номинальное фазное напряжение обмотки статора  $U_{\sigma} = U_{1н}$ ;

- номинальный фазный ток обмотки статора  $I_{\sigma} = I_{1н}$ ;

- сопротивление  $R_{\sigma} = \frac{U_{\sigma}}{I_{\sigma}}$ ; (27)

- безразмерное время  $\tau = \omega_{\sigma} \cdot t$ ; (28)

- номинальное значение угловой частоты напряжения обмотки статора  $\omega_{\sigma} = \omega_n = 2 \cdot \pi \cdot f_{1н}$ ; (29)

- потокосцепление  $\psi_{\sigma} = \frac{U_{\sigma}}{\omega_{\sigma}}$ ; (30)

- мощность  $P_{\sigma} = \frac{3}{2} U_{\sigma} \cdot I_{\sigma}$ ; (31)

- энергию  $W_{\sigma} = P_{\sigma} \cdot \tau$ ; (32)

- электромагнитный момент, момент сопротивления:

$$M_{\sigma} = \frac{P_{\sigma} \cdot z_p}{\omega_{\sigma}} = \frac{3}{2} z_p \frac{U_{\sigma} \cdot I_{\sigma}}{\omega_{\sigma}}; \quad (33)$$

- момент инерции  $J_{\sigma} = \frac{W_{\sigma}}{\omega_{\sigma}^2}$ . (34)

Уравнения для электромагнитного момента АД в относительных единицах получим после деления (21) – (26) на базисный момент  $M_{\sigma}$

$$\mu_{\sigma} = \frac{X_m}{X_1} (\psi_{1b} \cdot i_{2a} - \psi_{1a} \cdot i_{2b}) \quad (35)$$

$$\mu_{\partial} = \frac{X_m}{X_1 \cdot X_2 \cdot \sigma} (\psi_{1b} \cdot \psi_{2a} - \psi_{1a} \cdot \psi_{2b}); \quad (36)$$

$$\mu_{\partial} = (\psi_{1a} \cdot i_{1b} - \psi_{1b} \cdot i_{1a}); \quad (37)$$

$$\mu_{\partial} = X_m (i_{2a} \cdot i_{1b} - i_{2b} \cdot i_{1a}); \quad (38)$$

$$\mu_{\partial} = \frac{X_m}{X_2} (\psi_{2a} \cdot i_{1b} - \psi_{2b} \cdot \psi_{1a}); \quad (39)$$

$$\mu_{\partial} = (\psi_{2b} \cdot i_{2a} - \psi_{2a} \cdot i_{2b}) \quad (40)$$

Электромеханические процессы описываются уравнением движения двигателя:

$$M - M_c = J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt} \quad (41)$$

где  $J_{\Sigma}$  - приведённый к валу двигателя момент инерции привода;  $M_c$  – приведённый к валу двигателя момент сопротивления нагрузки.

Уравнение движения АД в относительных единицах получим, разделив (41) на  $M_{\phi}$ :

$$\mu_{\partial} - \mu_c = H_{\Sigma} \frac{d\nu}{d\tau} \quad (42)$$

где  $H_{\Sigma} = \frac{J_{\Sigma} \cdot \omega_{\phi}^2}{M_{\phi}}$  - эквивалентный момент инерции в относительных

единицах.

### 1.3.3 Короткозамкнутый асинхронный двигатель во вращающейся системе координат

При питании обмоток статора АД от статических преобразователей частоты системы управления выполняются во вращающейся системе координат. Используя вращающуюся систему координат для построения электроприводов с АД, удастся значительно упростить систему управления,

перейдя от гармонических входных воздействий к аналоговым скалярным переменным. Представление АД во вращающейся системе координат позволяет производить их анализ и синтез методами, хорошо проработанными в теории электроприводов постоянного тока.

При исследовании асинхронных электроприводов в большинстве случаев применяют вращающуюся с относительной скоростью  $\omega_{\kappa c}$  систему координат, с вещественной осью  $x$ , и с мнимой осью  $y$ . Во вращающейся системе координат дифференциальные уравнения, описывающие динамическую модель АД, имеют следующий вид:

$$\begin{aligned}
 \frac{d\psi_{1x}}{dt} &= U_{1x} - \frac{R_1}{X_1 \cdot \sigma} \left( \psi_{1x} - \frac{X_m}{X_2} \psi_{2x} \right) + \omega_{\kappa c} \cdot \psi_{1y}; \\
 \frac{d\psi_{1y}}{dt} &= U_{1y} - \frac{R_1}{X_1 \cdot \sigma} \left( \psi_{1y} - \frac{X_m}{X_2} \psi_{2y} \right) - \omega_{\kappa c} \cdot \psi_{1x}; \\
 \frac{d\psi_{2x}}{dt} &= -\frac{R'_2}{X'_2 \cdot \sigma} \left( \psi_{2x} - \frac{X_m}{X_1} \psi_{1x} \right) + (\omega_{\kappa c} - \omega) \cdot \psi_{2y}; \\
 \frac{d\psi_{2y}}{dt} &= -\frac{R'_2}{X'_2 \cdot \sigma} \left( \psi_{2y} - \frac{X_m}{X_1} \psi_{1y} \right) - (\omega_{\kappa c} - \omega) \cdot \psi_{2x}; \\
 M_{\delta} &= \frac{3 \cdot z_p \cdot X_m}{2 \cdot X_1} (\psi_{1y} \cdot i_{2x} - \psi_{1x} \cdot i_{2y}),
 \end{aligned} \tag{43}$$

где  $\omega_{\kappa c}$  - скорость вращения системы координат.

Подаваемые на вход модели напряжения  $U_{1x}$  и  $U_{1y}$  также описываются во вращающейся системе координат и представляются постоянными сигналами.

Моделирование АД во вращающейся системе координат будем производить в относительных единицах с базовыми значениями, принятыми в разделе 3.4. Разделив  $\omega_{\kappa c}$  на базовое значение угловой частоты напряжения обмотки статора  $\omega_{\delta}$ , получим относительную скорость вращения координатной сетки:

$$v_{\text{кв}} = \frac{\omega_{\text{кв}}}{\omega_{\delta}}. \quad (44)$$

Уравнение движения АД в относительных единицах:

$$\mu_{\delta} - \mu_c = H_{\Sigma} \frac{dv}{d\tau}, \quad (45)$$

где  $H_{\Sigma} = \frac{J_{\Sigma} \cdot \omega_{\delta}^2}{M_{\delta}}$  - эквивалентный момент инерции в относительных единицах.

Структурная схема динамической модели короткозамкнутого асинхронного электродвигателя во вращающейся системе координат, соответствующая системе уравнений (43), приведена на рисунке 10.

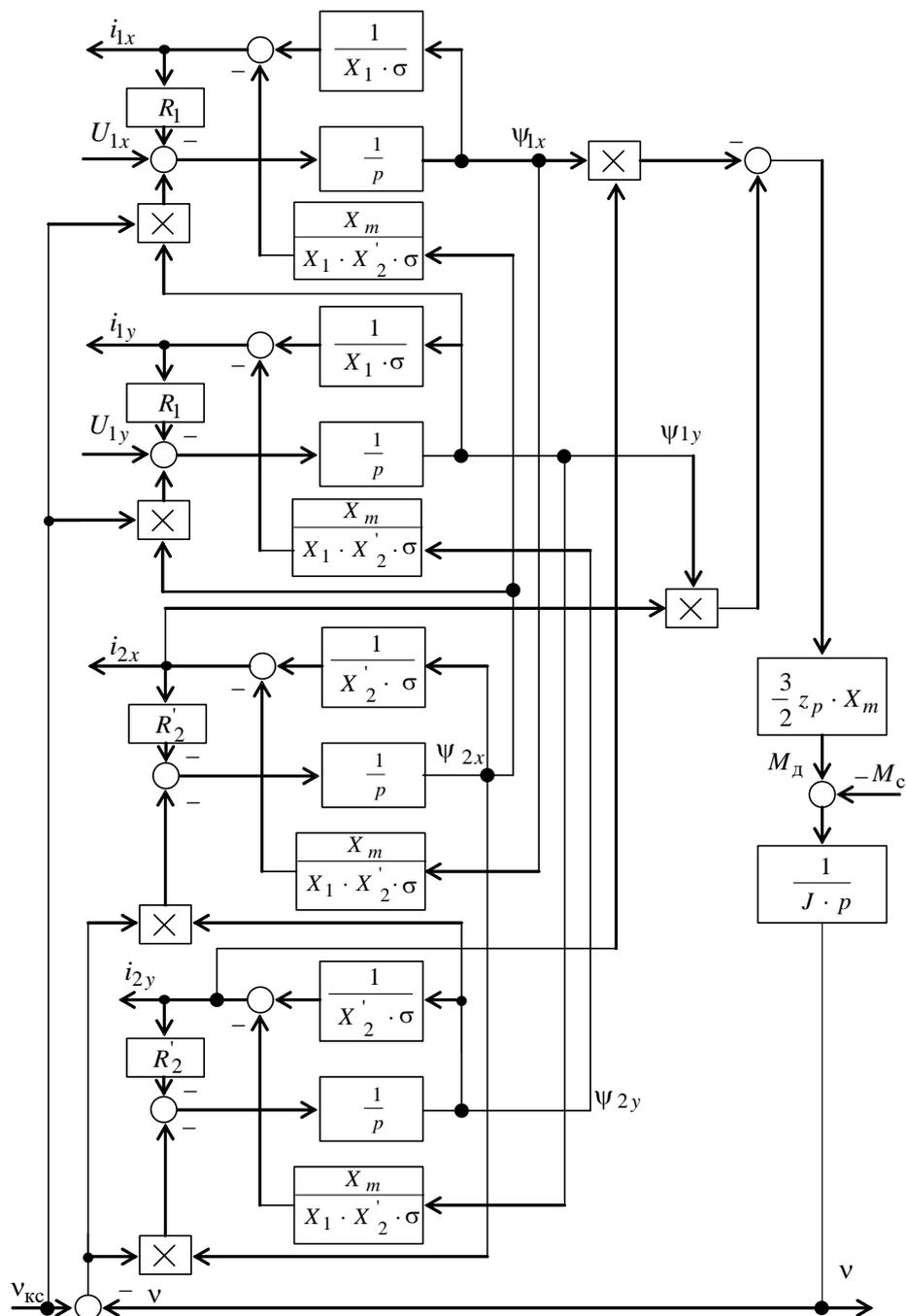


Рисунок 10 – Структурная схема динамической модели короткозамкнутого асинхронного электродвигателя во вращающейся системе координат

### 1.3.4 Асинхронный электропривод с частотным регулированием угловой скорости

Изменение частот питающий напряжения АД влияет как на его синхронную скорость  $\omega_0$ , так и на его реактивный сопротивления, которые меняются пропорционально изменению частот:

$$X_{1\sigma j} = X_{1\sigma H} \cdot f_{1j} / f_{1H}; \quad X'_{2\sigma j} = X'_{2\sigma H} \cdot f_{1j} / f_{1H}; \quad X_m = X_{mH} \cdot f_{1j} / f_{1H},$$

где  $f_{1H}$  – номинальным значение частоты напряжения статора АД;

$X_{1\sigma H}, X'_{2\sigma H}$  – индуктивным сопротивление рассеяния обмотки статор и индуктивным сопротивление рассеяний обмотки ротора, приведенным к обмотке статор при номинальной частот питающей сети  $f_{1H}$ .

Если одновременно с частотой  $f_{1j}$  изменить и переменным напряжение  $U_{1j}$  обмоток статора АД, то появляется возможностью реализовать в системах «ПЧ – АД» различные закон регулирования скорость. Для сравнительной оценки этих законов регулирований воспользуемся уравнением баланса мощностей. Мощность на вал двигателя:

$$P_2 = P - \Delta P_2 = \omega \cdot (1 - s) \cdot M, \quad (46)$$

где  $P$  – электромагнитный мощность, передаваемая от статора к ротору;  $\Delta P_2$  – мощность потерь в роторе.

Из (46) следует, что при любом способе регулирований скорости АД важно согласовать регулировочные механический характеристик двигателя с его нагрузкой.

По характеру зависимости момент механизма от его скорости –  $M_c = f(\omega)$  можно выделять следующие механический характеристики производственных механизмов:

- не зависящая от угловой скорости механическая характеристика:

$$M_c = const; P_c = k \cdot \omega; \quad (47)$$

- нелинейно-спадающая механический характеристика или работа с постоянной мощностью:

$$M_c = k \cdot \omega^{-1}; P_c = const; \quad (48)$$

- нелинейно-возрастающий механическая характеристика или вентиляторная нагрузка:

$$M_c = k \cdot \omega^2; P_c = k \cdot \omega^3. \quad (49)$$

В частотно-регулируемых электроприводах переменного тока зависимость (47) – (49) можно сформировать и для электромагнитной моментов двигателей. Например, при постоянном моменте нагрузки ( $M_c = const$ ) управление напряжением и частотой тока статор АД должно осуществляться по закону

$$U_{1j}/f_{1j} = const. \quad (50)$$

При нелинейно-спадающим нагрузке  $M_c = k \cdot \omega^{-1}$  – закон управления напряжением и частотой принимает вид

$$U_{1j}^2/f_{1j} = const. \quad (51)$$

Наконец, при «вентиляторной» нагрузке  $M_c = k \cdot \omega^2$  напряжений и частота должны изменяться в соответствии с зависимостью

$$U_{1j}/f_{1j}^2 = const. \quad (52)$$

Законы управления (50) – (52), связывающий напряжение, частоту и характер нагрузки, описываются формулой М.П. Костенко:

$$U_{1j} = U_{1н} \frac{f_{1j}}{f_{1н}} \sqrt{M_c/M_n}, \quad (53)$$

где  $U_{1н}$  – номинальное напряжений питающей сети, В;  $U_{1j}$  – напряжение на выходе ПЧ;  $M_c$  – статический момента на валу АД при данной частоте  $f_{1j}$ .

Из (48) следует, что, например, для привода, работающего с постоянной мощностью, увеличение скорость в четыре раза приводит к уменьшению статического момента  $M_c$  также в четыре раза. При этом потеря в стали и на намагничивание уменьшаются, а перегрузочная способность двигатель остается примерно постоянной:

$$M_c/M_k = const, \quad (54)$$

где  $M_k$  – критический момент двигателя, Н·м.

Управление двигателями, в соответствии с соотношением (52), позволяет также сохранять практически неизменным коэффициент мощность

и абсолютное скольжение электропривода, при этом его КПД не зависит от скорости. В этом и заключается основное достоинство частотного управления.

Таким образом, для того, чтобы наиболее эффективным реализовать принцип частотного управления АД, необходим в соответствии с видом нагрузки на валу двигателя управлять напряжением, подводимыми к статору, взаимосвязан с изменением частот тока статора. Перечисленные режимы управления достаточно для большинства механизмов. Однако закон управления (50) справедливый только в первом аналитическом приближении, когда активным сопротивлением статора  $R_1$  можно пренебречь. В действительность, при малых значениях частот ( $f_1 \leq 0,5 \cdot f_{1H}$ ) падение напряжений на сопротивлениях  $R_1$  существенно снижает величину напряжения, прикладываемого к контур намагничивания, и критический момент АД уменьшается. При более точном анализе, учитывающем падение напряжений на сопротивлении  $R_1$ , механические характеристики принимают вид, показанный на рисунке 11. Так, например, при законе управления  $U_{1j}/f_{1j} = const$ , предполагающем постоянство критического момента, наблюдается его снижение при уменьшении частоты  $f_{1j}$ .

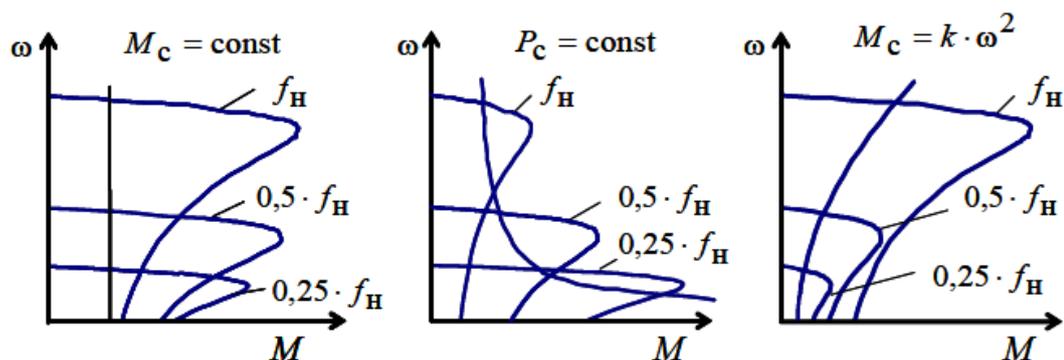


Рисунок 11 – Механические характеристики производственных механизмов и электроприводов «преобразователь частоты – асинхронный двигатель»

Функциональная схема электропривода, выполненного по системе «ПЧ – АД», реализующая различные законы управления класса  $U_{1j}/f_{1j}$  приведен на рисунке 12.

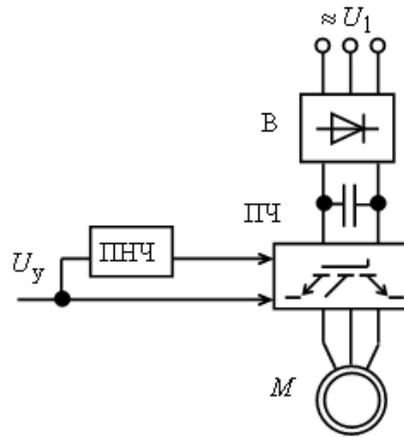


Рисунок 12 – Функциональная схема скалярного частотного управления скоростью асинхронного двигателя

В этой схеме сигналы управления  $U_y$  определяет модуль напряжений статора. Преобразователя напряжение – частота обеспечивается изменений относительной частот  $\alpha = f_{1*} = f_{1j}/f_{1н}$  в функций от напряжения управления  $U_y$  по одному из установленным законам регулирования (50) – (52) класса  $U_{1j}/f_{1j}$ .

При частотном регулировании скорости АД необходимо учитывать, что реактивный сопротивления двигатель зависят от частот питающего напряжений. При снижении частоты  $f_{1j}$  активное сопротивление  $R_1$  становится соизмеримым с реактивным сопротивлениями машины, поэтому расчет электромеханический и механический характеристик АД производится в соответствии с уравнениями, приведенным в.

Электромеханическая характеристик, определяющий зависимость приведенного тока ротора от скольжений,

$$I_2' = \frac{U_{1j}}{\pm \sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + X_{кн}^2 \cdot f_{1*}^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{s \cdot X_{\mu н} \cdot f_{1*}}\right)^2}}, \quad (55)$$

где  $U_{1j}$  – фазное напряжение обмоток статора асинхронного двигателя;

$f_{1*} = f_{1j}/f_{1н}$  – относительное значение частоты питающего напряжения.

Электромеханические характеристики  $I_2' = f(\omega)$ , построенных по (55) для трех законов регулирований класса  $U_{1j}/f_{1j}$ , приведены на рисунке 13, где  $\omega = \omega_0(1 - s)$ .

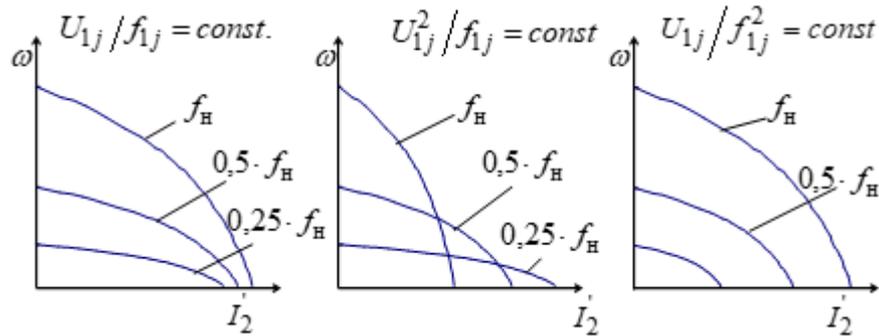


Рисунок 13 – Электромеханические характеристики  $I_2' = f(\omega)$  для трех законов регулирования класса  $U_{1j}/f_{1j}$

Для короткозамкнутый АД одной из основных является электромеханической характеристикой  $I_1 = f(\omega)$ , отражающая зависимость тока статора  $I_1$  от скорости  $\omega$  (скольжения  $s$ ). Ток статора  $I_1$  определяется путем сложения вектора тока намагничиваний  $\overline{I_0}$  и вектора тока ротора  $\overline{I_2'}$ . Обычно это производится с помощью круговой диаграммы.

Полагая ток намагничиваний АД  $I_0$  реактивным, ток статора  $I_1$  через приведенный ток ротора  $I_2'$  можно найти по формуле [6]:

$$I_1 = \sqrt{I_0^2 + (I_2')^2 + 2 \cdot I_0 \cdot I_2' \cdot \sin \varphi_2}, \quad (56)$$

где

$$\sin \varphi_2 = \frac{x_{\text{кн}} f_{1*}}{\sqrt{(R_1 + \frac{R_2'}{s})^2 + x_{\text{кн}}^2 \cdot f_{1*}^2}}. \quad (57)$$

Механическая характеристик АД при переменных значениях величин и частоты напряжений питания определяется следующим выражением:

$$M = \frac{3 \cdot U_{1j}^2 \cdot R_2'}{\omega_{0j} \cdot s \left[ X_{\text{кн}}^2 \cdot f_{1*}^2 + \left( R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + \left( \frac{R_1 \cdot R_2'}{s \cdot X_{\text{мн}} \cdot f_{1*}} \right)^2 \right]}. \quad (58)$$

Механическая характеристик АД имеет критический момента и критическое скольжений, которые определяются обычным способом, положив  $dM/ds = 0$ . Тогда критический момент:

$$M_{\text{кж}} = \frac{3 \cdot U_{1j}^2}{2 \cdot \omega_{0j} \left[ R_1 \pm \sqrt{(R_1^2 + X_{\text{кн}}^2 \cdot f_{1*}^2) \left( 1 + \frac{R_1^2}{X_{\text{мн}}^2 \cdot f_{1*}^2} \right)} \right]}, \quad (59)$$

где  $\omega_{0j} = \frac{\pi \cdot f_{1j}}{p}$  – синхронная угловая скорость;  $U_{1j}$  – фазное напряжение обмоток статора АД.

Критическое скольжение:

$$s_{\text{кж}} = \pm R_2' \sqrt{\frac{1 + (R_1/X_{\text{мн}} \cdot f_{1*})^2}{R_1^2 + X_{\text{кн}}^2 \cdot f_{1*}^2}}. \quad (60)$$

Знак (+) означает, что критический момент и скольжение относятся к двигательному режиму, знак (–) – к генераторному режиму рекуперативного торможения.

## 2 Выбор двигателя, расчёт параметров и построение механических и электромеханических характеристик

### 2.1 Выбор двигателя

Выбор двигателя осуществляется по методике, описанной в источнике [9].

Определяем диапазон регулирования:

$$D = \frac{n_{\max}}{n_{\min}} = \frac{1500}{350} = 4$$

Для удовлетворительного функционирования достаточно принять равным:

$$1,5 \cdot n_{\text{об.0}} \geq n_{\max}, \text{ тогда } n_{\text{об.0}} \geq \frac{n_{\max}}{1,5} \geq \frac{1500}{1,5} \geq 1000, \text{ об/мин.}$$

Следовательно, синхронная скорость двигателя должна быть не менее 1000 об/мин.

Согласно исходным данным число пар полюсов  $p = 2$ , тогда:

$$n_{\text{об.0}} = \frac{9,55 \cdot 2\pi \cdot f_c}{p} = \frac{9,55 \cdot 2\pi \cdot 50}{2} = 1500 \text{ об/мин.}$$

Для работы двигателя с двумя парами полюсов на максимальной скорости частота напряжения статора будет равна:

$$f_{\max} = \frac{n_{\max} \cdot f_{\text{ном}}}{n_{\text{об.0}}} = \frac{1480 \cdot 50}{1500} = 49,3 \text{ Гц.}$$

А для работы двигателя с двумя парами полюсов на минимальной скорости требуется снижение частоты напряжения статора до уровня:

$$f_{\min} = \frac{n_{\min} \cdot f_{\text{ном}}}{n_{\text{об.0}}} = \frac{350 \cdot 50}{1500} = 11,7 \text{ Гц.}$$

Момент нагрузки, создаваемый механизмом, не изменяется по величине на протяжении всего диапазона регулирования, то есть должны выполняться следующие условия:

$$M_{\text{дв.мин}} \geq M_{\text{мех}} , M_{\text{дв.мах}} \geq M_{\text{мех}} .$$

В соответствии с рисунком 14, для двигателя с самовентиляцией при частоте 49,3 Гц необходимо ограничение момента на уровне  $1,03 \cdot M_{\text{дв.ном}}$ .

Следовательно, при максимальной скорости необходимо выполнение условия:

$$1,03 \cdot M_{\text{дв.тр}} \geq M_{\text{мех}} , \text{ т.е. } M_{\text{дв.тр}} \geq \frac{M_{\text{мех}}}{1,03} ,$$

где  $M_{\text{дв.тр}}$  - требуемый момент двигателя.

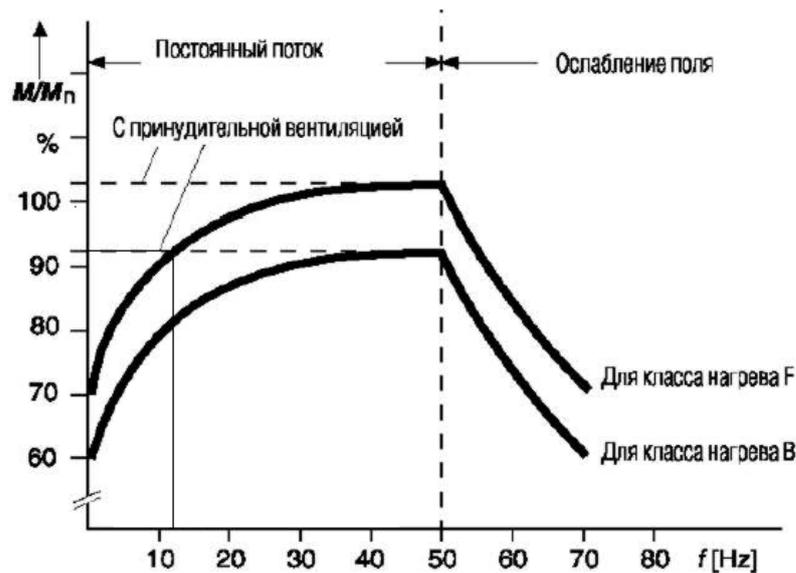


Рисунок 14 – Нагрузочная характеристика асинхронного двигателя при частотном регулировании

При работе на частоте 11,7 Гц для двигателя с самовентиляцией необходимо ограничение момента на уровне  $0,92 \cdot M_{\text{дв.ном}}$ . Следовательно, при минимальной скорости должно выполняться следующее условие:

$$0,92 \cdot M_{\text{дв.тр}} \geq M_{\text{мех}} , \text{ т.е. } M_{\text{дв.тр}} \geq \frac{M_{\text{мех}}}{0,92} .$$

Из двух условий выбираем минимальное ограничение:

$$M_{\text{дв.тр}} \geq \frac{M_{\text{мех}}}{0,92} \geq \frac{100}{0,92} \geq 108,7 \text{ Нм.}$$

Определим требуемую мощность асинхронного двигателя:

$$P_{тр} \geq \frac{M_{дв.тр} \cdot n_{дв.0}}{9,55} = \frac{108,7 \cdot 1500}{9,55} = 17073,3 \text{ Вт.}$$

В соответствии с номинальной мощностью и числом пар полюсов выбираем двигатель 4А160М4УЗ. Параметры двигателя приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Параметры двигателя

Тип двигателя	4А160М4УЗ
$P_{ном}$ , кВт	18,5
$\omega$ , об / мин	1500
$\cos \phi_n$	0,88
$\eta_n$ , %	0,9
$s_n$	0,027
$I_n / I_n$	7
$M_n / M_n$	2
$M_{макс} / M_n$	2,2
$M_{мин} / M_n$	1,4
$J_{дв.}$ , кг · м <sup>2</sup>	0,32

Так как  $n_{дв.ном} < n_{дв.0}$ , необходимо выполнить дополнительную проверку предварительно выбранного двигателя:

$$M_{дв.ном} = 9,55 \cdot \frac{P_{дв.ном}}{n_{дв.ном}} = 9,55 \cdot \frac{18500}{1480} = 119,4 \text{ Нм.}$$

Условие  $M_{дв.ном} \geq M_{дв.тр}$  выполняется, из чего следует, что выбор двигателя сделан правильно.

## 2.2 Расчёт параметров двигателя

Определение параметров АД будем вести по методике, изложенной в разделе 1.3.1, данные для расчёта возьмём из таблицы 2.

Расчёт параметров произведём с применением программы MATCAD, так как в программе MATCAD можно быстрее определить коэффициент  $\beta$ .

$P_n = 18,5 \text{ кВт}$  – номинальная мощность двигателя;

$U_{1n} = 380 \text{ В}$  – номинальное линейное напряжение;

$U_{1\phi} = 220 \text{ В}$  – фазное напряжение;

$n_0 = 1500 \text{ об/мин}$  – синхронная частота вращения;

$n_n = 1480 \text{ об/мин}$  – номинальная частота вращения;

$\eta_n = 0,9$  – КПД в режиме номинальной мощности (100 %-я нагрузка);

$\cos \phi_n = 0,88$  – коэффициент мощности в режиме номинальной мощности;

$k_i = \frac{I_n}{I_n} = 7 \text{ о.е.}$  – кратность пускового тока;

$k_n = \frac{M_n}{M_n} = 1,4 \text{ о.е.}$  – кратность пускового момента;

$k_{\max} = \frac{M_{\kappa}}{M_n} = 2,3 \text{ о.е.}$  – кратность максимального момента;

Ток холостого хода АД найдём из выражения:

$$I_0 = \sqrt{\frac{I_{11}^2 - (p_* \cdot I_{1n} \cdot (1 - s_n) / (1 - p_* \cdot s_n))^2}{1 - (p_* \cdot (1 - s_n) / (1 - p_* \cdot s_n))^2}} = \\ = \sqrt{\frac{27,074^2 - (0,75 \cdot 35,59 \cdot (1 - 0,022) / (1 - 0,75 \cdot 0,022))^2}{1 - (0,75 \cdot (1 - 0,022) / (1 - 0,75 \cdot 0,022))^2}} = 8,01 \text{ А,}$$

где  $I_{1n} = \frac{P_n}{3 \cdot U_{1\phi} \cdot \cos \phi_n \cdot \eta_n} = \frac{18500}{3 \cdot 220 \cdot 0,88 \cdot 0,895} = 35,59 \text{ А}$  – номинальный ток

статора двигателя;

$s_n = \frac{n_0 - n_n}{n_0} = \frac{1500 - 1480}{1500} = 0,013 \text{ о.е.}$  – номинальное скольжение;

$$I_{11} = \frac{P_* \cdot P_H}{3 \cdot U_{1\phi} \cdot \cos \phi_{p*} \cdot \eta_{p*}} = \frac{0,75 \cdot 18500}{3 \cdot 220 \cdot 0,868 \cdot 0,895} = 27,074 \text{ А} \quad \text{— ток статора}$$

двигателя при частичной нагрузке;

$\cos \phi_{p*} = \cos \phi_H \cdot 0,986 = 0,868$  — коэффициент мощности при частичной нагрузке;

$\eta_{p*} = \eta_H = 0,895$  — КПД при частичной нагрузке;

$p_* = P/P_H = 0,75$  — коэффициент загрузки двигателя.

Из формулы Клосса определим соотношение для расчёта критического скольжения:

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

$$= 0,022 \cdot \frac{2,3 + \sqrt{2,3^2 - (1 - 2 \cdot 0,022 \cdot 1 \cdot (2,3 - 1))}}{1 - 2 \cdot 0,022 \cdot 1 \cdot (2,3 - 1)} = 0,102 \text{ о.е.}$$

Значение коэффициента  $\beta$  определяем по методике изложенной в разделе 1.3.1, с применением программы MATHCAD.

Далее определяем ряд промежуточных коэффициентов:

$$C_1 = 1 + \frac{I_0}{2 \cdot k_i \cdot I_{1H}} = 1 + \frac{8,11}{2 \cdot 7 \cdot 35,392} = 1,016 ;$$

$$A_1 = \frac{m \cdot U_{1\phi}^2 \cdot (1 - s_H)}{2 \cdot C_1 \cdot k_{\max} \cdot P_H} = \frac{3 \cdot 220^2 \cdot (1 - 0,022)}{2 \cdot 1,016 \cdot 2,3 \cdot 18500} = 1,642 ;$$

$$A_0 = \frac{I_{1H} \cdot \cos \phi_H - I_0 \cos \phi_0}{U_{1\phi}} = \frac{35,59 \cdot 0,88 - 8,01 \cdot 0,139}{220} = 0,137 ;$$

где  $\cos \phi_0 = \cos 82^\circ = 0,139$  — коэффициент мощности асинхронного двигателя в режиме холостого хода;

$$B = \frac{1}{s_H} + \frac{1}{s_{\kappa}} - A_0 \cdot 2 \cdot \frac{A_1}{s_H} = \frac{1}{0,022} + \frac{1}{0,102} - 0,137 \cdot 2 \cdot \frac{1,642}{0,022} = 42,746 ;$$

$$C = \frac{1}{s_H \cdot s_{\kappa}} - \left( \frac{1}{s_{\kappa}^2} + \frac{1}{s_H^2} \right) \cdot A_0 \cdot A_1 = \frac{1}{0,022 \cdot 0,102} - \left( \frac{1}{0,102^2} + \frac{1}{0,022^2} \right) \times$$

$$\times 0,136 \cdot 1,711 = -43,187$$

Теперь по найденным значениям проверяем величину коэффициента  $\beta$ :

$$\beta_p = \left| \frac{-B}{2} + \sqrt{\frac{B}{2} - C} \right| = \left| \frac{-42,746}{2} + \sqrt{\frac{42,746}{2} - (-43)} \right| = 13,338.$$

Активное сопротивление ротора, приведённое к обмотке статора АД:

$$R_2' = \frac{A_1}{\left(\beta + \frac{1}{s_\kappa}\right) \cdot C_1} = \frac{1,642}{\left(1 + \frac{1}{0,102}\right) \cdot 1,016} = 0,15 \text{ Ом}$$

Активное сопротивление статорной обмотки определим по следующему выражению:

$$R_1 = C_1 \cdot R_2' \cdot \beta = 1,016 \cdot 0,15 \cdot 1 = 0,152 \text{ Ом}$$

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

$$\gamma = \sqrt{\frac{1}{s_\kappa^2} - \beta^2} = \sqrt{\frac{1}{0,102^2} - 1^2} = 9,722,$$

$$\text{Тогда } X_{\text{кн}} = \gamma \cdot C_1 \cdot R_2' = 9,722 \cdot 1,016 \cdot 0,15 = 1,482 \text{ Ом}$$

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

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

$$X_{2H}' = \frac{0,58 \cdot X_{\text{кн}}}{C_1} = \frac{0,58 \cdot 1,482}{1,016} = 0,846 \text{ Ом}.$$

Индуктивное сопротивление статорной обмотки определим по следующему выражению:

$$X_{1H} = 0,42 \cdot X_{\text{кн}} = 0,42 \cdot 1,482 = 0,622 \text{ Ом}.$$

Согласно векторной диаграмме (рисунок б) ЭДС ветви намагничивания, наведённая потоком воздушного зазора в обмотке статора в номинальном режиме, равна:

$$E_1 = \sqrt{(U_{1\phi} \cdot \cos \phi_H - R_1 \cdot I_{1H})^2 + (U_{1H} \cdot \sin \phi_H - X_{1H} \cdot I_{1H})^2} =$$

$$= \sqrt{(220 \cdot 0,88 - 0,152 \cdot 35,59)^2 + (220 \cdot 0,475 - 0,622 \cdot 35,59)^2} = 205,402 \text{ В}$$

Тогда индуктивное сопротивление намагничивания:

$$X_{\mu H} = \frac{E_m}{I_0} = \frac{205,402}{8,01} = 25,642 \text{ Ом}$$

### 2.3 Механические характеристики асинхронного двигателя

Для построения механической характеристики двигателя при его работе определим критический момент машины в двигательном режиме:

$$M_{\kappa} = \frac{m \cdot U_{1\phi}^2}{2 \cdot \omega_0 \cdot C_1 \cdot \left[ R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_{KH}^2} \right]} =$$

$$= \frac{3 \cdot 220^2}{2 \cdot 157,08 \cdot 1,016 \cdot \left[ 0,152 + \sqrt{0,152^2 + 1,482^2} \right]} = 277,082 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

где  $\omega_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot 50}{p} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 50}{p} = 157,08 \text{ об / мин}.$

Задаваясь диапазоном изменения скорости от 0 до  $\omega$  с шагом 0,1, строим механическую характеристику АД по формуле:

$$M(\omega) = \frac{3 \cdot U_{1H}^2 \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} \cdot \left[ \left( R_1 + \frac{R_2'}{\frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}} \right)^2 + X_{KH}^2 \right]}. \quad (61)$$

Механическая характеристика, при работе двигателя изображена на рисунке 15, характеристика 1.

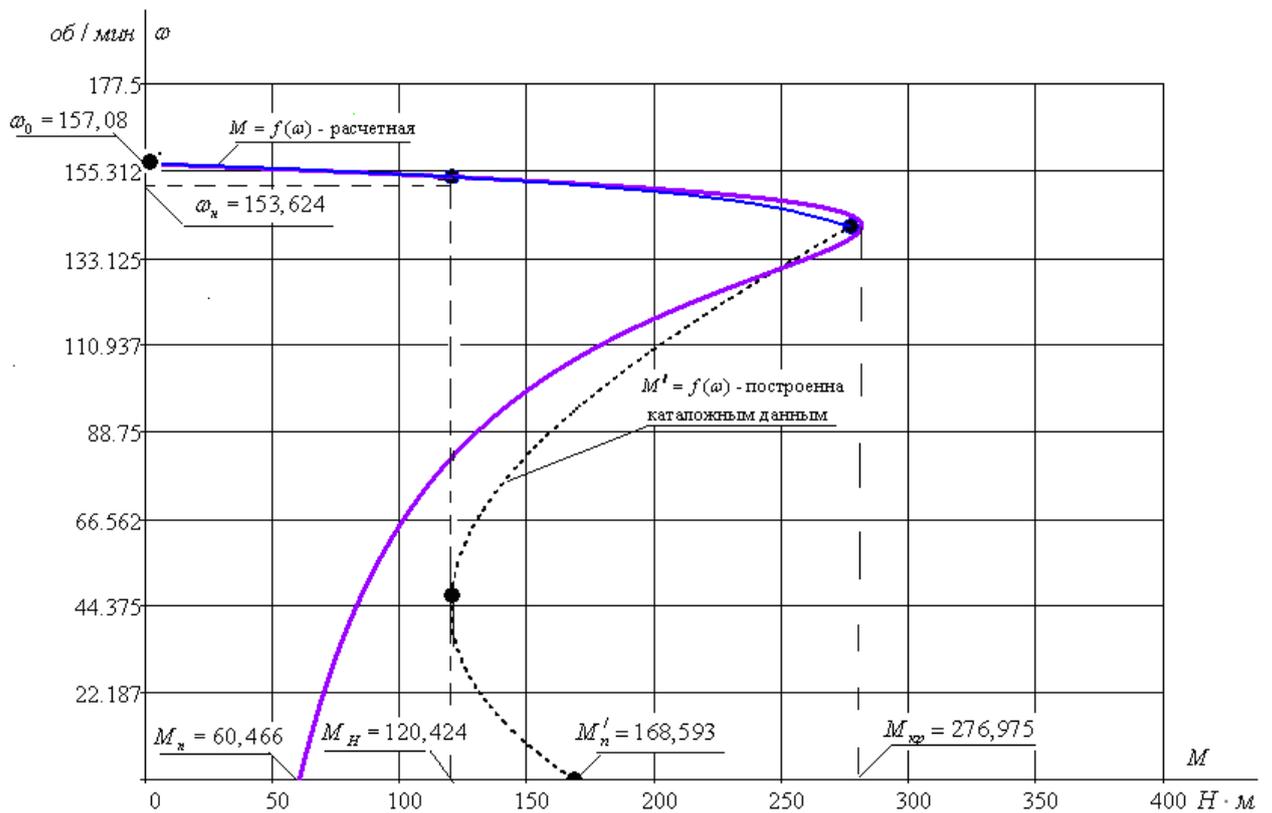


Рисунок 15 - Механические характеристики асинхронного двигателя  
 $M = f(\omega)$

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

Момент номинальный:

$$M_{n(\text{паспорт})} = \frac{P_n}{\omega_n} = \frac{18500}{153,624} = 120,424 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

то же значение, но по формуле Клосса:

$$M_n = \frac{2 \cdot M_k \cdot (1 + a \cdot s_k)}{\frac{s_k}{s_n} + \frac{s_n}{s_k} + 2 \cdot a \cdot s_k} = \frac{2 \cdot 277,082 \cdot (1 + 1,013 \cdot 0,102)}{\frac{0,102}{0,022} + \frac{0,022}{0,102} + 0,206} = 120,881 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

где коэффициент  $a$  равен:  $a = \frac{R_1}{R_2'} = \frac{0,152}{0,115} = 1,013$ .

Момент критический:

$$M_k = k_{\text{max}} \cdot M_{n(\text{паспорт})} = 2,3 \cdot 120,424 = 276,975 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Пусковой момент:

$$M_n = k_n \cdot M_{n(\text{паспорт})} = 1,4 \cdot 120,424 = 168,593 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

то же значение, но по формуле Клосса:

$$M_n = \frac{2 \cdot M_k \cdot (1 + a \cdot s_k)}{\frac{s_k}{s_n} + \frac{s_n}{s_k} + 2 \cdot a \cdot s_k} = \frac{2 \cdot 277,082 \cdot (1 + 1,018 \cdot 0,102)}{\frac{0,102}{1} + \frac{1}{0,102} + 0,556} = 60,466 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Из полученных данных следует, что построенная механическая характеристика справедлива только в области близкой к номинальным скоростям. Характеристика соответствующая паспортным данным изображена пунктирной линией.

Из полученных данных следует, что построенная механическая характеристика соответствует паспортным данным.

## 2.4 Электромеханические характеристики асинхронного двигателя

Для короткозамкнутого АД 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  $\bar{I}'_2$  (рисунок 6). 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:

$$I_1 = \sqrt{I_0^2 + (I'_2)^2 + 2 \cdot I_0 \cdot I'_2 \cdot \sin \varphi_2}, \quad (62)$$

где

$$I_2' = \frac{U_{1\phi}}{\sqrt{\left( R_1 + \frac{R_2'}{\omega_0 - \omega} \right)^2 + X_{кн}^2}}, \quad (63)$$

$$\sin \phi_2 = \frac{X_{кн}}{\sqrt{\left( R_1 + \frac{R_2'}{\omega_0 - \omega} \right)^2 + X_{кн}^2}}. \quad (64)$$

Для построения электромеханических характеристик подставим численные значения в формулы (62) – (64).

$$I_1(\omega) = \sqrt{8,01^2 + (I_2'(\omega))^2 + 2 \cdot 8,01 \cdot I_2'(\omega) \cdot \sin \phi_2(\omega)},$$

$$I_2'(\omega) = \frac{220}{\sqrt{\left( 0,152 + \frac{0,15}{157,08 - \omega} \right)^2 + 1,482^2}},$$

$$\sin \phi_2(\omega) = \frac{1,482}{\sqrt{\left( 0,152 + \frac{0,15}{157,08 - \omega} \right)^2 + 1,482^2}}.$$

Задаваясь диапазоном изменения скорости от 0 до  $\omega$  с шагом 0,1, строим электромеханическую характеристику асинхронного электродвигателя по формулам для токов обмоток статора и ротора. Электромеханические характеристики двигателя представлены на рисунке 16.

Сравним электромеханические характеристики с паспортными данными.

$$I_n = k_i \cdot I_{1н} = 7 \cdot 35,59 = 249,13 \text{ А},$$

Можно сделать вывод, что построенная электромеханическая характеристика, также, как и механическая справедлива только в области близкой к номинальным скоростям.

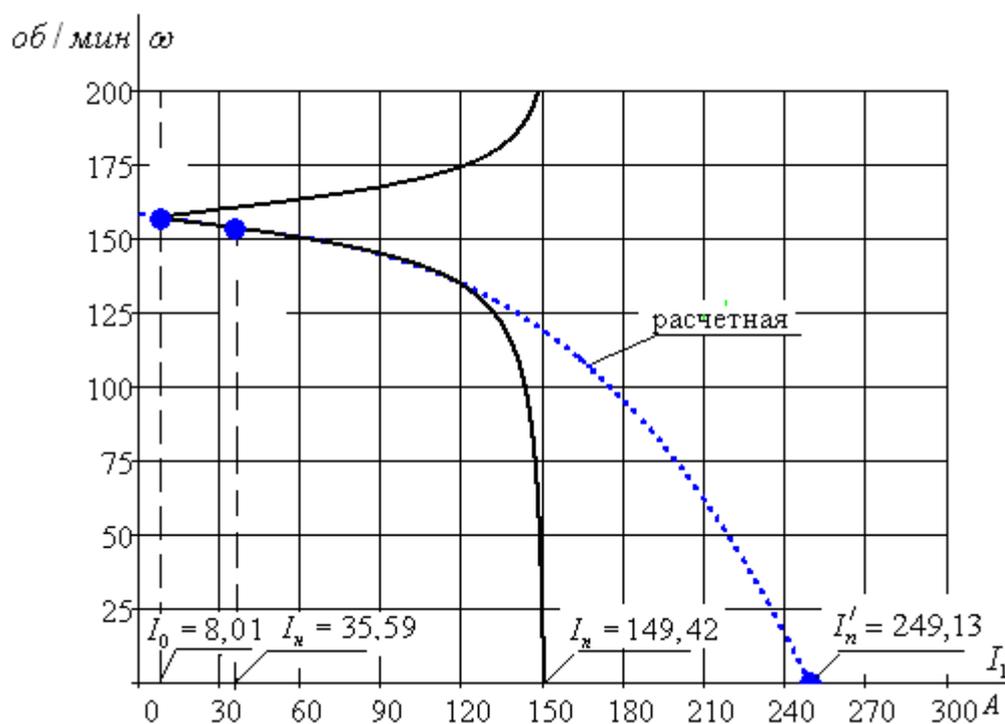


Рисунок 16 – Электромеханическая характеристика двигателя  $I_1 = f(\omega)$

## 2.5 Расчет динамических характеристик асинхронного двигателя 4A160M4УЗ

Так как параметры схемы замещения АД найдены с помощью методики, допускающей определенную погрешность, то для окончательной проверки правильности их нахождения, проверим асинхронный электропривод в динамике. Моделирование электропривода, выполненного по системе «Преобразователь частоты - асинхронный двигатель» (ПЧ-АД) будем производить в абсолютных единицах, так как современные программные средства для численных вычислений, расчетов и математического моделирования, например, MATLAB позволяют автоматически устанавливать

масштаб моделирования независимо от мощности двигателя или его параметров.

Схема имитационной модели АД в программной среде MATLAB-Simulink с демультиплексором вывода параметров приведена на рисунке 17.

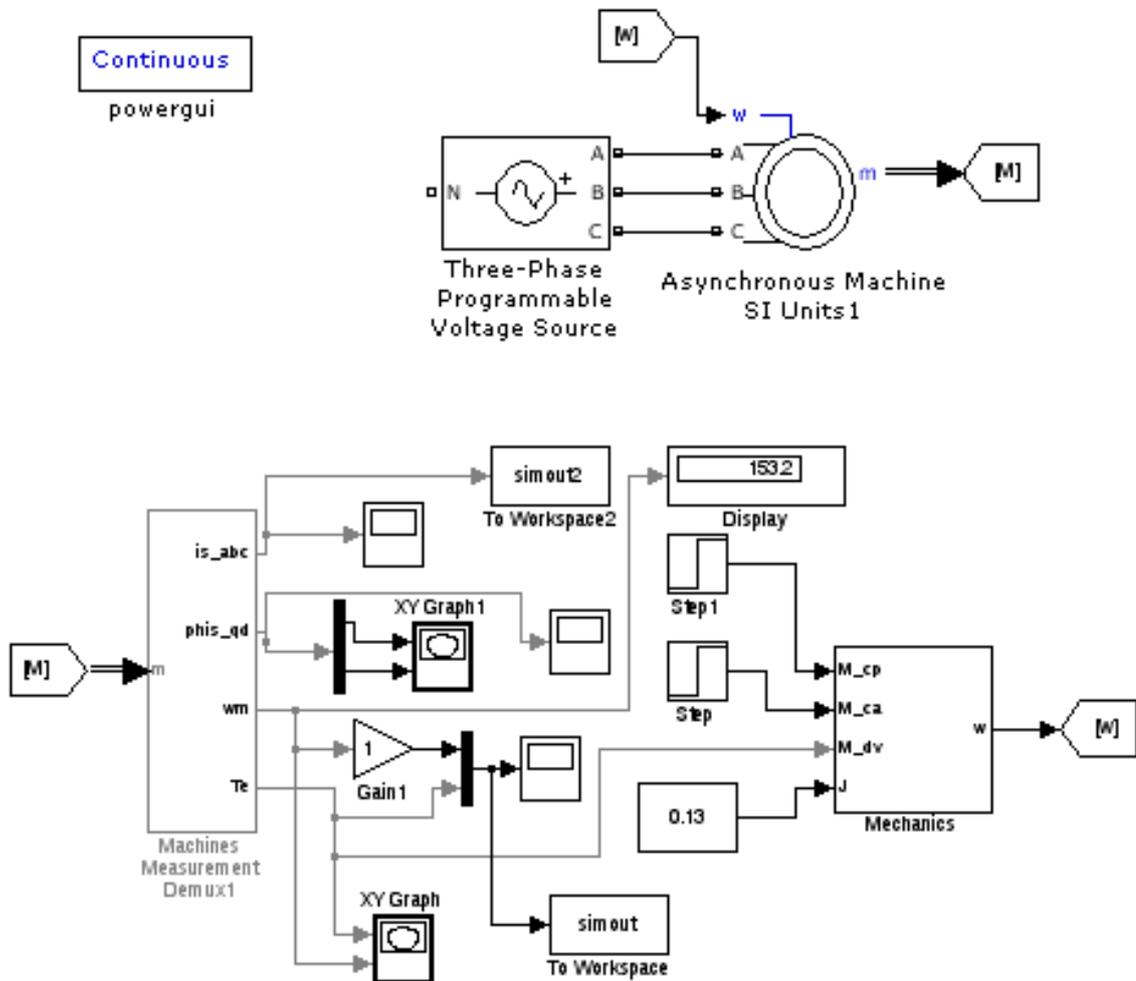


Рисунок 17 – Схема имитационной модели АД в программной среде MATLAB-Simulink с демультиплексором вывода параметров

Ввод параметров схемы замещения АД произведен через диалоговое окно (рисунок 18), которое вызывается двойным щелчком по изображению двигателя.

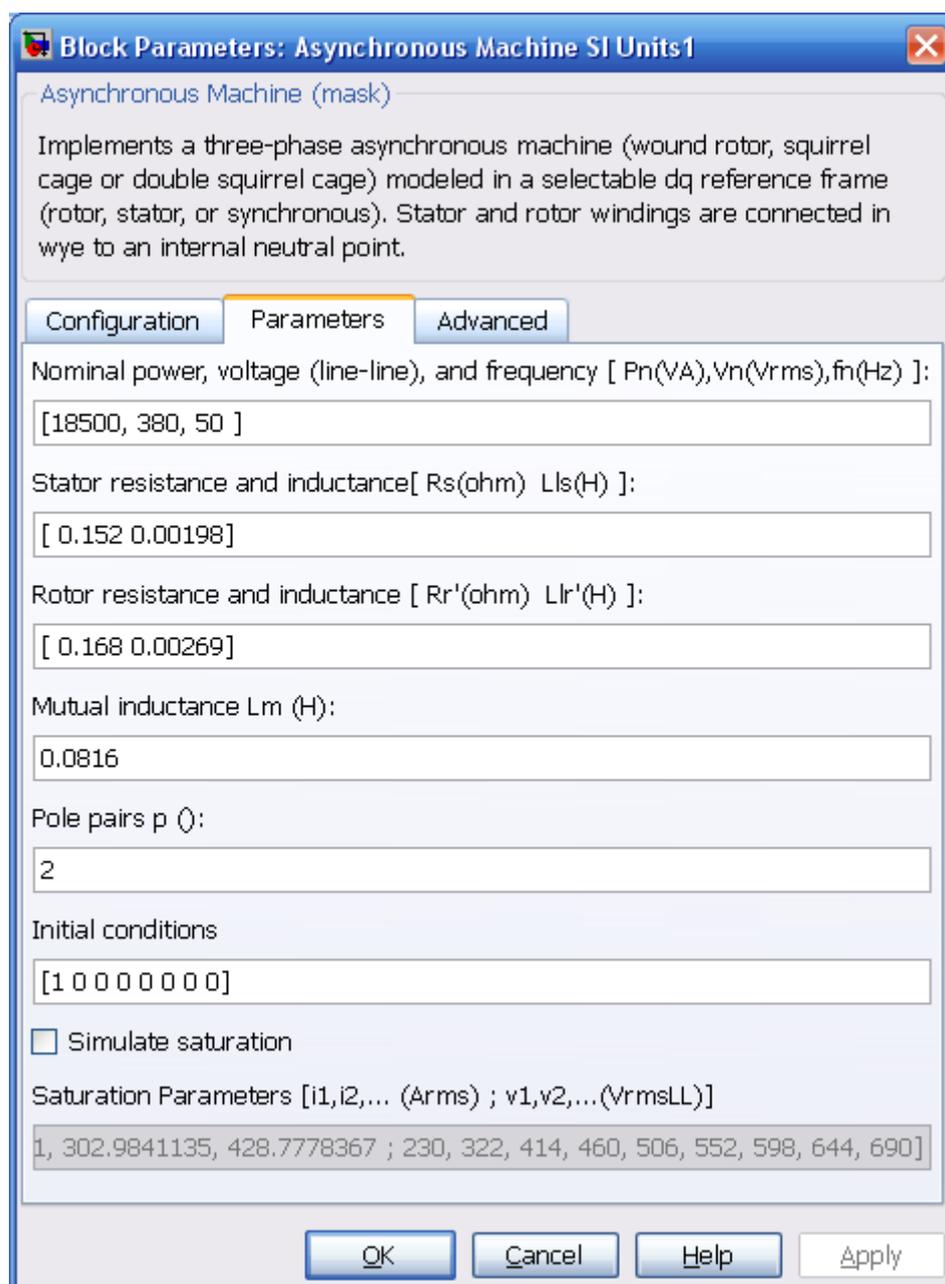


Рисунок 18 – Окно ввода параметров схемы замещения асинхронного двигателя

Графики переходных процессов скорости  $\omega = f(t)$  и момента  $M = f(t)$  при пуске асинхронного электродвигателя прямым включением в сеть приведены на рисунке 19.

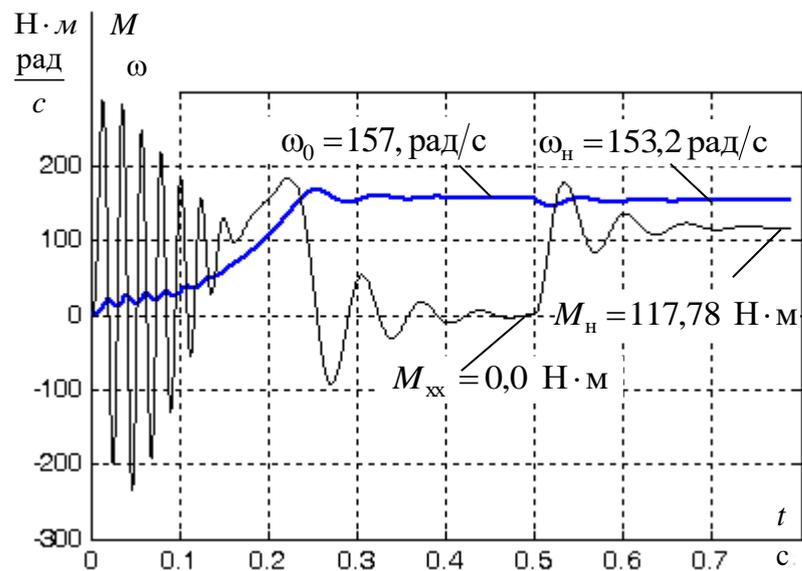


Рисунок 19 – Графики переходных процессов скорости  $\omega = f(t)$  и момента  $M = f(t)$  при пуске асинхронного электродвигателя прямым включением в сеть

Основные показатели качества для характеристики скорости:

- перерегулирование –  $\sigma = 3,4\%$ ,
- время регулирования -  $t_p = 0,33$  с,
- установившееся значение скорости -  $\omega_{уст} = 153,2$  рад/сек.

Анализ графиков показывает, что при обработке переходных процессов без нагрузки (режим идеального холостого хода) АД разогнался до синхронной скорости  $\omega_0 = 157,0 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$ , его электромагнитный момент установился равным нулю.

В момент времени  $t = 0,5$  с на валу двигателя произведен наброс нагрузки, равный номинальному моменту двигателя  $M_c = 117,78$  Н·м. При обработке возмущающего воздействия установившаяся скорость двигателя уменьшилась до номинальной скорости  $\omega_n = 153,2 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$ , электромагнитный

момент в установившемся режиме стал равен статическому моменту на валу двигателя  $M_c = 117,78 \text{ Н}\cdot\text{м}$ .

Анализ переходного момента АД показывает, что максимальный ударный момент при пуске прямым включением в сеть составляет  $290 \text{ Н}\cdot\text{м}$  и превышает номинальный момент  $M_n = 117,78 \text{ Н}\cdot\text{м}$  двигателя в 2,5 раза и может достигнуть недопустимо больших по механической прочности значений для механизма крутильной машины.

Графики переходных процессов тока статора  $I_c = f(t)$ , при пуске АД без токоограничения приведены на рисунке 20.

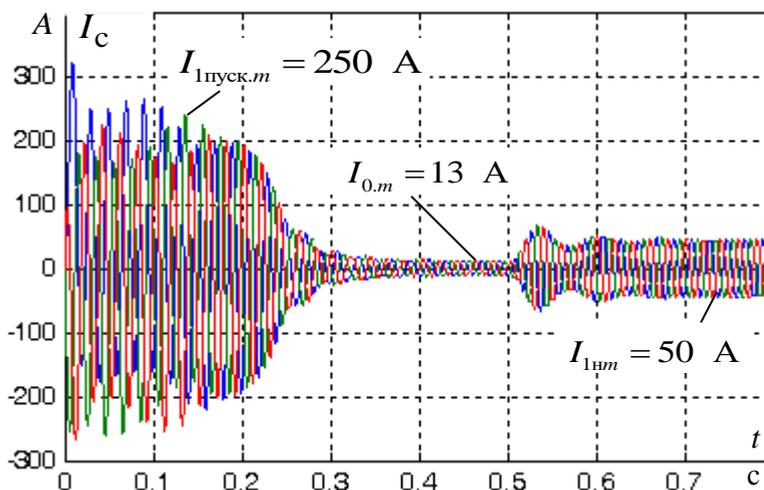


Рисунок 20 – График переходных процессов тока статора  $I_c = f(t)$

Пусковой ток АД, найденный по результатам расчета переходных процессов, составляет:

$$I_{\text{пуск}} = \frac{I_{\text{пуск.м}}}{\sqrt{2}} = \frac{250}{\sqrt{2}} = 177 \text{ А},$$

где  $I_{\text{пуск.м}}$  – амплитудное значение пускового тока статора.

Максимальный ток, потребляемый двигателем при прямом пуске:

$$I_{\text{п}} = k_{\text{т}} \cdot I_{\text{н}} = 7 \cdot 35,59 = 249 \text{ А},$$

где  $k_{\text{т}} = \frac{I_{\text{п}}}{I_{\text{н}}} = 7$  – перегрузочная способность асинхронного двигателя по току;

$I_{\text{н}} = 35,59 \text{ А}$  – номинальный ток обмоток статора асинхронного двигателя.

Расхождения в определении пускового тока объясняются тем, что имитационная модель АД не учитывается эффект вытеснения тока на поверхность проводников ротора и насыщение зубцов ротора возникающие при пуске.

Номинальный ток статора двигателя, найденный по результатам расчета переходных процессов:

$$I_{1н} = \frac{I_{1нм}}{\sqrt{2}} = \frac{50}{\sqrt{2}} = 35,46 \text{ А},$$

где  $I_{1нм}$  – амплитудное значение номинального тока статора (рисунок 20) незначительно отличается от номинального тока статора (35,59 А) паспортных данных двигателя.

На основании исследований, проведенных в разделе 2, можно сделать следующие выводы:

- Анализ графиков переходных процессов тока, скорости и момента показывает, что АД с найденными параметрами схемы замещения является устойчивым звеном и эти параметры можно использовать в дальнейшем при исследовании и настройке систем регулирования с применением данного двигателя.
- Имитационная модель силовой цепи асинхронного электропривода с автономным инвертором напряжения, созданная в программной среде MATLAB адекватно отображает переходные режимы, в короткозамкнутом АД и может быть использована при исследовании его динамических процессов.

### 3. Выбор преобразователя частоты

Современный комплектный преобразователь частоты – это самодостаточное устройство, работающее автономно. Структура преобразователя программно-перестраиваемая с точки зрения реализации различных законов управления. Функции встроенных защит, самодиагностика позволяют свести к минимуму затраты на наладку. Система управления, выполненная на базе цифрового процессора, позволяет обеспечить требуемые характеристики. Выбор преобразователя частоты связан с множеством нюансов как технического, так и экономического характера. Среди основных отметим большое разнообразие компаний-производителей с разными ценовыми предложениями. Выбор преобразователя произведён в соответствии с требованиями к приводу. В соответствии с питающей сетью, мощностью двигателя и характером нагрузки, по таблице 3 выбран преобразователь общего применения Веспер ЕІ – 9011.

Таблица 3 – Выбор преобразователя частоты.

Наименование софт-стартера	Мощность двигателя (кВт)	Номинальный ток (А)
ДМС-010Н	7.5	15
ДМС-015Н	11	22
ДМС-020Н	15	30
ДМС-030Н	22	43
ДМС-040Н	30	57
ДМС-050Н	37	72
ДМС-060Н	45	85
ДМС-075Н	55	104
ДМС-100Н	75	142
ДМС-125Н	93	190
ДМС-150Н	110	204
ДМС-200Н	150	270
ДМС-250Н	185	340
ДМС-300Н	225	420
ДМС-350Н	250	460
ДМС-400Н	315	580
ДМС-550Н	400	710

Применяемые защиты привода согласно [руковод.эксплуатац.веспер]:

- от токов перегрузки и короткого замыкания;
- от замыкания на землю;
- от перенапряжения на силовых элементах схемы;
- от недопустимых отклонений и исчезновения напряжения;
- от недопустимых отклонений технологического параметра (в режиме автоматического регулирования).

Основные характеристики:

- полная мощность преобразователя – 22 кВА;
- номинальный выходной ток – 43 А;
- максимальное выходное напряжение – трехфазное 380/400/415/440/460 В (пропорционально входному напряжению);
- номинальная выходная частота – вплоть до 400 Гц (достигается посредством программирования);

Источник питания:

- номинальное входное напряжение и частота – трехфазное 380/400/440/460 В 50/60 Гц;
- допустимые отклонения напряжения - +10 % - 15 %;
- допустимые отклонения частоты -  $\pm 5\%$ ;

### 3.1 Устройство ПЧ модели EI-9001 «ВЕСПЕР»

Устройство позволяет реализовать частотный и векторный способы управления АД. На рисунке 21 представлена функциональная схема электропривода переменного тока с асинхронным двигателем.

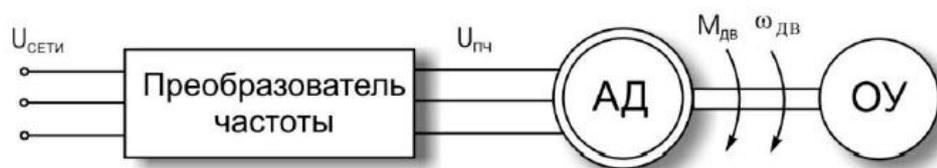


Рисунок 21 – Функциональная схема электропривода переменного тока

Напряжение питающей сети поступает на преобразователь частоты (ПЧ), и далее – подаётся на статорные обмотки АД. Микропроцессорная система управления формирует на выходе ПЧ трёхфазное напряжение требуемой частоты и амплитуды, в зависимости от применяемого закона управления АД.

Функции управления ПЧ выполняет микроконтроллер, по своим параметрам и архитектуре идентичный с 8хС196МН. Функциональная схема микропроцессорной системы управления показана на рисунке 22.

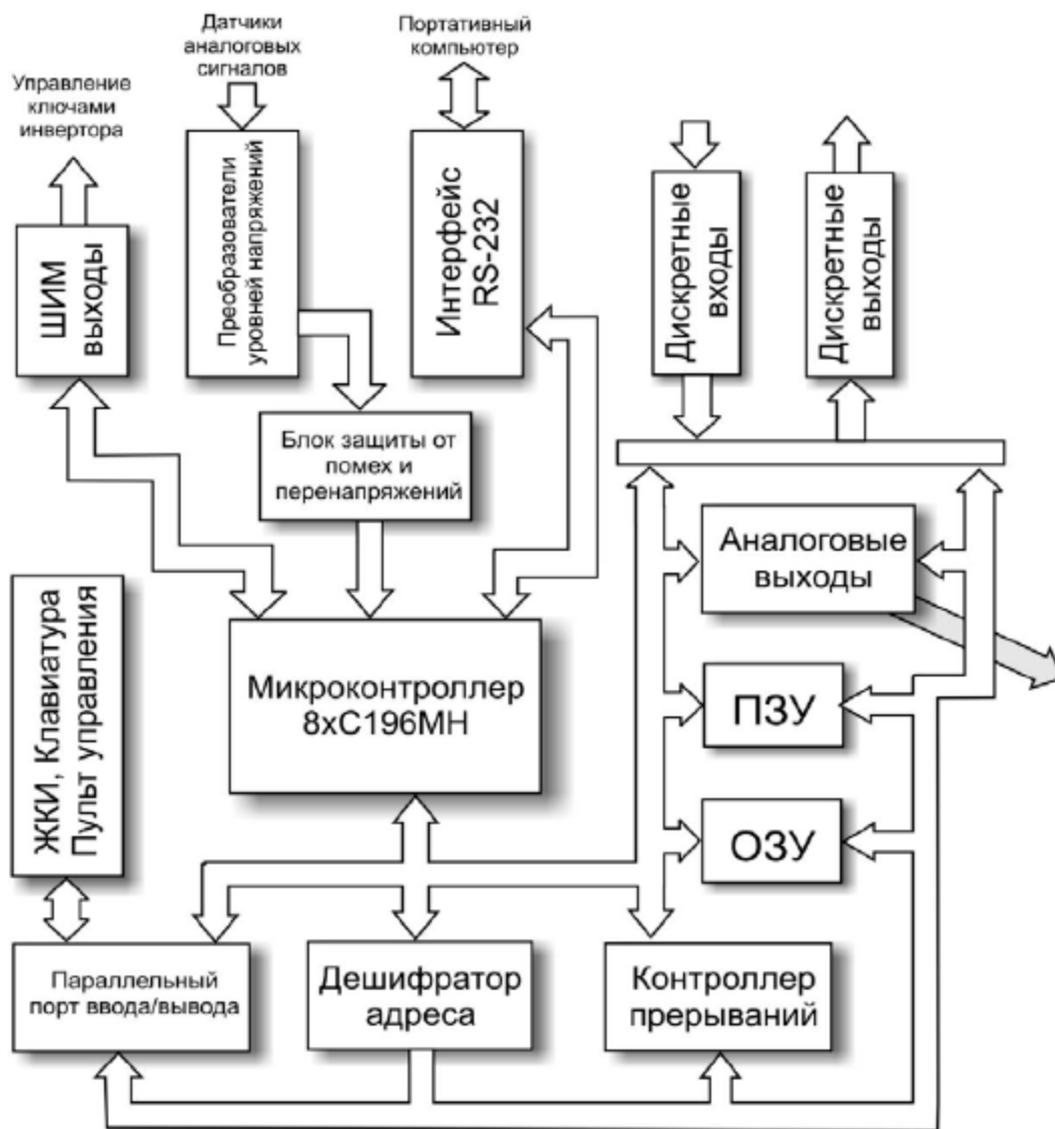


Рисунок 22 – Функциональная схема системы управления ПЧ

Выходы модуляторов ШИМ микропроцессорной системы через микросхемы драйверов IGBT подключаются к силовым ключам инвертора.

Драйверы выполняют функции согласования между транзисторами IGBT и управляющими цепями микропроцессорной системы. Кроме того, данные устройства реализуют защитные функции, снимая управляющие импульсы с силовых ключей при пропадании питающего напряжения и перегрузках по току.

Силовой канал ПЧ собран по схеме с промежуточным звеном постоянного тока и трёхфазным инвертором напряжения (рисунок 23).

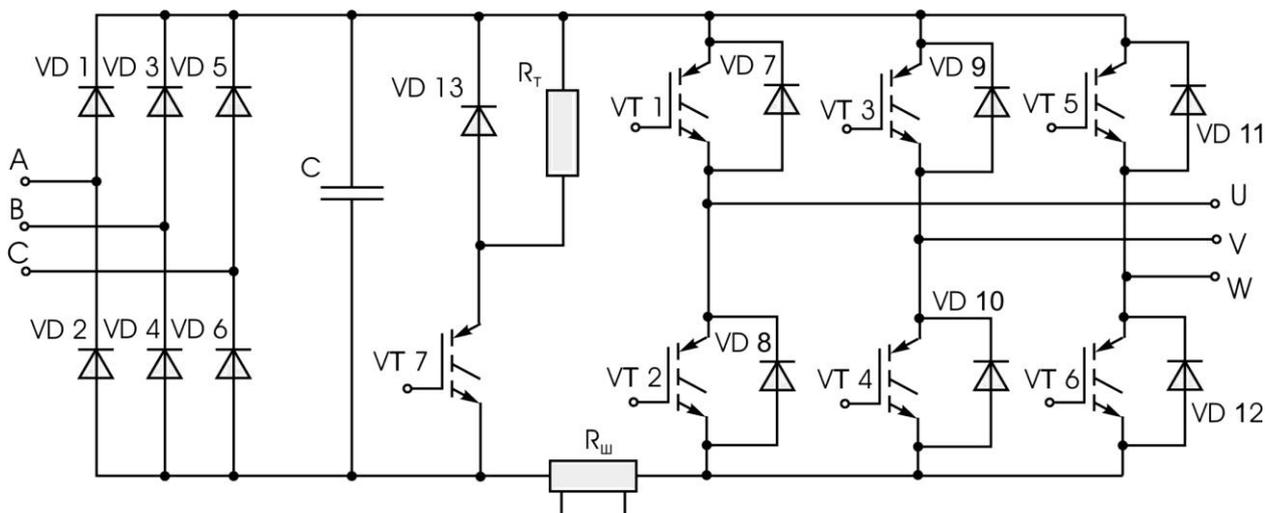


Рисунок 23 – Схема силового канала ПЧ

Переменное напряжение трёхфазной сети, фазы А, В, С поступает на мостовой неуправляемый выпрямитель, диоды VD 1 – VD 6. Выпрямленное напряжение сглаживается электролитическим конденсатором большой ёмкости С и поступает на трёхфазный инвертор VT 1 – VT 6, ключами которого управляет микропроцессорная система. Напряжение на выходе инвертора формируется по закону ШИМ-модуляции и поступает к статорным обмоткам АД, фазы U, V, W. На рисунке 24 представлена функциональная схема электродвигателя.

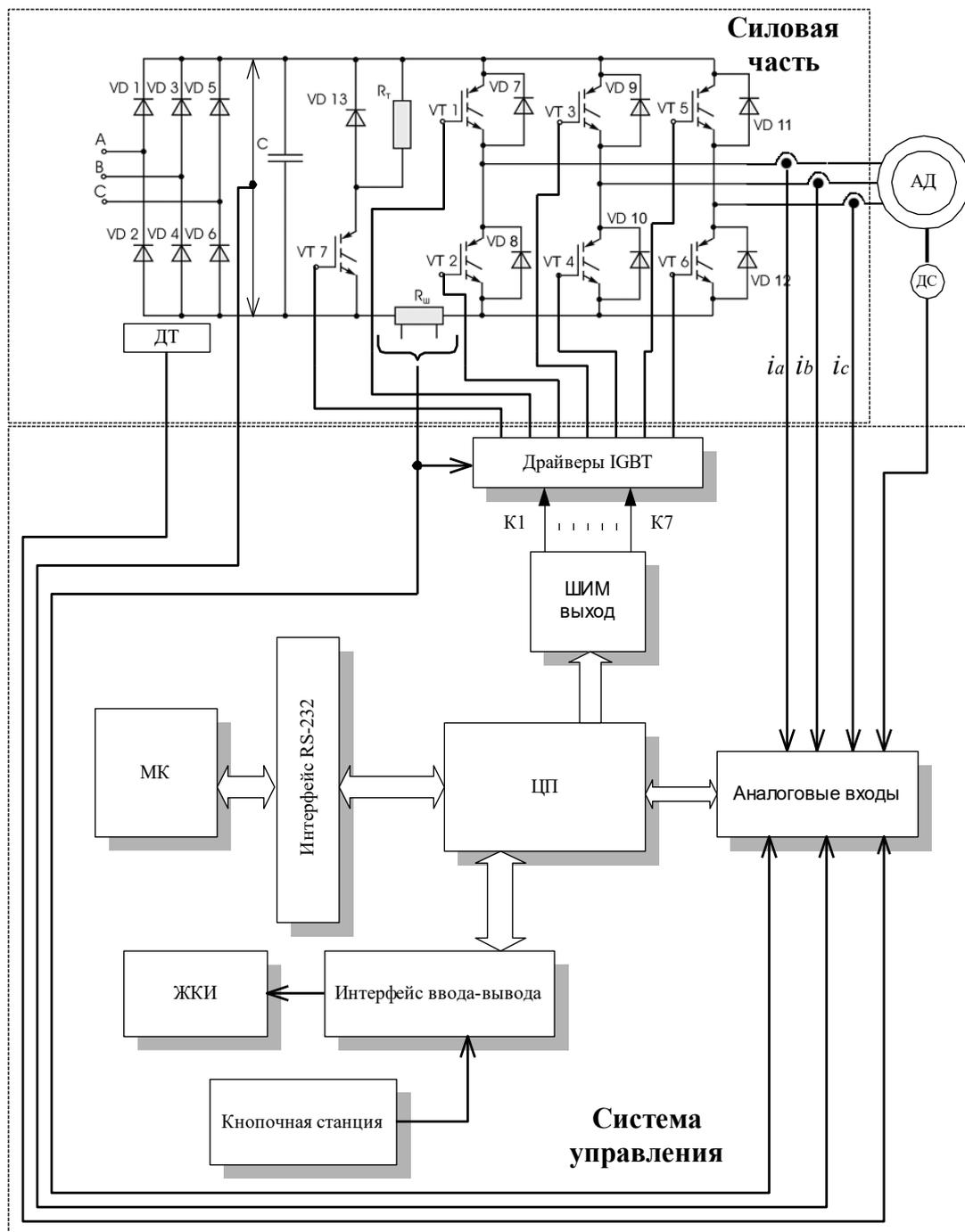


Рисунок 24 – Функциональная схема электропривода

В качестве силовых ключей инвертора используются IGBT транзисторы с высокой нагрузочной способностью. Для исключения токов ЭДС самоиндукции в моменты коммутации и устранения обратных напряжений, параллельно IGBT транзисторам включаются быстродействующие диоды VD 7 – VD 13. Шунт  $R_{ш}$  включён в силовую цепь для контроля за величиной протекающего тока и выполняет функции защиты. Кроме того, в процессе

работы преобразователя происходит постоянный контроль за величиной выпрямленного напряжения.

Конструктивно все элементы преобразователя размещены на двух платах, установленных друг над другом в пластиковом корпусе. На верхней крышке расположен жидкокристаллический индикатор и пульт управления. Непосредственно под крышкой находится основная плата управления. На ней располагаются компоненты микропроцессорной системы и разъёмы для подключения дополнительных и внешних устройств.

На силовой плате размещён силовой модуль с IGBT транзисторами, драйверы, датчики тока, конденсаторы фильтра цепи выпрямленного напряжения, блок питания.

Модуль включает в себя диоды выпрямителя, IGBT транзисторы инвертора, шунт, температурный датчик и дополнительный ключ для «слива» энергии в тормозных режимах. Данный модуль соединён с теплоотводящим радиатором и находится на нижней стороне платы силовых элементов. На этом же радиаторе размещены резистор торможения и температурный датчик для контроля за тепловым режимом.

На рисунке 25 приведена схема подсоединения силовых цепей и цепей управления. В режиме местного управления возможно управление электродвигателем сразу после подсоединения силовых цепей.

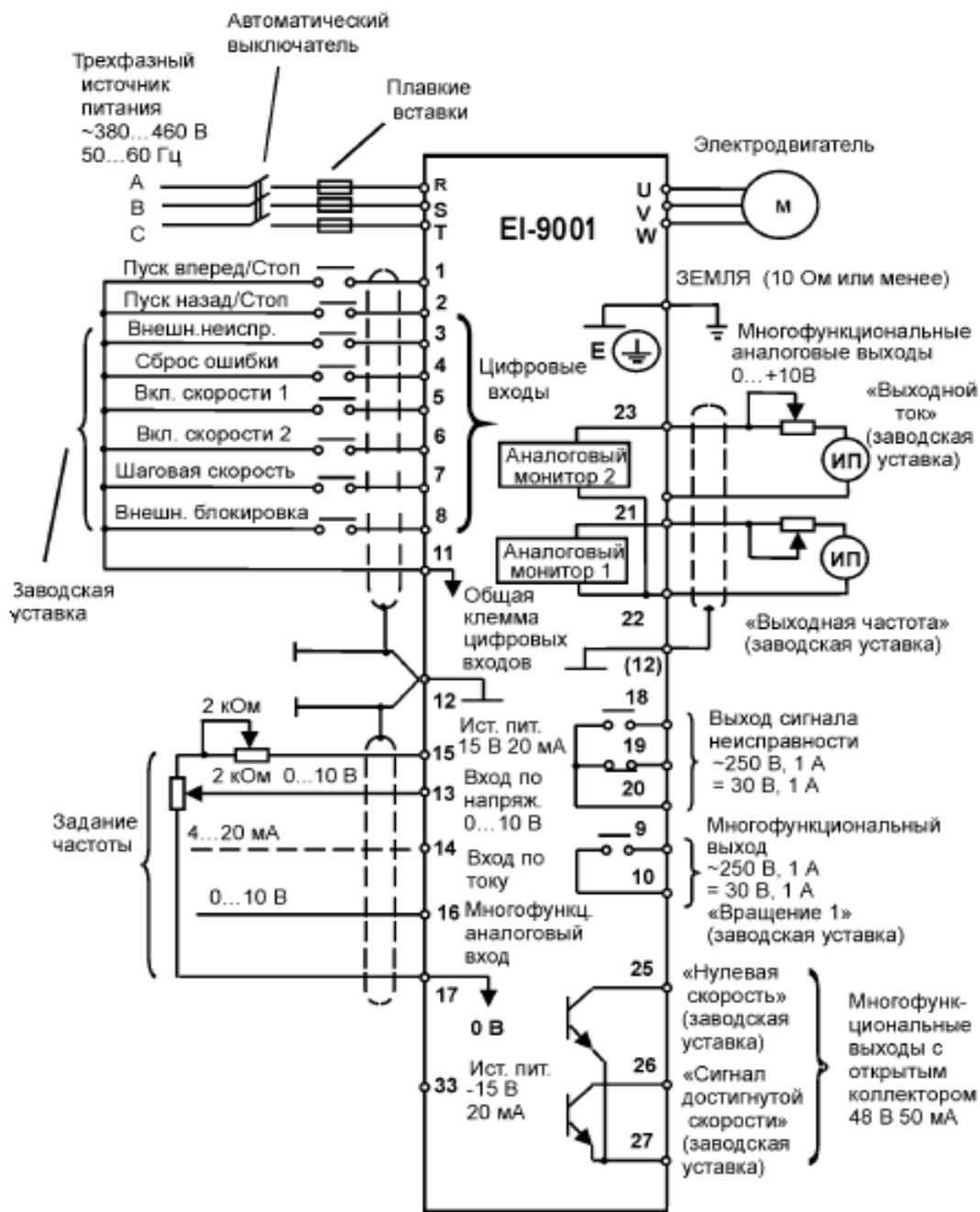


Рисунок 25 – Схема подключения

На рисунке 26 описаны функции клемм управления.

Вид	Клемм	Функция сигнала (заводская уставка)	Описание	Уровень сигнала	
Входные цифровые сигналы	1	Вращение ВПЕРЕД / ОСТАНОВ	Вращение ВПЕРЕД, когда замкнуто, ОСТАНОВ, когда разомкнуто	Вход с оптической развязкой +24 В, 8 мА постоянного тока	
	2	Вращение ОБРАТНОЕ / ОСТАНОВ	ОБРАТНОЕ вращение, когда замкнуто, ОСТАНОВ, когда разомкнуто		
	3	Вход «Внешняя неисправность»	Неисправность, когда замкнуто. Исправно, когда разомкнуто.		
	4	Вход «Сброс защиты»	Сброс защиты, когда замкнуто		
	5	Смена опорных частот. Многоступенчатое регулиров. скорости 1	Вспомогательная опорная частота, когда замкнуто		
	6	Многоступенчатое регулиров. скорости 2	Действует, когда замкнуто		
	7	Включение режима медленного вращения	Вращение с опорной шаговой частотой, когда замкнуто.		
	8	Внешняя блокировка	Снятие напряжения на выходе преобразователя, когда замкнуто		
	11	Общая входная клемма для цифровых входных сигналов	-		
Аналоговые входы	15	Выход источника питания +15 В	Источник питания для аналогового задания +15 В	+15 В (20 мА max)	
	33	Выход источника питания -15 В	Источник питания для аналогового задания -15 В	-15 В (20 мА max)	
	13	Основная опорная частота	От -10 до +10 В / от -100% до +100% ;	От -10 до +10 В (20 кОм); От 0 до +10В (20 кОм)	
	14		От 0 до +10 В / 100% От 4 до 20 мА / 100%		От 4 до 20 мА (250 Ом)
	16	Многофункциональный аналоговый вход	-10 до +10 В / -100% до +100% От 0 до +10 В / 100%	Вспомогательный аналоговый вход	От -10 до +10 В (20 кОм); От 0 до +10 В (20 кОм)
	17	Общая клемма цепи управления	0 В	-	
	12	Экранная клемма	-	-	
Выходные цифровые сигналы	9	Контроль во время вращения (нормально разомкнутый контакт)	Замкнуты при вращении	Выход многофункциональных контактов	Контакт реле: не более ~250 В 1 А; не более =30 В 1 А
	10		При минимальной частоте (E1-09) или менее		
	25	Индикация нулевой скорости	При частоте, соответствующей величине уставки ±1 Гц		Выход с открытым коллектором: не более 48 В 50 мА
	26	Индикация достижения скорости			
	27	Общая клемма выходов с открытым коллектором			-
	18	Выход контактов неисправности (нормально разомкнутые / нормально замкнутые контакты)	Клеммы 18 и 20 замкнуты при неисправности.		Контакт реле: не более ~250 В 1 А; не более =30 В 1 А
19	Клеммы 19 и 20 разомкнуты при неисправности.				
Аналоговые выходы	21	Выход частотомера	От 0 до +10 В / 100% частоты	Многофункциональный аналоговый монитор 1 (H4-01, H4-02)	От 0 до ±10 В Max. ± 5%
	22	Общая клемма			
	23	Выход измерителя тока	10 В / номинальный ток преобразователя	Многофункциональный аналоговый монитор 2 (H4-04, H4-05)	Не более 2 мА

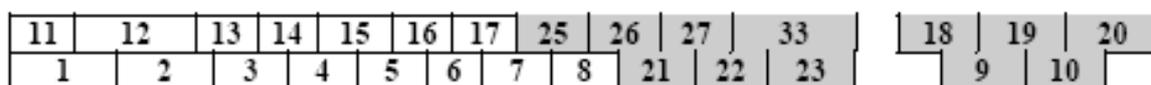


Рисунок 26 – Расположение клемм управления на клеммной колодке

Управление с подачей сигналов с клемм управления. Диаграмма, приведенная на рисунке 27, показывает типовую модель функционирования при использовании сигналов с клемм управления.

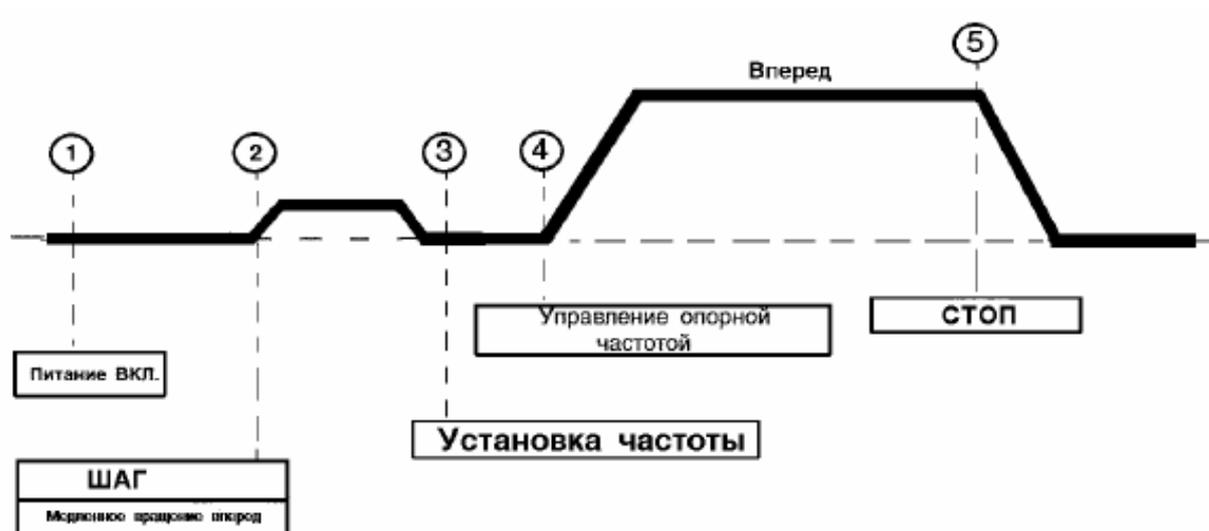


Рисунок 27 – Последовательность операций при подаче сигналов с клемм управления

## 4. Статические характеристики скалярного управления регулируемым электроприводом

### 4.1 Регулирование скорости электропривода с помощью закона

$$U_{1\phi} / f_1 = const$$

В электроприводах со скалярным управлением для регулирования или стабилизации скорости используются различные соотношения между частотой и напряжением. Выбор конкретного соотношения зависит от характера момента нагрузки.

Для двигателя типа 4A160M4УЗ управляемого от преобразователя частоты Веспер ЕІ – 9011, по паспортным данным, параметрам схемы замещения рассчитаем и построим электромеханические и механические характеристики при питании его от статического преобразователя частоты по закону управления:

$$U_{1\phi} / f_1 = const, \text{ для частот питания } f_1 = 50; 25; 10; 5 \text{ Гц.}$$

Определим значения относительных частот, напряжений и синхронных скоростей:

$$f_{1*} = \frac{f_{1j}}{f_{1H}} = \frac{\{50; 25; 10; 5\}}{50} = \{1; 0,5; 0,2; 0,1\} \text{ о.е.};$$

$$U_{1j} = U_{1\phi} \cdot f_{1*} = 220 \cdot \{1; 0,5; 0,2; 0,1\} = \{220; 110; 44; 22\} \text{ В};$$

$$\begin{aligned} \omega_{0j} &= \omega_{0H} \cdot f_{1*} = 157,08 \cdot \{1; 0,5; 0,2; 0,1\} = \\ &= \{157,08; 78,54; 31,416; 15,708\} \text{ рад / с.} \end{aligned}$$

Расчёт электромеханических характеристик будем производить, подставляя в следующие выражения соответствующие для каждой характеристики значения  $f_{1*}, U_{1j}, \omega_{0j}$ . Далее, задаваясь диапазоном значений от нуля до соответствующего для каждой характеристики значения  $\omega_{0j} \cdot 1,25$  с шагом  $0,001 \cdot \omega_{0j}$ , подставляем в выражение для относительного скольжения.

На следующем этапе получившиеся значения относительного скольжения последовательно подставляем в выражение для тока обмотки ротора и статора.

$$\begin{aligned}
 I_{2j}(S) &= \frac{U_{1j}}{\sqrt{X_{kH}^2 \cdot f_{1H}^2 + \left(R_1 + \frac{R_2}{S}\right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2}{S \cdot X_{\mu H} \cdot f_{1*}}\right)^2}} = \\
 &= \frac{U_{1j}}{\sqrt{1,482^2 \cdot f_{1*}^2 + \left(0,152 + \frac{0,15}{S}\right)^2 + \left(\frac{0,152 \cdot 0,15}{S \cdot 28,316 \cdot f_{1*}}\right)^2}}; \\
 I_{1j}(S) &= \sqrt{I_0^2 + I_{2j}^2(S) + 2 \cdot I_0 \cdot I_{2j}(S)} \cdot \frac{X_{kH}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2}{S}\right)^2 + X_{kH}^2}} = \\
 &= \sqrt{8,01^2 + I_{2j}^2(S) + 2 \cdot 8,01 \cdot I_{2j}(S)} \cdot \frac{1,482}{\sqrt{\left(0,152 + \frac{0,15}{S}\right)^2 + 1,482^2}}
 \end{aligned}$$

Построенные характеристики для данного закона управления двигателем изображены на рисунке 28.

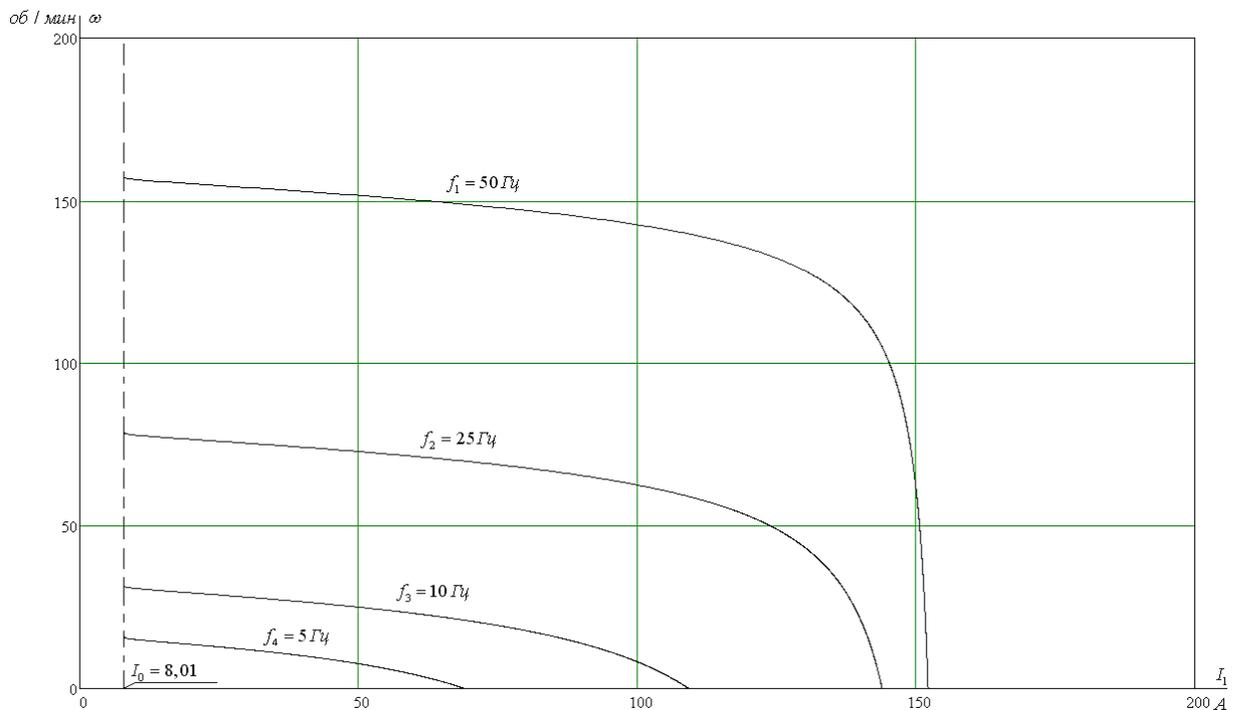


Рисунок 28 - Электромеханические характеристики двигателя при законе регулирования скорости  $U_{1\phi} / f_1 = const$

Для построения механических характеристик асинхронной машины для закона управления  $U_{1\phi} / f_1 = const$ , воспользуемся следующим выражением:

$$M(S) = \frac{3 \cdot U_{1j} \cdot R_2'}{\omega_{0j} \cdot S_j \left[ X_{кн}^2 \cdot f_{1*}^2 + \left( R_1 + \frac{R_2'}{S_j} \right)^2 + \left( \frac{R_1 \cdot R_2'}{S_j \cdot X_{\muн} \cdot f_{1*}} \right)^2 \right]} =$$

$$= \frac{3 \cdot U_{1j} \cdot 0.149}{\omega_{0j} \cdot S_j \left[ 1,482^2 \cdot f_{1*}^2 + \left( 0,152 + \frac{0,15}{S_j} \right)^2 + \left( \frac{0,152 \cdot 0,115}{S_j \cdot 28,316 \cdot f_{1*}} \right)^2 \right]}$$

Механические характеристики двигателя для закона управления  $U_{1\phi} / f_1 = const$ , представлены на рисунке 29.

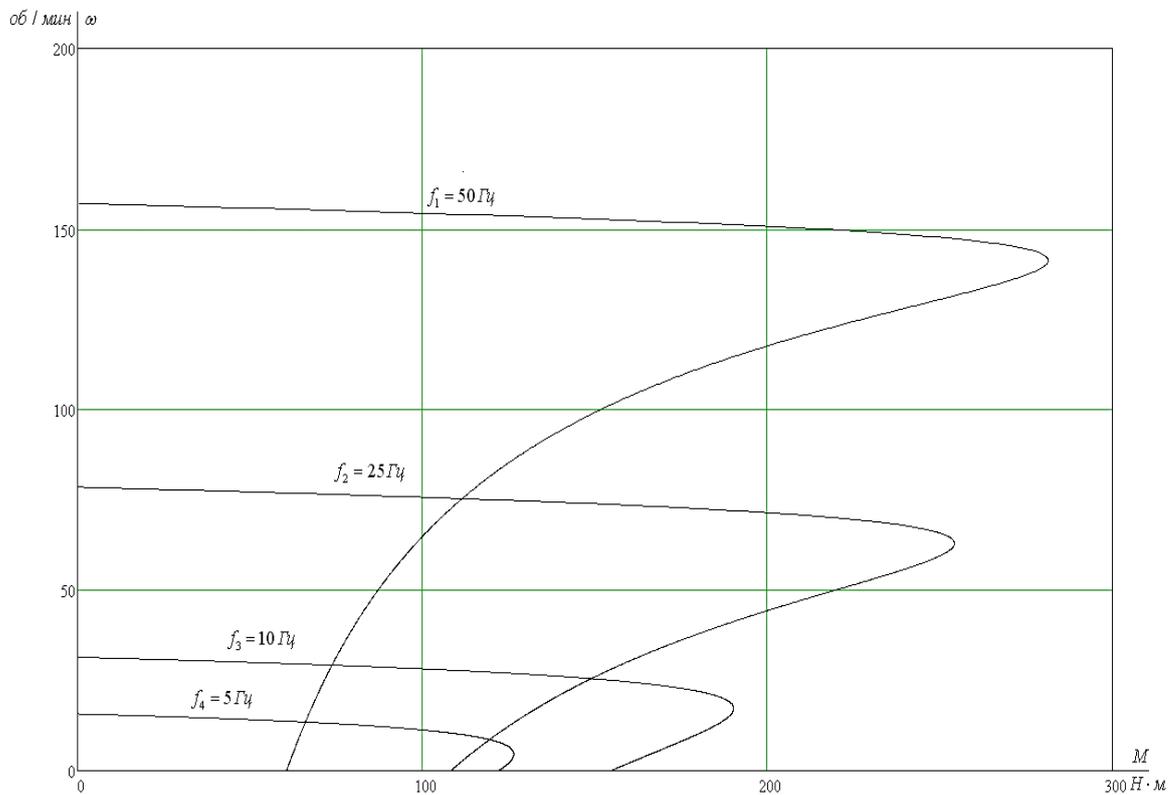


Рисунок 29 - Механические характеристики двигателя при законе регулирования скорости  $U_{1\phi} / f_1 = const$

Электромеханические и механические характеристики двигателя 4А160М4УЗ, для закона регулирования  $U_{1\phi} / f_1 = const$ , построены в математической системе MathCad.

Из построенных характеристик следует, что для данного двигателя при законе управления  $U_{1\phi} / f_1 = const$  с уменьшением частоты питающей сети заметно влияние активного сопротивления обмотки статора. В результате критический момент на малых частотах падает, что для электропривода крутильной машины недопустимо, так как при запуске машины статический момент может возрасти в 1,5 раза.

#### 4.2 Регулирование скорости электропривода с помощью закона $U_{1\phi} / f_1 = const$ с $IR$ -компенсацией

Теоретически и практически доказано, что в классе законов  $U_{1j} / f_{1j}$  невозможно одновременно обеспечить удовлетворительные механические и энергетические характеристики в широком диапазоне скоростей и изменения нагрузки. Основная причина этого – возрастание влияния активного сопротивления обмотки статора при снижении частоты питающего напряжения.

Для регулирования скорости двигателя с постоянным критическим моментом необходимо изменять напряжение по следующему закону  $U_{1j} = U_{1\phi} \cdot f_{1*} + I_{li} \cdot R_1$  (пропорциональное регулирование с  $IR$ -компенсацией) [12]. Чтобы реализовать данную зависимость необходимо организовать положительную обратную связь по току с коэффициентом передачи  $R_1 \cdot K_{км}$ , где величина  $K_{км}$  характеризует степень компенсации падения напряжения на активном сопротивлении обмотки статора. При выборе  $K_{км} = 1$  имеем полную компенсацию  $R_1$ . При полной  $IR$ -компенсации происходит регулирование с законами класса  $E_{1j} / f_{1j} = const$ .

В общем виде расчёт электромеханических и механических характеристик не отличается от предыдущего. Однако при этом необходимо учесть положительную связь по току и постоянно корректировать величину

$U_{1j}$ . Характеристики с  $IR$  – компенсацией были построены в программной среде Mathcad. Текст программы расчёта характеристик представлен в приложении Г.

Механическая характеристика асинхронного двигателя для режима неполной  $IR$ -компенсации, при переменных значениях величины и частоты напряжения питания определяется выражением:

$$M(S) = \frac{3 \cdot U_{1j}^2 \cdot R_2'}{\omega_{0j} \cdot S_j \cdot \left[ X_{кн}^2 \cdot f_{1*}^2 + \left( R_{1экв} + \frac{R_2'}{S_j} \right)^2 + \left( \frac{R_{1экв} \cdot R_2'}{S_j \cdot X_{\muн} \cdot f_{1*}} \right)^2 \right]}, \quad (65)$$

где  $R_{1экв} = R_1 - K_{км} \cdot R_1$  - эквивалентное активное сопротивление цепи обмотки статора.

При полной  $IR$ -компенсации, когда  $K_{км} = 1$ , а  $R_{1экв} = 0$ , механическая характеристика электропривода опишется выражением:

$$M(S) = \frac{3 \cdot U_{1j}^2 \cdot R_2'}{\omega_{0j} \cdot S_j \cdot \left[ X_{кн}^2 \cdot f_{1*}^2 + \left( \frac{R_2'}{S_j} \right)^2 \right]}. \quad (66)$$

Момент критический асинхронного двигателя будет равен:

$$M_k = \frac{3 \cdot U_{1j}^2}{2 \cdot \omega_{0j} \cdot X_{кн} \cdot f_{1*}}, \quad (67)$$

а критическое скольжение:

$$S_{kj} = \pm \frac{R_2'}{X_{кн} \cdot f_{1*}}. \quad (68)$$

Электромеханическая характеристика, определяющая зависимость приведённого тока ротора от скольжения для режима неполной  $IR$ -компенсации:

$$I_2'(S) = \frac{U_{1j}}{\sqrt{\left( R_{1экв} + \frac{R_2'}{S} \right)^2 + X_{кн}^2 \cdot f_{1*}^2 + \left( \frac{R_{1экв} \cdot R_2'}{S \cdot X_{\muн} \cdot f_{1*}} \right)^2}}. \quad (69)$$

Ток статора, через приведённый ток ротора, можно найти по формуле:

$$I_1(S) = \frac{\sqrt{I_0^2 + (I_2'(S))^2 + 2 \cdot I_0 \cdot I_2'(S) \cdot \frac{X_{KH} \cdot f_{1*}}{\sqrt{\left(R_{1\text{экв}} + \frac{R_2'}{S}\right)^2 + X_{KH}^2 \cdot f_{1*}^2}}}}{\sqrt{\left(R_{1\text{экв}} + \frac{R_2'}{S}\right)^2 + X_{KH}^2 \cdot f_{1*}^2}}. \quad (70)$$

При полной  $IR$ -компенсации, выражения 6.21 и 6.22, примут вид:

$$I_2'(S) = \frac{U_{1j}}{\sqrt{\left(\frac{R_2'}{S}\right)^2 + X_{KH}^2 \cdot f_{1*}^2}}, \quad (71)$$

$$I_1(S) = \frac{\sqrt{I_0^2 + (I_2'(S))^2 + 2 \cdot I_0 \cdot I_2'(S) \cdot \frac{X_{KH} \cdot f_{1*}}{\sqrt{\left(\frac{R_2'}{S}\right)^2 + X_{KH}^2 \cdot f_{1*}^2}}}}{\sqrt{\left(\frac{R_2'}{S}\right)^2 + X_{KH}^2 \cdot f_{1*}^2}}. \quad (72)$$

Механические и электромеханические характеристики, построим для различных значений  $IR$ -компенсации, подставив численные значения в уравнения (66); (71); (72).

$$M(S) = \frac{3 \cdot U_{1j}^2 \cdot 0,168}{\omega_{0j} \cdot S_j \cdot \left[ 1,531^2 \cdot f_{1*}^2 + \left(\frac{0,168}{S_j}\right)^2 \right]},$$

$$I_2'(S) = \frac{U_{1j}}{\sqrt{\left(\frac{0,15}{S}\right)^2 + 1,482^2 \cdot f_{1*}^2}},$$

$$I_1(S) = \frac{\sqrt{8,01^2 + (I_2'(S))^2 + 2 \cdot 8,01 \cdot I_2'(S) \cdot \frac{1,482 \cdot f_{1*}}{\sqrt{\left(\frac{0,15}{S}\right)^2 + 1,482^2 \cdot f_{1*}^2}}}}{\sqrt{\left(\frac{0,15}{S}\right)^2 + 1,482^2 \cdot f_{1*}^2}}.$$

Расчёт электромеханических характеристик будем производить, подставляя в эти выражения соответствующие для каждой характеристики значения  $f_{1*}, U_{1j}, \omega_{0j}$ . Задаваясь диапазоном изменения скольжения от единицы до нуля, с шагом равным 0,001, построим характеристики.

Механические характеристики АД для закона регулирования скорости  $U_{1\phi} / f_1 = const$  с IR - компенсацией приведены на рисунке 30, электромеханические – на рисунке 31.

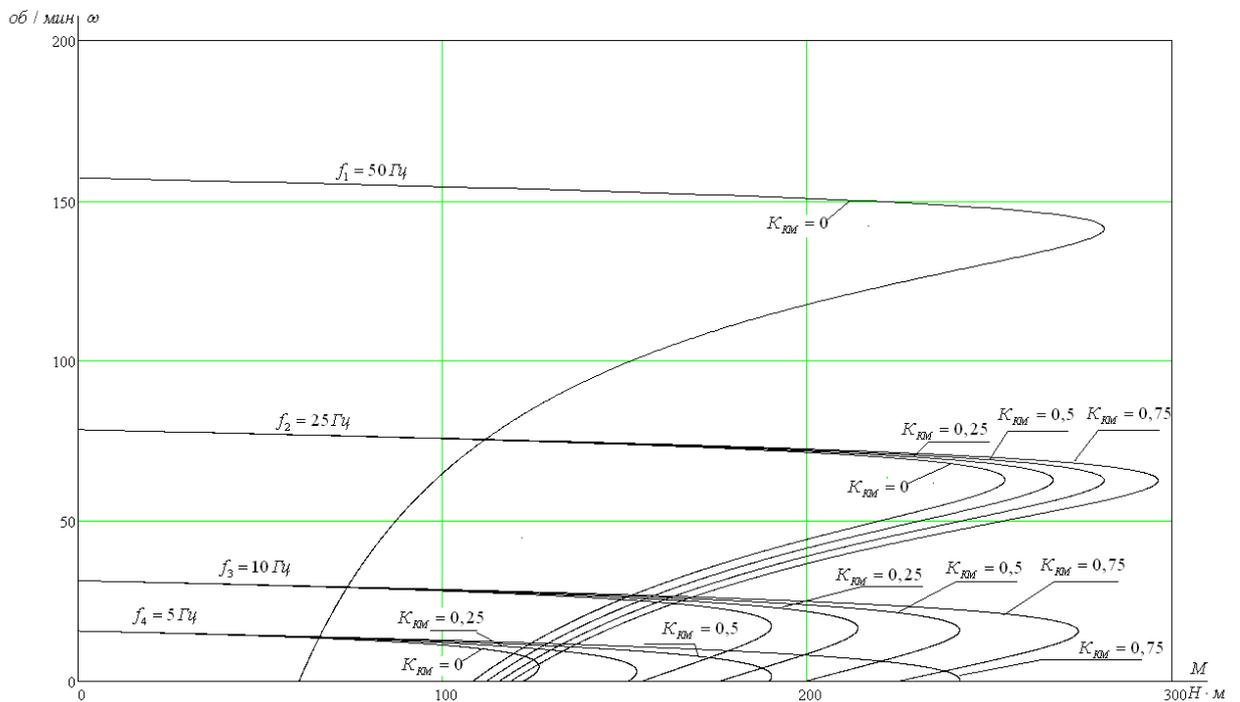


Рисунок 30 – Механические характеристики двигателя 6А160М4УЗ для закона регулирования скорости  $U_{1\phi} / f_1 = const$  с IR – компенсацией

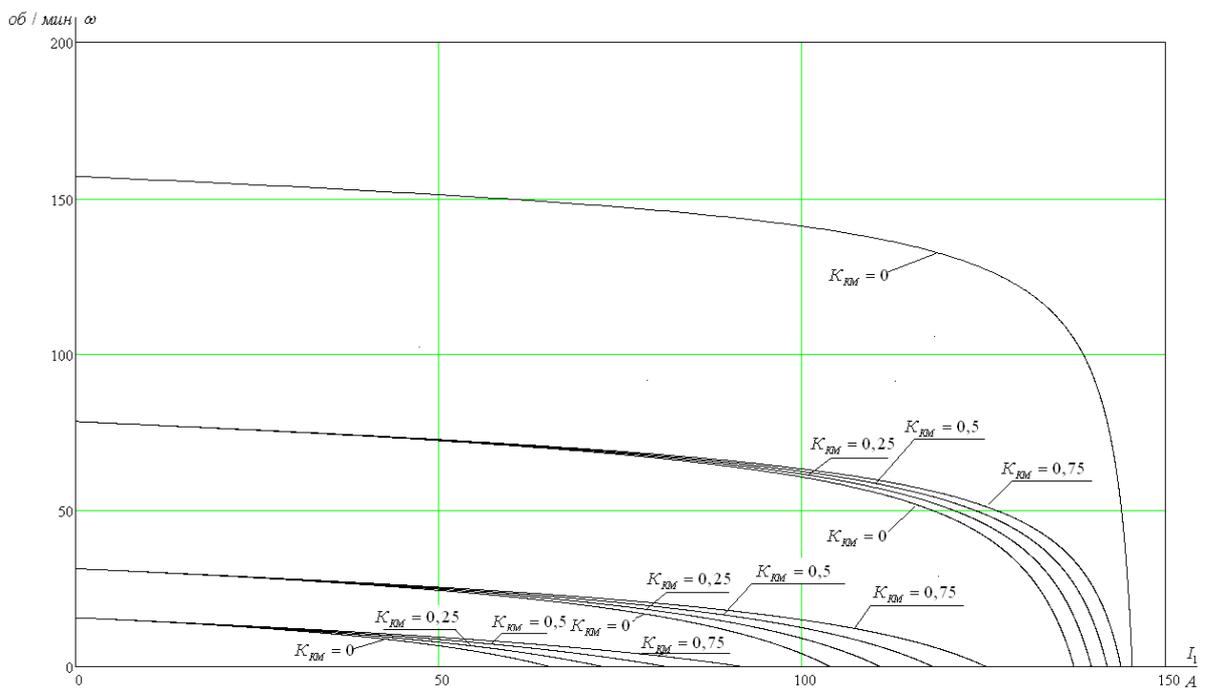


Рисунок 31 – Электромеханические характеристики двигателя 6А160М4УЗ для закона регулирования скорости  $U_{1\phi} / f_1 = const$  с IR – компенсацией

Из построенных механических и электромеханических характеристик электропривода следует, что введение положительной обратной связи по току увеличивает значение максимального момента механических характеристик, однако одновременно ведёт к дополнительному увеличению напряжения в обмотке статора. Влияние дополнительного подмагничивания системы на малых скоростях двигателя опасно с точки зрения недопустимого теплового режима работы, однако, при заданном малом диапазоне регулирования скорости данное замечание не является существенным. В области номинальных частот вращения незаметно значительного повышения жёсткости механических характеристик.

## **5. Модель электропривода с задатчиком интенсивности**

### **5.1. Расчет динамических характеристик скалярной системы преобразователь частоты – асинхронный двигатель**

Для исследования качества переходных процессов пуска электропривода крутильной машины в системе преобразователь частоты – асинхронный двигатель в программной среде MATLAB (Simulink) была составлена имитационная модель электропривода. Модель электропривода учитывает активные и индуктивные сопротивления проводов и кабелей необходимые для его подключения к сети и к двигателю. Схема имитационной модели силовых цепей электропривода преобразователь частоты – асинхронный двигатель приведена на рисунке 32.

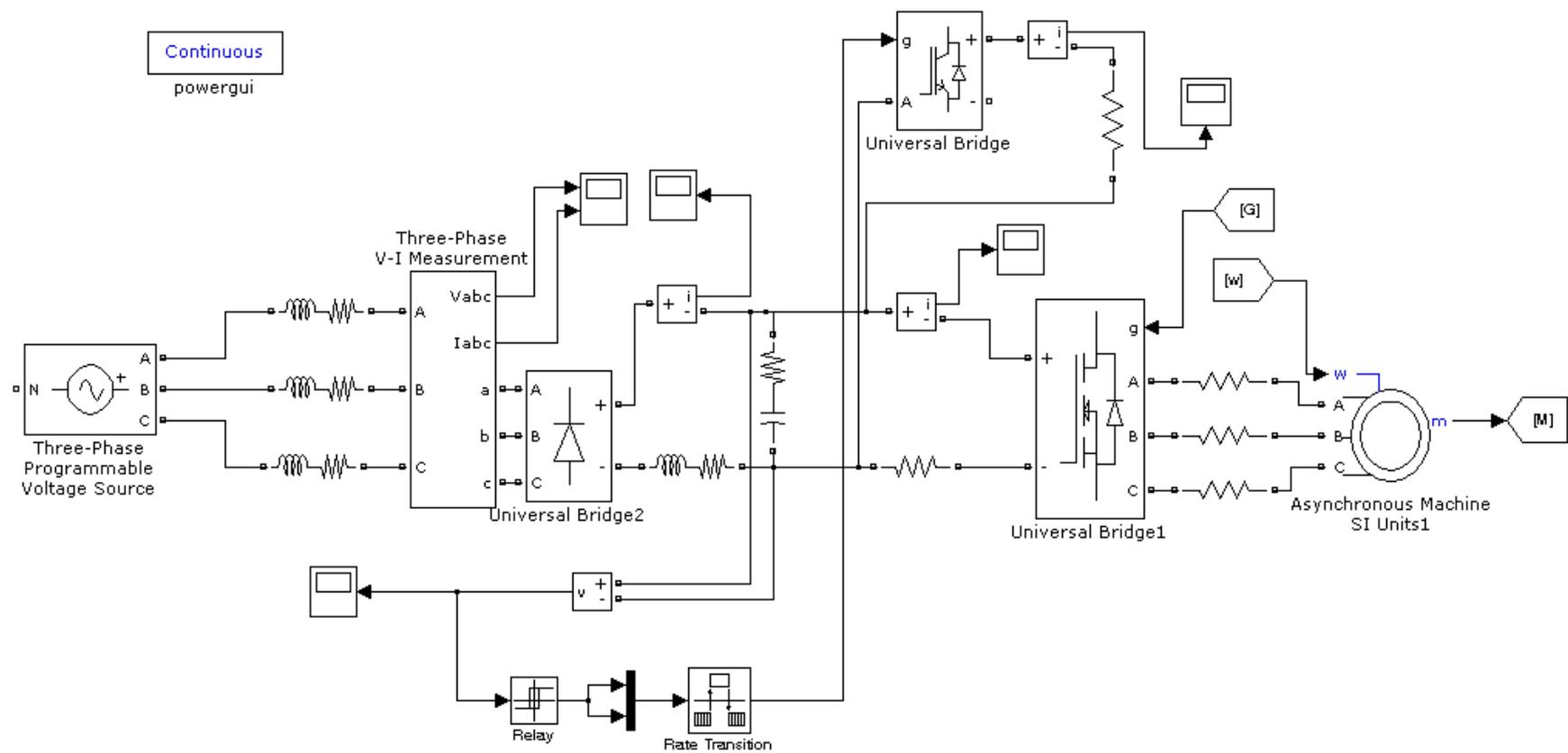


Рисунок 32 – Имитационная модель силовых цепей электропривода преобразователь частоты – асинхронный двигатель

Модель схемы управления электроприводом, учитывающая положительную обратную связь по току в канале регулирования напряжения или  $IR$ -компенсацию, приведена на рисунок 33.

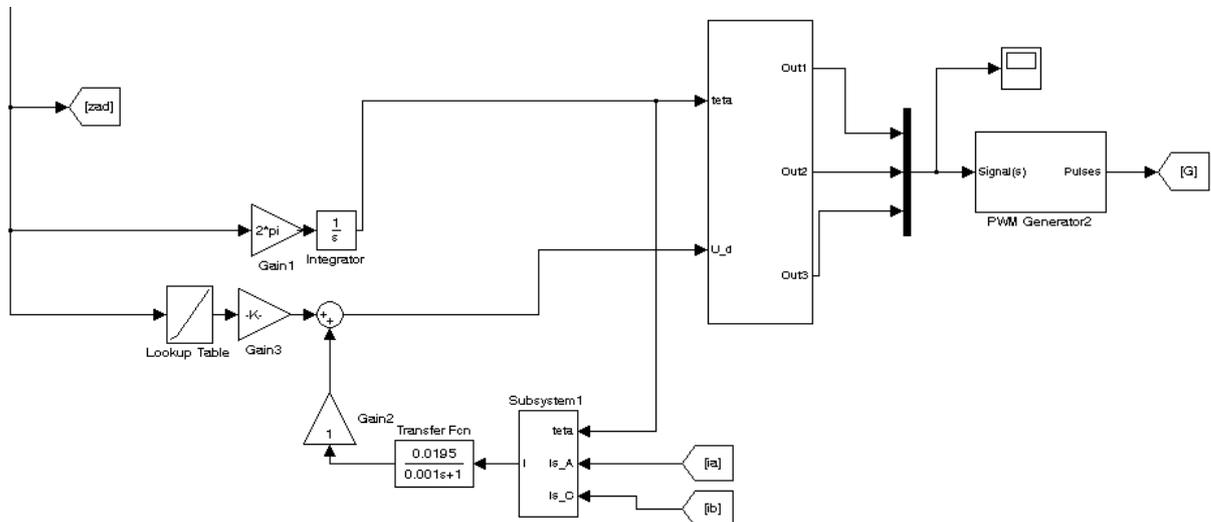


Рисунок 33 – Модель схемы управления электроприводом, учитывающая положительную обратную связь по току в канале регулирования напряжения или  $IR$ -компенсацию

Схема имитационной модели реактивной нагрузки с демультиплексором вывода параметров двигателя приведена на рисунке 34.

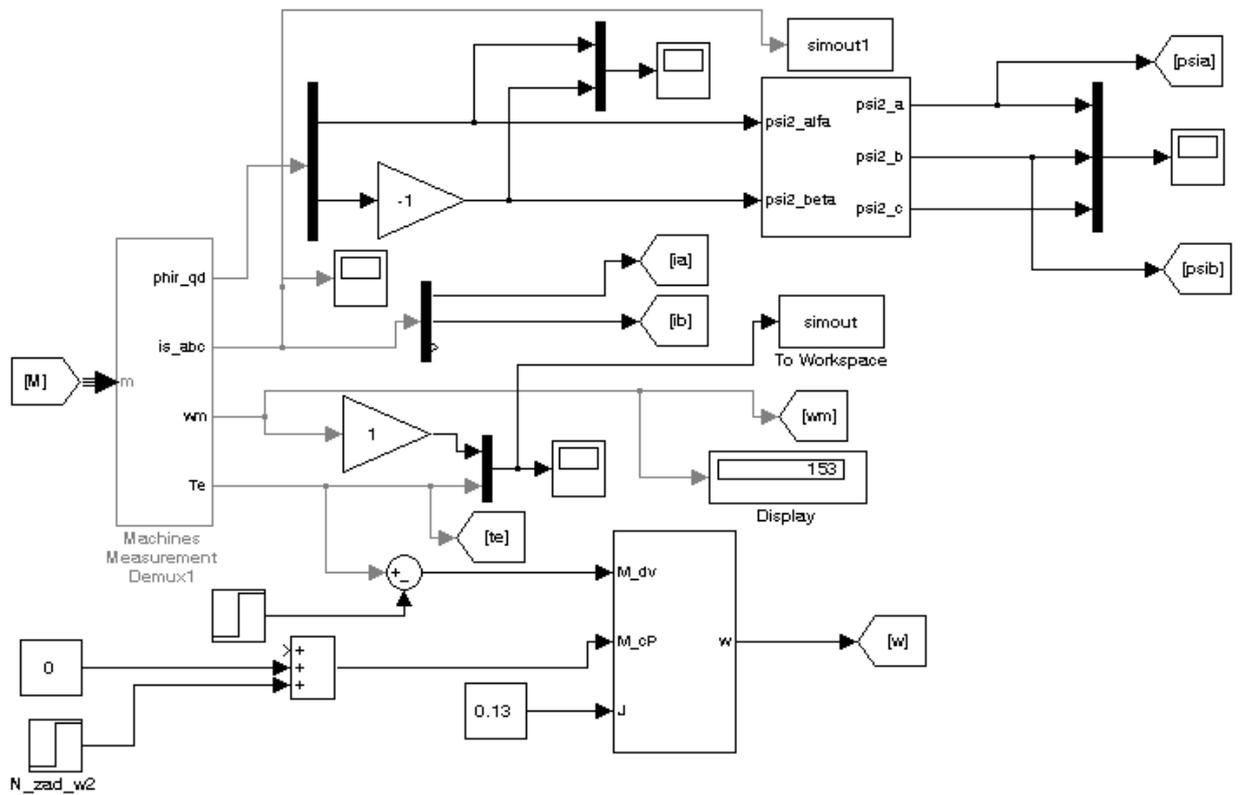


Рисунок 34 – Схема имитационной модели реактивной нагрузки с демультиплексором вывода параметров двигателя

Модель нагрузки электропривода приведена на рисунке 35.

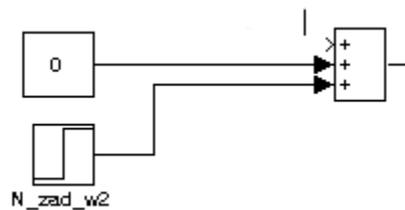


Рисунок 35 – Модель нагрузки электропривода

Модель линейного задатчика интенсивности приведена на рисунке 36.

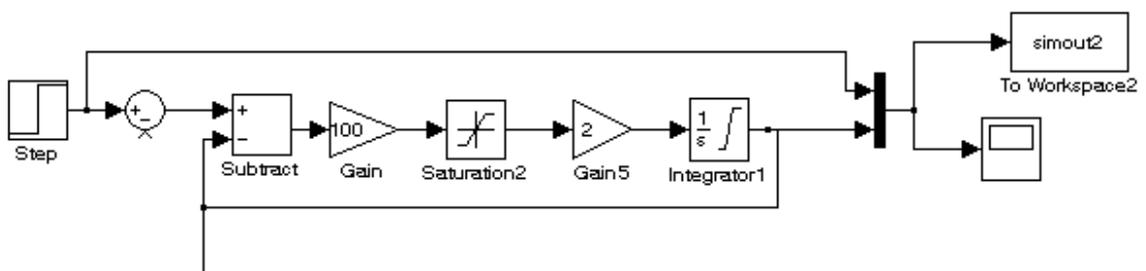


Рисунок 36 – Модель линейного задатчика интенсивности

Осциллограммы входной и выходной частот задатчика интенсивности для плавного нарастания частоты инвертора напряжения приведены на рисунке 37.

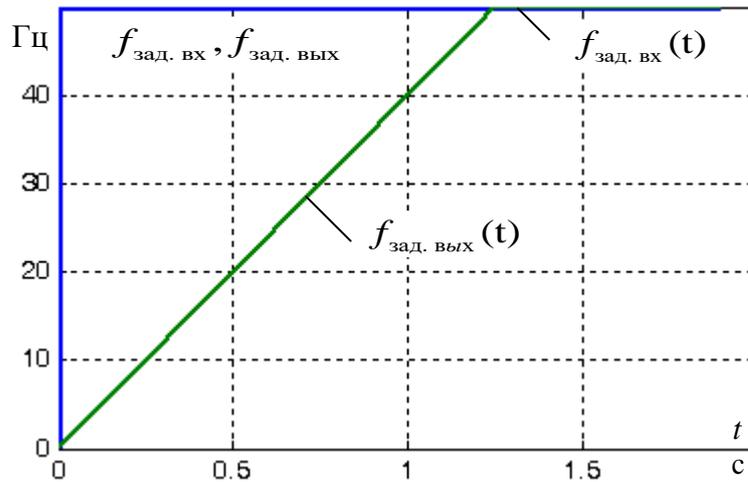


Рисунок 37 – Осциллограммы входной и выходной частот задатчика интенсивности

Результаты моделирования плавного пуска электропривода крутильной машины для различных частот преобразователя приведены на рисунках 38 – 43.

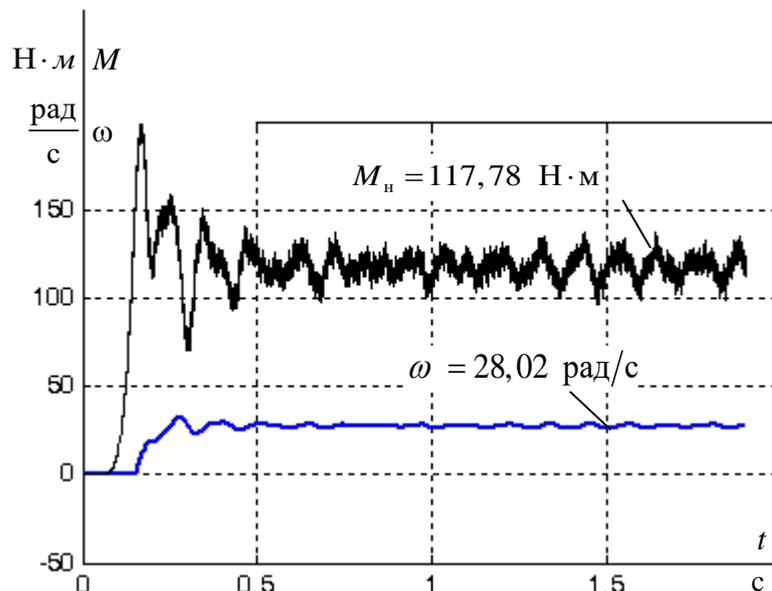


Рисунок 38 – Графики переходных процессов момента  $M = f(t)$  и скорости  $\omega = f(t)$  при пуске асинхронного электропривода с  $IR$ -компенсацией при выходной частоте преобразователя  $f = 10$  Гц

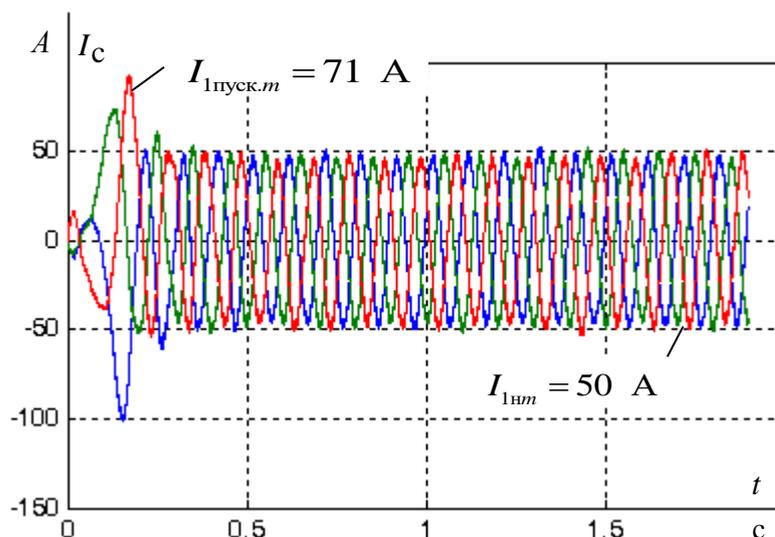


Рисунок 39 – График переходного процесса токов статора  $I_c = f(t)$  при пуске асинхронного электропривода от задатчика интенсивности с  $IR$ -компенсацией при выходной частоте преобразователя  $f = 10 \text{ Гц}$

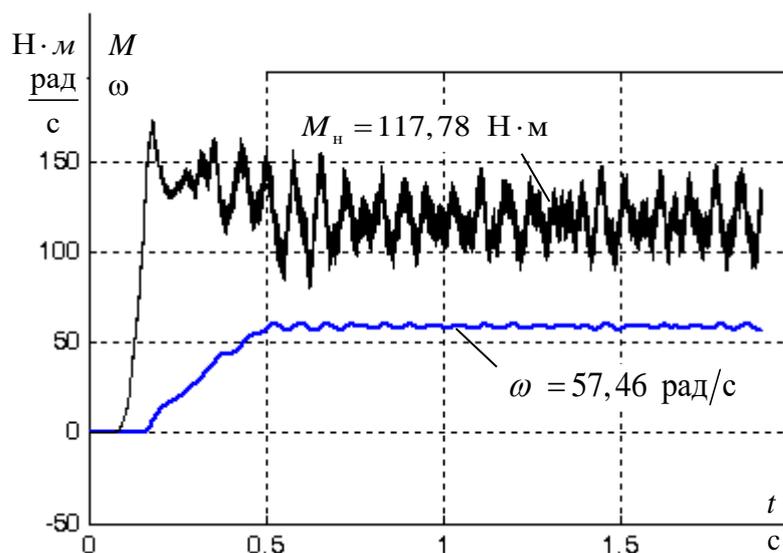


Рисунок 40 – Графики переходных процессов момента  $M = f(t)$  и скорости  $\omega = f(t)$  при пуске асинхронного электропривода с  $IR$ -компенсацией при выходной частоте преобразователя  $f = 20 \text{ Гц}$

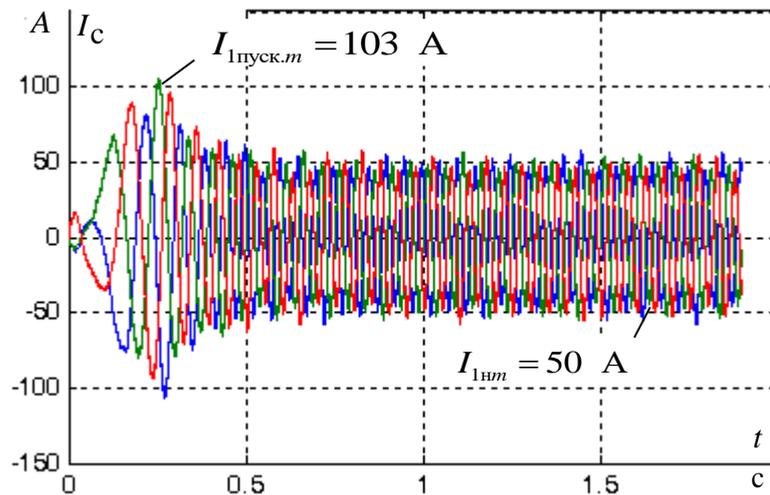


Рисунок 41 – График переходного процесса токов статора  $I_c = f(t)$  при пуске асинхронного электропривода от датчика интенсивности с  $IR$ -компенсацией при выходной частоте преобразователя  $f = 20$  Гц

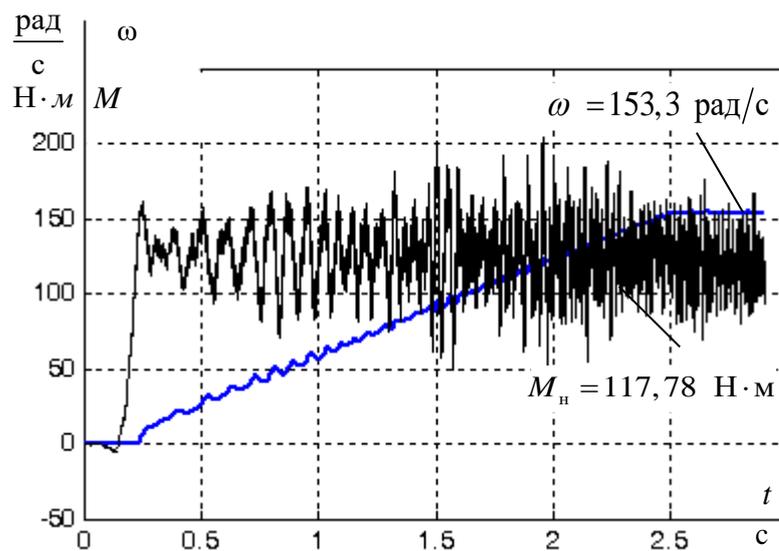


Рисунок 42 – Графики переходных процессов момента  $M = f(t)$  и скорости  $\omega = f(t)$  при пуске асинхронного электропривода с  $IR$ -компенсацией при выходной частоте преобразователя  $f = 50$  Гц

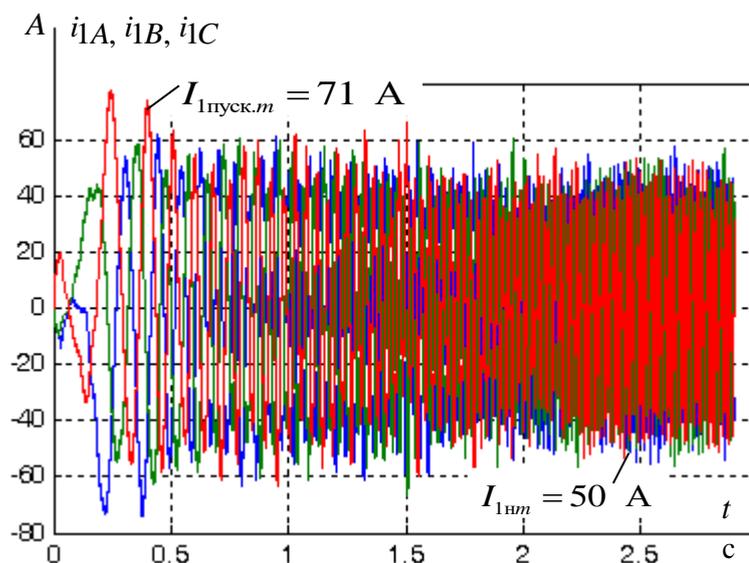


Рисунок 43 – График переходного процесса токов статора  $I_c = f(t)$  при пуске асинхронного электропривода от задатчика интенсивности с  $IR$ -компенсацией при выходной частоте преобразователя  $f = 50 \text{ Гц}$

Как следует из анализа графиков переходных процессов момента  $M = f(t)$  и скорости  $\omega = f(t)$  (рисунок 38, рисунок 40 и рисунок 42), электропривод обрабатывает задающие воздействия. Колебания электромагнитного момента  $M$  двигателя при его пуске от задатчика интенсивности значительно меньше, чем при пуске двигателя прямым включением в сеть. Максимальные значения момента приходятся не на начало пуска, а на его среднюю часть и при пуске с номинальной нагрузкой  $M_{c1} = 117,78 \text{ Н}\cdot\text{м}$  не превышают  $200 \text{ Н}\cdot\text{м}$ . Значительные колебания электромагнитного момента могут быть уменьшены правильным подбором постоянной времени  $T_{\text{км}}$  и коэффициента передачи  $k_{\text{км}}$  в цепи положительной обратной связи по току. Подбор параметров производится потому, что их синтез в системах с положительной обратной связью должным образом до настоящего времени не разработан.

Графики переходных процессов тока (рисунок 39, рисунок 41 и рисунок 43) показывают, что ток статора асинхронного двигателя плавно нарастает в течение  $0,5 \text{ с}$ , достигая пикового значения тока  $-73/\sqrt{2} = 51,7 \text{ А}$ ,

после чего плавно уменьшается до рабочего значения –  $51,3/\sqrt{2} = 36,3$  А, определяемого нагрузкой. Такой темп изменения тока статора полностью соответствует применяемому типу задатчика интенсивности с линейным заданием на увеличение частоты преобразователя.

Так как нагрузка на валу двигателя реактивная, то двигатель начинает вращаться не в момент времени включения, а при достижении его электромагнитного момента значения момента сопротивления –  $M_{cl} = 117,78$  Н·м. Асинхронный двигатель, долгое время находясь под током, неподвижен. Это приводит к его нежелательному дополнительному перегреву. Пуск с нулевой частотой приводит к задержке начала вращения двигателя на время до 0,25 с.

С целью уменьшения времени начала вращения двигателя предлагается изменить график выходной частоты задатчика интенсивности, скачком увеличивая начальную частоту, согласно рисунку 44.

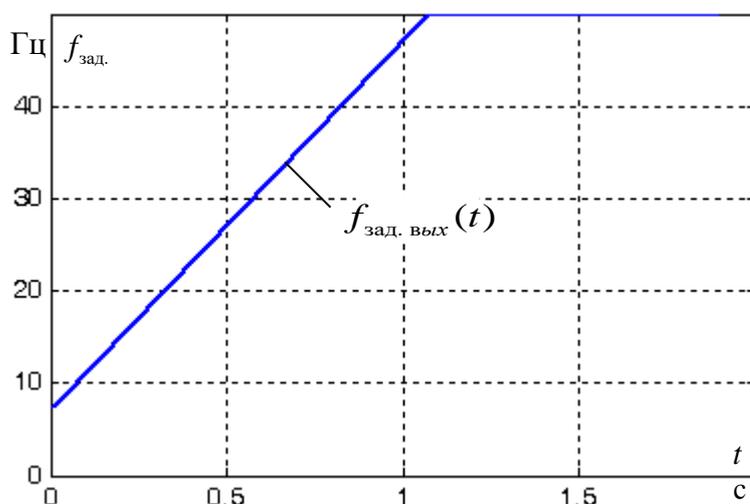


Рисунок 44 – График изменения частоты задатчика интенсивности до 50 Гц при скачкообразном формировании начальной частоты

Результаты моделирования плавного пуска электропривода крутильной машины с модернизированным задатчиком интенсивности для максимальной рабочей частоты преобразователя 50 Гц приведены на рисунках 45 – 46.

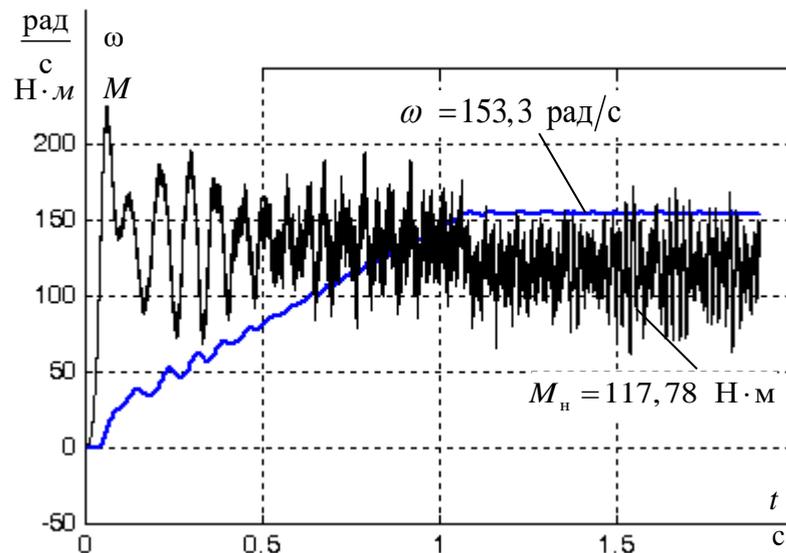


Рисунок 45 – Графики переходных процессов момента  $M = f(t)$  и скорости  $\omega = f(t)$  при пуске асинхронного электропривода с  $IR$ -компенсацией при выходной частоте преобразователя  $f = 50$  Гц

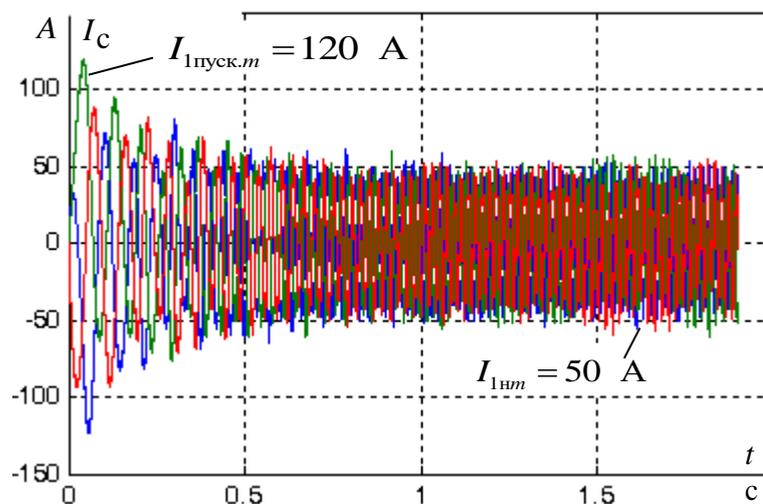


Рисунок 46 – График переходного процесса токов статора  $I_c = f(t)$  при пуске асинхронного электропривода от задатчика интенсивности с  $IR$ -компенсацией при выходной частоте преобразователя  $f = 50$  Гц

Формирование скачком начальной частоты и напряжения преобразователя частоты позволяет быстро создать магнитное поле асинхронного двигателя. При ускоренном пуске частота и напряжение преобразователя скачком увеличивается до значения начальной частоты (от 60

% при малой рабочей частоте до 16 % при номинальной частоте 50 Гц), а затем постепенно повышаются до заданного значения.

Как следует из анализа графиков переходных процессов момента  $M = f(t)$  и скорости  $\omega = f(t)$  на рисунке 45, электропривод обрабатывает задающие воздействия, разгоняясь при номинальном моменте  $M_{cl} = 117,78 \text{ Н}\cdot\text{м}$  до угловой скорости  $\omega_y = 117,78 \text{ рад/с}$ .

Графики переходных процессов тока (рисунок 46) показывают, что ток статора асинхронного двигателя в начале пуска составляет  $120/\sqrt{2} = 85 \text{ А}$ . и не превышает  $2,4 I_n$ . после чего плавно уменьшается до рабочего значения –  $50/\sqrt{2} = 35.46 \text{ А}$ , определяемого нагрузкой. Такой темп изменения тока статора полностью соответствует применяемому типу датчика интенсивности.

Так как нагрузка на валу двигателя реактивная, то двигатель начинает вращаться при достижении его электромагнитного момента значения момента сопротивления –  $M_{cl} = 117,78 \text{ Н}\cdot\text{м}$ , однако начало вращения происходит через 0,05 с после включения электропривода.

На рисунке 47 приведена осциллограмма задания выходной частоты электропривода с модернизированным датчиком интенсивности для полного цикла работы крутильной машины «пуск – останов» максимальной рабочей частотой преобразователя 50 Гц.

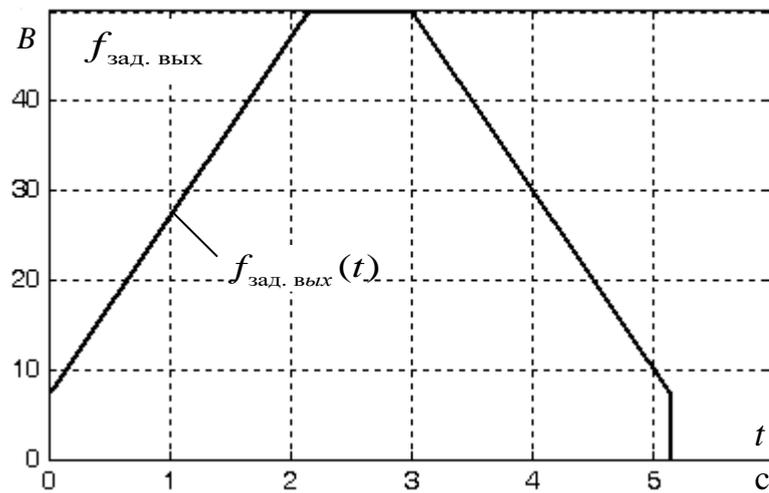


Рисунок 47 – График изменения частоты задатчика интенсивности до 50 Гц при скачкообразном формировании начальной частоты для полного цикла работы крутильной машины

Графики переходных процессов момента  $M = f(t)$  и скорости  $\omega = f(t)$  электропривода для полного цикла работы крутильной машины «пуск – останов» с максимальной рабочей частотой преобразователя 50 Гц приведены на рисунке 48, и графики переходных процессов тока – на рисунке 49.

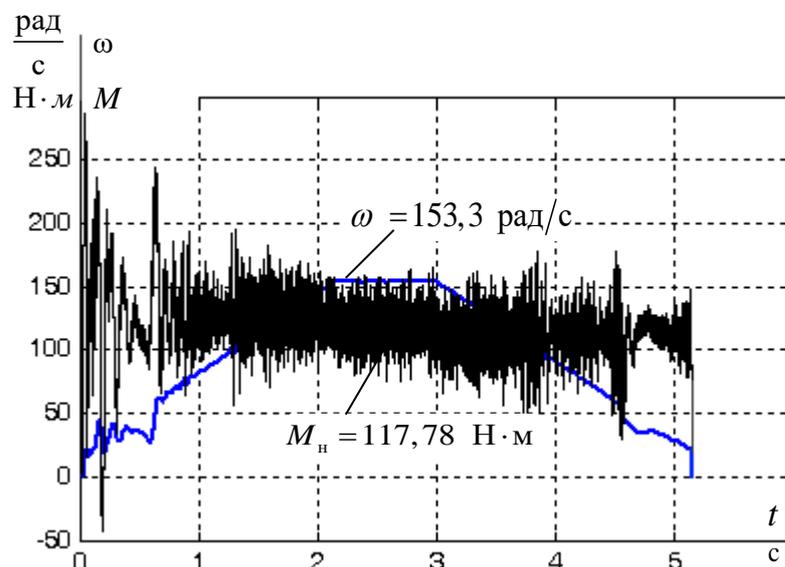


Рисунок 48 – Графики переходных процессов момента  $M = f(t)$  и скорости  $\omega = f(t)$  при пуске и торможении асинхронного электропривода с IR-компенсацией при выходной частоте преобразователя  $f = 50$  Гц для полного цикла работы крутильной машины

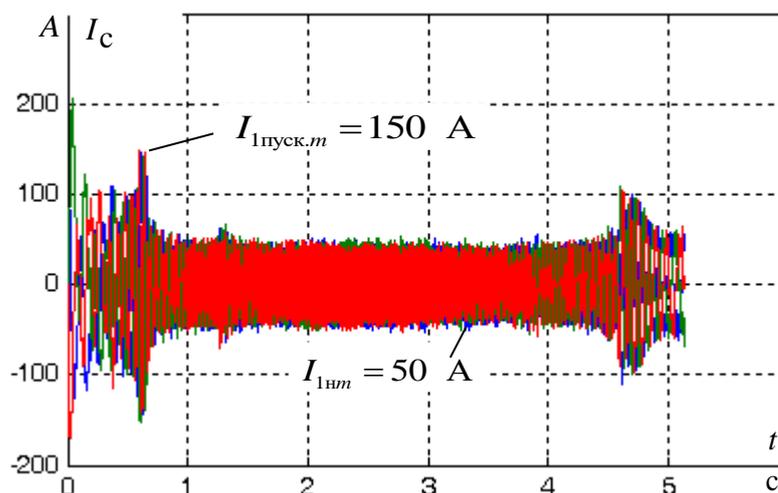


Рисунок 49 – График переходного процесса токов статора  $I_c = f(t)$  при пуске асинхронного электропривода от задатчика интенсивности с IR-компенсацией при выходной частоте преобразователя  $f = 50$  Гц для полного цикла работы крутильной машины

Проведя анализ графиков переходных процессов, представленных на рисунках 44 – 49, можно сделать вывод, что разработанный электропривод крутильной машины соответствует требованиям Технического задания.

Диапазон регулирования скорости, как на статических характеристиках на рисунках 30 – 31, так и на графиках переходных процессов составляет  $D=1:5$ . Погрешность поддержания скорости на нижней механической характеристике электропривода с положительной обратной связью по току в канале регулирования напряжения не превышает  $\delta \leq 4$  %.

Переходные процессы протекают в соответствие с темпом нарастания частоты задатчика интенсивности. Перерегулирование по скорости практически отсутствует.

## **6 ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСНАБЖЕНИЕ**

Целью раздела является проектирование и создание конкурентоспособных разработок, технологий, отвечающих современным требованиям в области ресурсоэффективности и ресурсосбережения.

Данный раздел, предусматривает рассмотрение следующих задач:

- определение конкурентоспособности проекта;
- планирование работ в рамках данного научного исследования;
- формирование бюджета на проектирование.

Научно - исследовательская работа представляет собой процесс разработки электропривода крутильной машины, проведя расчет параметров и исследования элементов силовой цепи электропривода.

Цель работы – является рассмотрение законов регулирования скорости, системы преобразователь частоты – асинхронный двигатель для построения имитационной модели с целью возможной реализации в системе регулируемого электропривода литцекрытильной машины.

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

#### **6.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования**

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

Сегментирование – это разделение покупателей на однородные группы, для каждой из которых может потребоваться определенный товар (услуга).

В данном случае сегментирование целесообразно провести по критерию точности, т.к. для разных типов режимов работы, требуется разная величина

подачи перерабатываемого материала в установки соответствующей мощности.

А также следует выделить сегменты рынка:

- по разработке, проектированию и производству;
- по установке и пуско-наладке;
- по дальнейшему обслуживанию и ремонту.

Исходя из сегмента рынка, будет произведено сегментирование коммерческих организаций по отраслям. Сегментирование приведено в таблице 4.

Таблица 4 – Сегментирование коммерческих организаций

	Нерегулируемые асинхронные электропривода	Электроприводы с реостатным регулированием	Электроприводы системы ПЧ-АД
Проектирование и производство			
Установка и пуско-наладка			
Обслуживание и ремонт			
Фирма А		Фирма Б	

Результаты сегментирования:

- основными сегментами рынка являются все виды деятельности для нерегулируемых асинхронных электроприводов и электроприводов с реостатным регулированием;
- наиболее сильно предприятие должно быть ориентировано на сегменты рынка, связанные с проектированием и производством, установкой и пуско-наладкой асинхронных электроприводов системы ПЧ-АД;
- наиболее привлекательными сегментами рынка являются отрасли, связанные с проектированием и производством, установкой и пуско-наладкой асинхронных электроприводов системы ПЧ-АД.

### **6.1.2 Анализ конкурентных технических решений**

Детальный анализ конкурирующих разработок, существующих на рынке, необходимо проводить систематически, поскольку рынки пребывают в постоянном движении. Такой анализ помогает вносить коррективы в проведение сварочных работ, чтобы успешнее противостоять своим конкурентам. Важно реалистично оценить сильные и слабые стороны разработок конкурентов.

С этой целью может быть использована вся имеющаяся информация о конкурентных разработках:

- технические характеристики разработки;
- конкурентоспособность разработки;
- уровень завершенности разработок;
- бюджет разработки;
- уровень проникновения на рынок;
- финансовое положение конкурентов, тенденции его изменения и т.д.

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, которой приведен в таблице 5. Экспертная оценка производится по техническим характеристикам и экономическим показателям по 5 бальной шкале, где 1 – наиболее низкая оценка, а 5 – наиболее сильная. Общий вес всех показателей в сумме должен составлять 1.

Таблица 5 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы		Конкурентно-способность	
		ПЧ-АД	ДПТ	ПЧ-АД	ДПТ
1	2	3	4	6	7
Технические критерии оценки ресурсоэффективности					
КПД	0,4	5	4	2	1,6
Расход электроэнергии	0,3	5	3	1,5	0,9
Надежность	0,12	4	3	0,48	0,36
Устойчивость к высоким температурам	0,02	3	4	0,06	0,08
Экономические критерии оценки эффективности					
1. Габариты	0,04	5	5	0,2	0,2
2. Цена	0,02	4	5	0,08	0,1
3. Предполагаемый срок эксплуатации	0,1	5	3	0,5	0,3
Итого	1	31	27	4,82	3,54

где:

«ПЧ-АД» - использование в приводном механизме литцекрытальной машины системы преобразователь частоты- асинхронный двигатель;

«ДПТ» - использование в приводном механизме литцекрытальной машины двигатель постоянного тока.

Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле:

$$K = \sum B_i \cdot B_i = 0,45 \cdot 5 = 2;$$

где:

$K$  – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;

$B_i$  – вес  $i$ -го показателя (в долях единицы);

$B_i$  – балл  $i$ -го показателя.

В результате анализа конкурентных технических решений можно сделать вывод, что наибольшим преимуществом обладает использование в приводном механизме литцекрытильной машины системы преобразователь частоты- асинхронный двигатель.

### **6.1.3 Технология QUAD**

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

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

- 1) Показатели оценки коммерческого потенциала разработки:
  - влияние нового продукта на результаты деятельности компании;
  - перспективность рынка;
  - пригодность для продажи;
  - перспективы конструирования и производства;
  - финансовая эффективность;
  - правовая защищенность и др.
- 2) Показатели оценки качества разработки:
  - динамический диапазон;
  - вес;
  - ремонтпригодность;
  - энергоэффективность;
  - долговечность;
  - эргономичность;
  - унифицированность;
  - уровень материалоемкости разработки и др.

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

Для упрощения процедуры проведения QuaD оценка проводится в табличной форме (таблица 6).

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

Таблица 6 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (разработок)

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы	Максимальный балл	Относительное значение (3/4)	Средне-взвешенное значение (5x2)x100
1	2	3	4	5	6
Показатели оценки качества разработки					
1. Повышение производительности труда пользователя	0,13	80	100	0,8	10,4
2. Удобство в эксплуатации (соответствует требованиям)	0,1	91	100	0,91	9,1
3. Энергоэкономичность	0,1	80	100	0,8	8
4. Надежность	0,1	75	100	0,75	7,5
5. Уровень шума	0,01	40	100	0,4	0,4
6. Безопасность	0,01	60	100	0,6	0,6
7. Функциональная мощность (предоставляемые возможности)	0,1	85	100	0,85	8,5
8. Простота эксплуатации	0,17	95	100	0,95	16,15

## Окончание таблицы 6

Показатели оценки коммерческого потенциала разработки					
1. Конкурентоспособность продукта	0,03	70	100	0,7	2,1
2. Уровень проникновения на рынок	0,04	75	100	0,75	3
3. Цена	0,04	38	100	0,38	1,52
4. Предполагаемый срок эксплуатации	0,1	98	100	0,98	9,8
5. Послепродажное обслуживание	0,03	90	100	0,9	2,7
6. Финансирование научной разработки	0,03	60	100	0,6	1,8
7. Срок выхода на рынок	0,03	66	100	0,66	1,98
8. Наличие сертификации разработки	0,02	75	100	0,75	1,5
Итого	1				85,05

### 6.1.4 SWOT-анализ

SWOT-анализ является инструментом стратегического менеджмента, позволяет оценить такие параметры как: сильные и слабые стороны проекта, а также его возможности и угрозы. Для проведения SWOT-анализа необходимо построить матрицу, в которую записываются приведенные ранее параметры.

При составлении матрицы SWOT удобно использовать следующие обозначения:

С – сильные стороны проекта;

Сл – слабые стороны проекта;

В – возможности;

У – угрозы.

Матрица SWOT представлена в таблице 7.

Таблица 7 – Матрица SWOT

	Сильные стороны проекта:	Слабые стороны проекта:
	С1. Надежная конструкция;	Сл1. Стоимость преобразователя частоты;
	С2. Высокая производительность;	Сл2. Опасность перегрева статора;
	С3. Уменьшение затрат на ремонт оборудования;	Сл3. Высокая техническая ответственность;
	С4. Удобство эксплуатации.	Сл4. Квадратичная зависимость момента от напряжения.
Возможности:		
В1. Экономия электроэнергии;	В1: С2, С3, С4.	В1: Сл1, Сл3.
В2. Модернизация оборудования;	В2: С1, С2, С3, С4.	В2: Сл2, Сл4.
В3. Увеличение производительности оборудования;	В3: С2, С3, С4.	В3: Сл1, Сл2, Сл3, Сл4.
Угрозы:		
У1. Развитая конкуренция;	У1: С2, С4.	У1: Сл1.
У2. Выход из строя оборудования;	У2: С1, С3.	У2: Сл1, Сл2, Сл3, Сл4.
У3. Отсутствие финансового обеспечения.	У3: С3.	У3: Сл1.

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

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

Полагаясь на проанализированные данные, можно сделать вывод, что относительно высокая стоимость преобразователя частоты оказывает сильное негативное влияние на технический проект в целом.

Таблица 8 - Интерактивная матрица возможностей

Возможности	Сильные стороны проекта			
	C1	C2	C3	C4
B1	-	+	+	+
B2	+	+	+	+
B3	-	+	+	+
	Слабые стороны проекта			
	Сл1	Сл2	Сл3	Сл4
B1	+	-	+	-
B2	-	+	-	+
B3	+	+	+	+

Таблица 9 - Интерактивная матрица угроз

Угрозы	Сильные стороны проекта			
	C1	C2	C3	C4
У1	-	+	-	+
У2	+	-	+	-
У3	-	-	+	-
	Слабые стороны проекта			
	Сл1	Сл2	Сл3	Сл4
У1	+	-	-	-
У2	+	+	+	+
У3	+	-	-	-

Swot-анализ позволяет оценить такие параметры как: сильные и слабые стороны проекта. В данном проекте преобладают сильные стороны, но не исключен случай, когда какая-либо одна из слабых сторон окажется наиболее

сильным фактором, негативно влияющим на работу устройства, чем все вместе взятые сильные стороны.

## **6.2 Определение возможных альтернатив проведения научных исследований**

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

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

## **6.3 Планирование научно-исследовательских работ**

### **6.3.1 Структура работ в рамках научного исследования**

Для выполнения проектных работ формируется группа, которая включает в себя руководителя проекта и инженера. Для каждого типа запланированных работ устанавливается соответствующая должность исполнителей. Порядок этапов и работ, распределение исполнителей по этим видам работ приведено в таблице 10.

Таблица 10 - Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

	№ Раб.	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель проекта
Выбор направления исследований	2	Подбор и изучение материалов по теме	Инженер
	3	Выбор направления исследований	Инженер
	4	Календарное планирование работ по теме	Руководитель проекта
Теоретическое исследование	5	Проведение предварительных расчетов и обоснований	Инженер
	6	Выбор двигателя	Инженер
	7	Выбор преобразователя частот	Инженер
	8	Исследование статических характеристик системы	Инженер
	9	Исследование динамических характеристик системы	Инженер
Обобщение и оценка результатов	10	Оценка эффективности полученных результатов	Руководитель проекта
Разработка технической документации и проектирование	11	Разработка схемы управления	Инженер
	12	Разработка схемы электропривода	Инженер
Оформление отчета по НИР (комплекта документации по ОКР)	13	Составление пояснительной записки (эксплуатационно-технической документации)	Инженер

### 6.3.2 Определение трудоемкости выполнения работ

Важным моментом является определение трудоемкости каждого из участников проекта. Сложность работы оценивается экспертно в человеко-днях и носит вероятностный характер. Для определения ожидаемой (средней) величины трудоемкости используется следующая формула:

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

где:

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

Исходя из ожидаемой трудоемкости работ, определяется продолжительность каждой работы в рабочих днях  $T_p$ , учитывающая параллельность выполнения работ несколькими исполнителями.

$$T_{pi} = \frac{t_{ожі}}{Ч_i};$$

где:

- $T_{pi}$  – продолжительность одной работы, раб. дн.;
- $t_{ожі}$  – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, чел.-дн.
- $Ч_i$  – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел.

### 6.3.3 Разработка графика проведения научного исследования

Наиболее удобным и очевидным является построение графика проектирования работ в виде диаграммы Ганта. Диаграмма Ганта – это горизонтальный график, в котором работа над темой представлена длительными промежутками времени, характеризующимися датами начала и завершения работы. Для удобства составления графика продолжительность каждого из этапов работы с рабочих дней должна быть переведена на

календарные дни. Коэффициент календарности определяется по следующей формуле:

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}};$$

ГДЕ:

- $T_{\text{кал}}$  – количество календарных дней в году;
- $T_{\text{вых}}$  – количество выходных дней в году;
- $T_{\text{пр}}$  – количество праздничных дней в году.

$$k_{\text{кал}} = \frac{365}{365 - 52 - 14} = 1,22;$$

$$t_{\text{ожел}} = \frac{3 \cdot t_{\text{min1}} + 2 \cdot t_{\text{max1}}}{5};$$

$$\frac{3 \cdot 3 + 2 \cdot 4}{5} = 3 - \text{дня.}$$

Временные показатели проведения научного проектирования и календарный план график проведения проектирования приведены в таблицах 11, 12.

Таблица 11 - Временные показатели проведения проектирования

Название работы	Трудоемкость работ						Длительность работ в рабочих днях $T_{pi}$	Длительность работ в календарных днях $T_{ki}$		
	$t_{\text{min}}$ , чел-дни		$t_{\text{max}}$ , чел-дни		тожи, чел-дни					
	Руководитель проекта	Инженер	Руководитель проекта	Инженер	Руководитель проекта	Инженер	Руководитель проекта	Инженер	Руководитель проекта	Инженер
Составление ТЗ	3		4		3		3		4	
Подбор и изучение материалов по теме		6		8		7		7		8
Выбор направления исследований		6		8		7		7		8

Окончание таблицы 11

Календарное планирование работ по теме	4		5		4		4		5	
Проведение предварительных расчетов и обоснований		8		12		10		10		12
Выбор электродвигателя		1		2		1		1		2
Выбор преобразователя частоты		2		4		3		3		3
Исследование статических характеристик системы		5		10		7		7		9
Исследование динамических характеристик системы		4		8		6		6		7
Оценка эффективности полученных результатов	4		6		5		5		6	
Разработка схемы управления		7		10		8		8		10
Разработка схемы электропривода		6		9		7		7		9
Составление пояснительной записки (эксплуатационно-технической документации)		9		12		10		10		12

Таблица 12 - Календарный план-график проведения проектирования

№	Вид работ	Исполнители	Т кi кал дни	Продолжительность выполнения работ													
				Фев.		март			апрель			май			июн ь		
				2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	
1	Составление ТЗ	Руководитель проекта	4														
2	Подбор и изучение материалов по теме	Инженер	8														
3	Выбор направления исследований	Инженер	8														
4	Календарное планирование работ по теме	Руководитель проекта	5														
5	Проведение предварительных расчетов и обоснований	Инженер	12														
6	Выбор электродвигателя	Инженер	2														
7	Выбор преобразователя частоты	Инженер	3														
8	Исследование статических характеристик системы	Инженер	9														
9	Исследование динамических характеристик системы	Инженер	7														
10	Оценка эффективности полученных результатов	Руководитель проекта	6														
11	Разработка схемы управления	Инженер	10														
12	Разработка схемы электропривода	Инженер	9														
13	Составление пояснительной записки	Инженер	12														

### 6.3.4 Бюджет затрат на проектирования

#### 6.3.4.1 Расчет материальных затрат проектирования

Материальные затраты, необходимые для данной разработки, приведены в таблице 13.

Таблица 13 - Материальные затраты

Наименование	Единица измерения	Количество	Цена за ед. руб.	Затраты на материалы, (З <sub>м</sub> ), руб.
Тетрадь	Штука	1	46	46
Ручка шариковая	Штука	1	30	30
Распечатка	Лист	150	2	300
<b>Итого</b>				<b>376</b>

Из таблицы видно, что материальные затраты для проектирования составляют 376 рублей.

#### 6.3.4.2 Затраты на заработную плату исполнителей

Основная заработная плата научных и инженерных работников, непосредственно вовлеченных в выполнение работ по этому предмету проектирования, определяется на основе трудоемкости выполняемой работы и существующей системы окладов и тарифных ставок. Статья включает в себя основную заработную плату сотрудников, непосредственно занимающихся проектированием и дополнительной заработной платы:

$$Z_{зп} = Z_{осн} + Z_{доп};$$

где:

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

Определим основную заработную плату инженера:

$$Z_{осн}(\text{инж}) = 17000 \cdot 1,3 = 22100 \text{ руб.},$$

где 1,3 - районный коэффициент.

Определим зарплату за 1 день:

$$Z_{день}(\text{инж}) = \frac{22100}{26} = 850 \text{ руб.},$$

где 26 – число рабочих дней за месяц.

Определим основную заработную плату за отработанное количество дней:

$$Z_{осн}(\text{инж}) = 850 \cdot 80 = 68000 \text{ руб.}$$

Определим основную заработную плату руководителя проекта:

$$Z_{осн}(\text{рук.пр.}) = 26300 \cdot 1,3 = 34190,$$

где 1,3 – районный коэффициент.

Определим зарплату за 1 день:

$$Z_{день}(\text{рук.пр.}) = \frac{34190}{26} = 1315 \text{ руб.},$$

где 26 – число рабочих дней за месяц.

Определим основную заработную плату за отработанное количество дней:

$$Z_{осн}(\text{рук.пр.}) = 1315 \cdot 15 = 19725 \text{ руб.}$$

Расчет дополнительной заработной платы ведется по формуле:

$$Z_{доп} = k_{доп} \cdot Z_{осн};$$

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

$$Z_{доп}(\text{инж}) = k_{доп} \cdot Z_{осн} = 0,15 \cdot 68000 = 10200 \text{ руб.};$$

$$Z_{доп}(\text{рук.пр.}) = k_{доп} \cdot Z_{осн} = 0,15 \cdot 19725 = 2959 \text{ руб.};$$

$$Z(\text{инж}) = 68000 + 10200 = 78200 \text{ руб.};$$

$$Z(\text{рук.пр.}) = 19725 + 2959 = 22711 \text{ руб.}$$

### 6.3.4.3 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$Z_{внеб} = k_{внеб} \cdot (Z_{осн} + Z_{доп});$$

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

$$Z_{внеб}(\text{рук. пр}) = 0,271 \cdot 22711 = 6155 \text{ руб.};$$

$$Z_{внеб}(\text{инж}) = 0,271 \cdot 78200 = 21792 \text{ руб.}$$

### 6.3.4.4 Амортизация

Расчет амортизационных отчислений для полного восстановления основных фондов производится по нормам амортизации, утвержденным в порядке, установленном действующим законодательством, и определяется в зависимости от стоимости оборудования. Для проектирования требуется следующее оборудование: компьютер - 41000 рублей.

$$I_{ам} = \frac{T_{ис}}{T_{Г}} \cdot \frac{1}{T_{сл}} \cdot C_{обор},$$

где:

- $T_{ис}$  – время использования оборудования = 80 дней;
- $T_{Г}$  – количество использования в год = 365 дней;
- $C_{обор}$  – стоимость оборудования;
- $T_{сл}$  – срок службы оборудования = 3 года.

$$I_{ам} = \frac{T_{ис}}{T_{Г}} \cdot \frac{1}{T_{сл}} \cdot C_{обор} = \frac{80}{365} \cdot \frac{1}{3} \cdot 41000 = 2995 \text{ руб.}$$

### 6.3.4.5 Накладные расходы

Накладные расходы учитывают другие расходы организации, не включенные в предыдущие статьи расходов: печатные и фотокопировальные исследовательские материалы, оплату услуг связи, электричество, почтовые и телеграфные расходы, воспроизведение материалов и т. д. Их стоимость определяется следующей формуле:

$$Z_{\text{накл}} = (\text{сумма статей (1:7)}) \cdot k_{\text{нр}},$$

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

Величину коэффициента накладных расходов можно взять в размере 16%.

$$Z_{\text{накл}} = 132229 \cdot 0,16 = 21157 \text{ руб.}$$

### 6.3.4.6 Формирование бюджета затрат на проектирование

Рассчитанная величина затрат проектирования работы является основой для формирования бюджета затрат проекта. Определение бюджета затрат на проектирование по каждому варианту исполнения приведен в таблице 14.

Таблица 14 - Бюджет затрат на проектирование

Наименование статьи	Сумма, руб.	%
Материальные затраты НТИ	376	0,25
Затраты на заработную плату исполнителей темы	100911	65,79
Отчисления во внебюджетные фонды	27947	18,22
Амортизация	2995	1,95
Накладные расходы	21157	13,79
Итого	153386	100

## 6.4 Определение ресурсоэффективности исследования

### 6.4.1 Интегральный показатель финансовой эффективности

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{финр}^{исп\ i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{max}} = \frac{153386}{190000} = 0,81,$$

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

$\Phi_{pi}$  – стоимость  $i$ -го варианта исполнения;

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

$$I_{финр}^{исп\ i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{max}} = \frac{153386}{190000} = 0,81,$$

$$I_{финр}^{исп\ 2} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{max}} = \frac{190000}{190000} = 1.$$

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

### 6.4.2 Интегральный показатель ресурсоэффективности

В данном разделе необходимо произвести оценку ресурсоэффективности проекта, определяемую посредством расчета интегрального критерия, по следующей формуле:

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

где:  $I_{pi}$  – интегральный показатель ресурсоэффективности;  $a_i$  – весовой коэффициент проекта;  $b_i$  – бальная оценка проекта, устанавливаемая опытным путем по выбранной шкале оценивания.

Расставляем бальные оценки и весовые коэффициенты в соответствии с приоритетом характеристик проекта, рассчитываем конечный интегральный показатель и сводим полученные результаты в таблицу 15.

Таблица 15 – Сравнительная оценка характеристик проекта

Критерии	Весовой коэффициент	Бальная оценка разработки	Бальная оценка исполнения 2
1. Рост производительности труда пользователя	0,2	5	3
2. Удобство в эксплуатации (соответствует требованиям)	0,25	5	3
3. Энергосбережение	0,15	5	4
4. Надежность	0,15	4	4
5. Предполагаемый срок эксплуатации	0,1	4	4
6. Функциональная мощность (предоставляемые возможности)	0,15	5	3
ИТОГО	1		

Расчет интегрального показателя для разрабатываемого проекта:

$$I_{p1} = 0,2 * 5 + 0,25 * 5 + 0,15 * 5 + 0,15 * 4 + 0,1 * 4 + 0,15 * 5 = 4,75$$

$$I_{p2} = 0,2 * 3 + 0,25 * 3 + 0,15 * 4 + 0,15 * 4 + 0,1 * 4 + 0,15 * 3 = 3,4$$

Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

$$I_{исп1} = \frac{I_{p-исп1}}{I_{финр}} = \frac{4,75}{0,81} = 5,86.$$

Сравнение интегрального показателя эффективности вариантов исполнения разработки позволит определить сравнительную эффективность проекта и выбрать наиболее целесообразный вариант из предложенных (табл. 16). Сравнительная эффективность проекта ( $\mathcal{E}_{\text{ср}}$ ):

$$\mathcal{E}_{\text{ср}} = \frac{I_{\text{исп1}}}{I_{\text{исп2}}} = \frac{5,86}{3,4} = 1,7.$$

Таблица 16 – Сводная таблица показателей оценки ресурсоэффективности

№ п/п	Показатели	Исп.1	Исп.2
1	Интегральный финансовый показатель разработки	0,81	1
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4,75	3,4
3	Интегральный показатель эффективности	5,86	3,4
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1,7	0,58

По факту оценки эффективности ИР, можно сделать выводы:

- Значение интегрального финансового показателя ИР составляет 0,81, что является показателем того, что ИР является финансово выгодной, по сравнению с аналогами;
- Значение интегрального показателя ресурсоэффективности ИР составляет 4,75;
- Значение интегрального показателя эффективности ИР составляет 5,86, по сравнению с 4,5, и является наиболее высоким, это означает, что техническое решение, рассматриваемое в ИР, является наиболее эффективным вариантом исполнения.

## **Выводы по разделу**

В данном разделе были рассмотрены проекты по модернизации электропривода литцекрытильной машины, и выбран наиболее конкурентоспособный, им оказалась установка системы преобразователь частоты – асинхронный двигатель. Далее был определен бюджет затрат на проектирование, который составил 153386 рублей. Данная литцекрытильная машина используется на многих предприятиях кабельной промышленности, а также на предприятии ЗАО «Сибкабель».

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Целью данной выпускной квалификационной работы являлся вопрос исследования возможной структуры регулируемого электропривода литцекрутильной машины на основе комплектного преобразователя частоты Веспер EI – 9011.

В работе предложено реализовать систему РЭП рамы как систему преобразователь частоты - асинхронный двигатель с возможностью реализации законов скалярного управления по разомкнутой структуре.

В результате исследования статического режима работы скалярного управления установлено, что электропривод обеспечивает заданную область работы в указанном диапазоне регулирования скорости, что удовлетворяет техническому заданию. Скалярное управление обладает простотой и возможностью работы без обратной связи.

В ходе имитационного моделирования динамических режимов работы установлено, что разработанная система устойчиво работает в требуемом диапазоне, запуск происходит мягко, без больших скачков момента.

Также был проведен анализ конкурентоспособности разработки в области ресурсоэффективности и ресурсосбережения, определен бюджет затрат на проектирование.

Таким образом, разработанная система РЭП машины полностью удовлетворяет техническим требованиям. Спроектированный электропривод позволит в дальнейшем автоматизировать процесс скрутки литцы.

## **СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**