

Инженерная школа энергетики
 Направление подготовки – 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника
 Отделение электроэнергетики и электротехники

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
«Асинхронный частотно-регулируемый электропривод литцекрытильной машины»

УДК 62-83-523:679.7.053

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5AM16	Анохин Алексей Святославович		

Руководитель ВКР:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Шилин Александр Анатольевич	д.т.н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Спицына Любовь Юрьевна	к.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Мезенцева Ирина Леонидовна	–		

По разделу на иностранном языке:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Егорова Юлия Ивановна	к.т.н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
13.04.02 Электроэнергетика и электротехника	Кладиев Сергей Николаевич.	к.т.н.		

**ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО НАПРАВЛЕНИЮ
13.04.02 электроэнергетика и электротехника**

Код результата	Наименование компетенции
Универсальные компетенции	
УК(У)-1	Способен осуществлять критических анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий.
УК(У)-2	Способен управлять проектом на всех этапах его жизненного цикла.
УК(У)-3	Способен организовывать и руководить работой команды, вырабатывая командную стратегию для достижения поставленной цели.
УК(У)-4	Способен применять современные коммуникативные технологии, в том числе на иностранном языке, для академического и профессионального взаимодействия.
УК(У)-5	Способен анализировать и учитывать разнообразие культур в процессе межкультурного взаимодействия.
УК(У)-6	Способен определять и реализовывать приоритеты собственной деятельности и способы ее совершенствования на основе самооценки.
Общепрофессиональные компетенции	
ОПК(У)-1	Способен формулировать цели и задачи исследования, выявлять приоритеты решения задач, выбирать критерии оценки.
ОПК(У)-2	Способен применять современные методы исследования, оценивать и представлять результаты выполненной работы.
Профессиональные компетенции	
ПК(У)-1	Способен выбирать серийные и проектировать новые объекты профессиональной деятельности.
ПК(У)-2	Способен применять методы создания и анализа математических моделей, позволяющих прогнозировать свойства и поведение объектов профессиональной деятельности.
ПК(У)-3	Способен разрабатывать, реализовывать и осуществлять контроль выполнения технических и организационных мероприятий, направленных на энергосбережение и повышение энергетической эффективности.
ПК(У)-4	Способен формулировать технические задания, анализировать различные варианты и искать компромиссные решения.
ПК(У)-5	Способен проектировать и организовывать учебный процесс по образовательным программам с использованием современных образовательных технологий.

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

Инженерная школа энергетики
 Направление подготовки – 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника
 Отделение электроэнергетики и электротехники

УТВЕРЖДАЮ:
 Руководитель ООП

 (Подпись) (Дата) **Кладиев С.Н.**
 (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Магистерской диссертации <i>(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)</i>
--

Студенту:

Группа	ФИО
5AM16	Анохину Алексею Святославовичу

Тема работы:

«Асинхронный частотно-регулируемый электропривод литцекрытальной машины»
Утверждена приказом директора (номер, дата):

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе <i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.)</i>	Объектом исследования является специальный электропривод литцекрытальной машины.
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов <i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов)</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Общие сведения о литцекрытальной машине. • Определение параметров двигателя • Создание имитационной модели в среде Matlab Simulink • Отработка алгоритмов компенсации момента и скольжения • Заключение • Разработка раздела «Социальная ответственность» • Разработка раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение».
Перечень графического материала <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Графики структурных схем алгоритмов и переходных процессов величин, полученных с помощью этих алгоритмов.
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы <i>(с указанием разделов)</i>	

Раздел	Консультант
Социальная ответственность	Мезенцева Ирина Леонидовна
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Спицына Любовь Юрьевна
Раздел на иностранном языке	Егорова Юлия Ивановна
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:	
Введение; Общие сведения о литцекрытальной машине; Определение параметров двигателя; Создание имитационной модели в среде Matlab Simulink; Отработка алгоритмов компенсации момента и скольжения; Заключение; Финансовый менеджмент; Социальная ответственность – на русском языке. Общие сведения о литцекрытальной машине; Создание имитационной модели в среде Matlab Simulink; – на английском языке.	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	28.02.2023
---	------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Шилин Александр Анатольевич	д.т.н., профессор		28.02.2023

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5AM16	Анохин Алексей Святославович		28.02.2023

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

Студенту:

Группа	ФИО
5AM16	Анохину Алексею Святославовичу

Школа	ИШЭ	Отделение школы (НОЦ)	Электроэнергетики и электротехники
Уровень образования	магистратура	Направление/специальность	13.04.02 Электроэнергетика и электротехника

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

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	Работа с информацией, представленной в российских и иностранных научных публикациях, аналитических материалах, статических бюллетенях и изданиях, нормативно-правовых документах.
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. <i>Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ</i>	1. Анализ и оценка конкурентоспособности НИ; 2. SWOT-анализ.
2. <i>Разработка устава научно-технического проекта</i>	1. Цели и результат проекта. 2. Организационная структура проекта. 3. Ограничения и допущения проекта.
3. <i>Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок</i>	1. Формирование плана разработки; 2. Разработка графика Ганта. 3. Формирование бюджета затрат НИ. 4. Определение рисков проекта.
4. <i>Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности</i>	Проведение оценки экономической эффективности, ресурсоэффективности и сравнительной эффективности различных вариантов исполнения

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. Сегментирование рынка
2. Оценка конкурентоспособности технических решений
3. Диаграмма FAST
4. Матрица SWOT
5. Иерархическая структура работ
6. График проведения НТИ
7. Проектная организационная структура

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	7.02.2023
---	-----------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент ОСГН ШБИП	Спицына Любовь Юрьевна	канд.экон.наук		7.02.2023

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5AM16	Анохин Алексей Святославович		7.02.2023

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа		ФИО	
5AM16		Анохину Алексею Святославовичу	
Школа	Инженерная школа энергетики	Отделение (НОЦ)	Отделение электроэнергетики и электротехники
Уровень образования	магистратура	Направление/специальность	13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»

Тема ВКР:

Асинхронный частотно-регулируемый электропривод литцекрытильной машины	
Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
<p>Введение</p> <ul style="list-style-type: none"> – Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика) и области его применения. – Описание рабочей зоны (рабочего места) при разработке проектного решения/при эксплуатации 	<p><i>Объект исследования:</i> Электропривод литцекрытильной машины <i>Область применения:</i> Предприятия кабельной промышленности <i>Рабочая зона:</i> производственное помещение <i>Размеры помещения:</i> 54x24м <i>Климатическая зона:</i> умеренная <i>Количество и наименование оборудования рабочей зоны:</i> Литцекрытильная машина, ПК, отдающее устройство, приемное устройство <i>Рабочие процессы, связанные с объектом исследования, осуществляющиеся в рабочей зоне:</i> запуск электродвигателя, настройка электропривода в соответствии с необходимыми параметрами работы литцекрытильной машины.</p>
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
<p>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности при эксплуатации:</p> <ul style="list-style-type: none"> – специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны. 	<ul style="list-style-type: none"> – ТИПОВАЯ ИНСТРУКЦИЯ ПО ОХРАНЕ ТРУДА ДЛЯ ОПЕРАТОРА КРУТИЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ТИ-093-2002 – ГОСТ 12.2.033–78 – МР 2.2.7.2129-06 – МР 2.2.8.0017–10 – Трудовой Кодекс РФ – ПУЭ
<p>2. Производственная безопасность при эксплуатации:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Анализ выявленных вредных и опасных производственных факторов – Расчет уровня опасного или вредного производственного фактора 	<p>Вредные производственные факторы:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Повышенный уровень шума; – Неудовлетворительный микроклимат (температура, влажность, подвижность воздух); – Повышенный уровень вибрации; – Недостаток искусственного света. <p>Опасные производственные факторы:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Электрический ток <p>Средства коллективной защиты:</p> <ul style="list-style-type: none"> – к средствам защиты от повышенного уровня шума относятся устройства: звукоизолирующие, звукопоглощающие; глушители шума;

	<p>автоматического контроля и сигнализации;</p> <ul style="list-style-type: none"> – к средствам защиты от повышенного уровня вибрации относятся устройства: виброизолирующие, виброгасящие и вибропоглощающие; автоматического контроля и сигнализации; – к средствам защиты от поражения электрическим током относятся: – оградительные устройства; устройства автоматического контроля и сигнализации; изолирующие устройства и покрытия; устройства защитного заземления и зануления; устройства автоматического отключения; предохранительные устройства; – к средствам нормализации воздушной среды относят: устройства для поддержания нормируемой величины барометрического давления; вентиляции и очистки воздуха; кондиционирования воздуха; локализации вредных факторов; отопления; автоматического контроля и сигнализации; дезодорации воздуха. – к средствам нормализации освещения производственных помещений и рабочих мест относятся: источники света; осветительные приборы; светозащитные устройства; <p>Средства индивидуальной защиты:</p> <ul style="list-style-type: none"> – средства защиты органов дыхания: респираторы; – одежда специальная защитная: накидки; плащи, полуплащи; халаты; - средства защиты ног: сапоги; сапоги с удлиненным голенищем; ботинки; полуботинки. - средства защиты рук: рукавицы; перчатки; полуперчатки. - средства защиты головы: каски защитные; шлемы, подшлемники; – средства защиты глаз: очки защитные. – средства защиты лица: щитки защитные лицевые – средства защиты органа слуха: противошумные шлемы; противошумные вкладыши; противошумные наушники <p>Расчеты:</p> <ul style="list-style-type: none"> – расчет системы искусственного освещения
--	--

<p>3. Экологическая безопасность <u>при эксплуатации</u></p>	<p>Воздействие на селитебную зону: шум Воздействие на литосферу: загрязнение отходами производства (кабельные обрезки, эмалевая изоляция)</p> <p>Воздействие на гидросферу: загрязнение отходами производства (кабельные обрезки, эмалевая изоляция)</p> <p>Воздействие на атмосферу: выделение оксидов металлов при обработке</p>
<p>4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях <u>при эксплуатации</u></p>	<p>Возможные ЧС: пожар (возгорание); взрыв; разрушение конструкции цеха, склада; Землетрясение; Наиболее типичная ЧС: пожар (возгорание)</p>
<p>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</p>	

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
<p>Старший преподаватель</p>	<p>Мезенцева Ирина Леонидовна</p>			

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
<p>5AM16</p>	<p>Анохин Алексей Святославович</p>		

Инженерная школа энергетики
 Направление подготовки – 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника
 Отделение электроэнергетики и электротехники
 Период выполнения: осенний / весенний семестр 2021/2022 учебного года

Форма представления работы:

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)
15.02.2021 г.	Литературный обзор	5
25.02.2022 г.	Общие вопросы работы литцекрытильной машины	10
10.03.2022 г.	Расчет параметров схемы замещения	20
12.04.2022 г.	Моделирование работы алгоритмов в программе Mathcad	10
02.05.2022 г.	Моделирование работы алгоритмов в программе Matlab	20
15.05.2022 г.	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	10
20.05.2022 г.	Социальная ответственность	10
25.05.2022 г.	Раздел на английском языке	5
27.05.2022 г.	Оформление результатов работы и выводов по работе. Формирование файла дипломной работы	10
28.05.2022 г.	Итог	100

СОСТАВИЛ:

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Шилин Александр Анатольевич	д.т.н.		

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ООП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Кладиев Сергей Николаевич	к.т.н.		

Реферат

Выпускная квалификационная работа содержит 169 страниц, 93 рисунка, 30 таблиц, 33 источника, 1 приложение

Ключевые слова: ЛИТЦЕКРУТИЛЬНАЯ МАШИНА, АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ, СКАЛЯРНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ, КОМПЕНСАЦИЯ МОМЕНТА, КОМПЕНСАЦИЯ СКОЛЬЖЕНИЯ.

Предмет исследования – модели и алгоритмы управления асинхронного электропривода литцекрутильной машины.

Цель работы: обеспечение заданного диапазона электропривода литцекрутильной машины.

По результатам работы предложена модель скалярной системы управления электропривода с компенсацией момента и скольжения для улучшения динамических характеристик.

Полученные результаты должны обеспечить необходимые показатели качества работы электропривода.

Выпускная квалификационная работа выполнена в текстовом редакторе Microsoft Word 2019 с использованием программ MathCAD; пакет MATLAB: Simulink; Mathtype.

Содержание

Содержание.....	11
ВВЕДЕНИЕ.....	13
1 ТЕХНОЛОГИЯ СКРУТКИ КАБЕЛЕЙ.....	15
1.1. Описание технологического процесса	15
2 Расчет параметров схемы замещения асинхронного двигателя.....	23
2.1 Выбор двигателя.....	23
2.2 Определение параметров схемы замещения асинхронного двигателя по каталожным данным	26
2.3 РАСЧЁТ ПАРАМЕТРОВ И ПОСТРОЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК.....	33
2.3 Статические характеристики асинхронного электродвигателя	38
3 Расчет и моделирование системы преобразователь частоты – асинхронный двигатель.....	44
3.1. Расчет динамических характеристик асинхронного двигателя.....	44
3.2. ВЫБОР ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ.....	50
3.4 Расчет электромеханических и механических характеристик системы «ПЧ-АД» с IR – компенсацией	61
4.4 Расчет переходных процессов для режима пуска, наброса-сброса нагрузки на валу двигателя системы с IR-компенсацией	65
4.5 Расчет переходных процессов скорости и момента для режима пуска, наброса-сброса нагрузки на валу двигателя системы с компенсацией скольжения	77
4 ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ.....	93
Введение	93
4.1 Предпроектный анализ.....	94
4.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования	94
4.1.2 Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	95
4.1.3 FAST-анализ.....	96
4.1.5 Оценка готовности проекта к коммерциализации.....	104
4.1.6 Методы коммерциализации результатов научнотехнического исследования.....	107
4.2 Инициация проекта	107
4.3 Планирование управления научно-техническим проектом	110
4.3.1 План проект	111
4.4 Бюджет научного исследования	115

4.4.1 Основная заработная плата.....	116
4.4.2 Отчисления во внебюджетные фонды.....	117
4.4.3 Накладные расходы	117
4.4.4. Формирование бюджета затрат научноисследовательского проекта	118
4.5 Организационная структура проекта	119
4.5.1 План управления коммуникациями проекта	119
4.6 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности.....	120
4.6.1 Оценка абсолютной эффективности исследования.....	120
4.6.2 Оценка сравнительной эффективности исследования.....	126
5 СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ.....	130
Введение	130
5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	131
5.2 Производственная безопасность	132
5.2.1 Анализ опасных и вредных факторов на рабочем месте.....	132
5.2.2 Неудовлетворительный микроклимат.....	133
5.2.3 Повышенный уровень шума	134
5.2.4 Повышенный уровень вибрации.....	135
5.2.5 Недостаток искусственного света	136
5.2.6 Электрический ток	139
5.3 Экологическая безопасность.....	141
5.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях	142
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	146
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	149
Приложение А	153

ВВЕДЕНИЕ

Машины для скручивания литцендрата играют важную роль в современной промышленности проводников и кабельных систем. Использование асинхронного электропривода в машинах для скручивания литцы позволяет повысить эффективность, гибкость и качество производства. Они обеспечивают точное управление скоростью вращения, энергоэффективность, надежность и возможность интеграции с системами управления и контроля. В результате применение асинхронных электроприводов способствует оптимизации процесса скручивания литцы и повышению конкурентоспособности предприятий кабельной промышленности.

В современных условиях кабельная промышленность сталкивается с растущими требованиями к производительности, качеству продукции и энергоэффективности. Для достижения этих целей применяются различные технологические инновации, включая системы преобразователь частоты - асинхронный двигатель. Система преобразователь частоты - асинхронный двигатель представляет собой современное решение в области электропривода, которое обеспечивает точное управление скоростью и моментом вращения двигателя. Она состоит из статического преобразователя частоты, который изменяет частоту питающего напряжения, и асинхронного двигателя, который преобразует электрическую энергию в механическую работу.

Преимущества применения системы преобразователь частоты - асинхронный двигатель в кабельной промышленности являются значительными. Они включают:

Регулирование скорости: Система преобразователь частоты позволяет точно контролировать скорость вращения асинхронного двигателя в широком диапазоне. Это особенно важно при производстве кабельной продукции, где

требуется изменение скорости скрутки литцы или других операций в зависимости от типа кабеля или заказа клиента.

Энергоэффективность: Асинхронные двигатели в системе преобразователь частоты обладают высокой энергоэффективностью. Они могут автоматически регулировать свою мощность и потребление электроэнергии в зависимости от текущих требований процесса. Это позволяет снизить энергопотребление и снизить эксплуатационные расходы.

Точность управления: Система преобразователь частоты обеспечивает высокую точность управления двигателем. Это позволяет добиться стабильности и повторяемости процесса скрутки литцы, а также контролировать другие параметры производства кабельной продукции, такие как шаг скрутки, напряжение натяжения и другие факторы. Это способствует повышению качества и однородности производимого кабеля.

Данное исследование посвящено изучению законов регулирования скорости и потенциальному применению системы преобразователя частоты, основанной на асинхронном двигателе, для создания имитационной модели крутильной машины. Цель работы заключается в интеграции этой модели в систему регулируемого электропривода.

1 ТЕХНОЛОГИЯ СКРУТКИ КАБЕЛЕЙ

1.1. Описание технологического процесса

Первые крутильные машины появились в начале 19-го века и использовались для скручивания стальных канатов. В 1837–1840 годах были разработаны первые крутильные машины для производства кабелей, которые работали на основе различных принципов скручивания проводников, таких как клетевой, планетарный, сигарный и другие. Некоторые из первых известных крутильных машин были созданы Wurm (Австрия), Opderbeck (Германия), Olsson (Швеция) и Nawal (Шотландия) в период с 1837 по 1840 годы. С тех пор технологии производства кабелей и крутильные машины продолжали совершенствоваться.

Скрутка кабелей — это процесс соединения нескольких проводников вместе путем скручивания их вместе. Это делается для создания более прочного и гибкого кабеля. Скрученные проводники обычно образуют жилы, которые затем обматываются защитной оболочкой, образуя кабель. В зависимости от метода скрутки кабели могут иметь различную жесткость и гибкость, а также различную степень защиты от внешних воздействий. Скрутка проводников может выполняться как вручную, так и с использованием специализированных крутильных машин. Так как в данной работе речь идет о производстве литцендрата, необходимо ввести определение и описание данного изделия [1].

Литцендрат (также известный как литцендратовый провод) — это тип провода, состоящего из множества тонких медных проволочек, каждая из которых обматывается отдельной изоляцией. Эти отдельные проволочки затем объединяются вместе, образуя комплексную структуру скрутки. Основная цель создания литцендрата - снижение эффекта скин-эффекта, который проявляется в больших проводах при прохождении высокочастотного тока. Скин-эффект приводит к тому, что ток сосредоточен в поверхностном слое провода, что увеличивает его сопротивление и снижает

эффективность передачи сигнала или энергии. Литцендратовая конструкция позволяет равномерно распределить ток между отдельными проволочками, благодаря чему уменьшается сопротивление и снижается эффект скин-эффекта. Это делает литцендрат особенно полезным для передачи высокочастотных сигналов или энергии, где точность и минимальные потери являются важными факторами. Литцендрат широко применяется в различных областях, включая кабельную промышленность, радиосвязь, аудио- и видеотехнику, медицинские устройства и другие приложения, где требуется передача сигнала или энергии с высокой точностью и эффективностью [2].

Технологический процесс скрутки кабеля включает в себя такие механизмы как: отдающее устройство, крутильная машина, тяговое устройство и приемное устройство с раскладчиком. Рассмотрим подробнее эти механизмы и их назначение [3].

Отдающее устройство выполняет следующие функции:

Подача заготовки: оно обеспечивает непрерывную подачу литцы в машину, обеспечивая постоянное движение и натяжение материала во время процесса скрутки.

Регулирование скорости и натяжения: Отдающее устройство может иметь механизмы для регулирования скорости подачи и натяжения материала. Это позволяет контролировать скорость и натяжение литцы, обеспечивая оптимальные условия для процесса скрутки.

Обеспечение равномерной подачи: Отдающее устройство разработано таким образом, чтобы обеспечить равномерную и стабильную подачу литцы, что важно для получения качественного и однородного кабеля.

Отдающее устройство может иметь различные конструкции и механизмы в зависимости от конкретной крутильной машины и требований процесса производства. Отдающее устройство может быть реализовано как в пассивном исполнении, так и с использованием следящего электропривода. Использование следящего электропривода позволяет поддерживать заданную линейную скорость технологического процесса. Важно, чтобы оно было

надежным, обеспечивало точную и контролируемую подачу заготовки, а также было легким в обслуживании и настройке.



Рисунок 1 – Отдающее устройство

Крутильная машина в кабельной промышленности является специальным оборудованием, предназначенным для скрутки проводников или жил, используемых при производстве кабелей. Она играет важную роль в процессе формирования кабельной конструкции, обеспечивая необходимую структурную прочность и электрические характеристики кабеля.

Крутильная машина обычно состоит из нескольких компонентов, включая рабочие валы, системы подачи проводников, устройства для создания вращательного движения и системы контроля процесса скрутки. Она может иметь различную конфигурацию и размеры, в зависимости от требований производства и типа кабелей, которые необходимо произвести.

Процесс скрутки в крутильной машине осуществляется путем вращения рабочих валов, на которых располагаются проводники или жилы. Проводники или жилы подаются в машину из соответствующих источников, таких как барабаны с проволокой или катушки с жилами. В процессе скрутки

крутильная машина обеспечивает управляемое вращение проводников вокруг своей оси, создавая желаемую структуру и геометрию кабеля.

Одной из важных характеристик крутильных машин является их способность регулировать скорость вращения проводников. Это позволяет адаптировать процесс скрутки под различные требования кабельных конструкций. Некоторые машины могут также иметь возможность изменять направление вращения проводников, что позволяет создавать различные типы скрутки, такие как симметричную, несимметричную, параметрическую и другие.

Крутильные машины в кабельной промышленности играют ключевую роль в обеспечении высокого качества и эффективности производства кабельной продукции. Они позволяют достичь необходимой структурной прочности, гибкости, электрических характеристик и других требуемых параметров кабеля. Благодаря использованию крутильных машин процесс производства кабелей становится более автоматизированным.



Рисунок 2 – Крутильная машина

Тяговое устройство в кабельной промышленности, особенно в производстве скрученной литцы, представляет собой специальное

оборудование, используемое для подачи и натяжения проводников в процессе скручивания. Оно обеспечивает поступательное движение проводников вдоль крутильной машины, создавая необходимое напряжение и контролируя процесс скрутки.

Тяговое устройство обычно состоит из нескольких компонентов, включая механизмы подачи проводников, ролики или шкивы для поддержания и направления проводников, а также системы натяжения, которые обеспечивают необходимую силу натяжения на проводники во время скрутки. Оно работает в сотрудничестве с крутильной машиной и другими устройствами на производственной линии, чтобы обеспечить непрерывное и контролируемое движение проводников.

Основная функция тягового устройства - обеспечить равномерную и стабильную подачу проводников в крутильную машину. Оно управляет скоростью подачи, поддерживая оптимальное напряжение и натяжение проводников, что является важным фактором для получения качественной и стабильной скрутки литцы. Тяговое устройство также контролирует равномерное распределение проводников по ширине и длине кабеля, что влияет на его электрические характеристики и механическую прочность.

В процессе скрутки литцы, тяговое устройство обеспечивает плавное движение проводников, предотвращая их перекосы и сплетения. Оно также контролирует и регулирует натяжение проводников, чтобы избежать их излишнего растяжения или обрыва во время процесса скрутки. Таким образом, тяговое устройство играет важную роль в обеспечении высокого качества и точности скручивания литцы.

Современные тяговые устройства в кабельной промышленности обычно оснащены автоматическими системами контроля и регулирования скорости подачи проводников. Это позволяет оптимизировать процесс скрутки и достичь желаемых характеристик литцы с минимальными отклонениями. Системы автоматического управления позволяют следить за равномерностью подачи проводников, контролировать натяжение и скорость

движения, а также реагировать на любые возможные сбои или несоответствия в процессе скрутки.

Тяговые устройства в производстве скрученной литцы могут иметь различные конструкции и характеристики в зависимости от требований и спецификаций производства. Они могут быть настроены для работы с различными типами проводников, такими как медные, алюминиевые или многожильные провода. Также они должны быть адаптированы к требуемым скорости и диапазону натяжения проводников, чтобы обеспечить оптимальные условия для скрутки литцы.

Важным аспектом работы тяговых устройств является безопасность. Они должны быть оснащены защитными механизмами, чтобы предотвратить возможные травмы операторов и снизить риски поломок или повреждений оборудования. Также важно регулярно обслуживать и проверять тяговые устройства, чтобы обеспечить их надежность и долговечность.

Использование тяговых устройств в производстве скрученной литцы позволяет повысить эффективность, качество и надежность процесса производства кабельной продукции. Они обеспечивают точное и контролируемое движение проводников, позволяют достичь необходимого натяжения и равномерности скрутки, а также минимизируют возможность ошибок или дефектов в процессе производства.

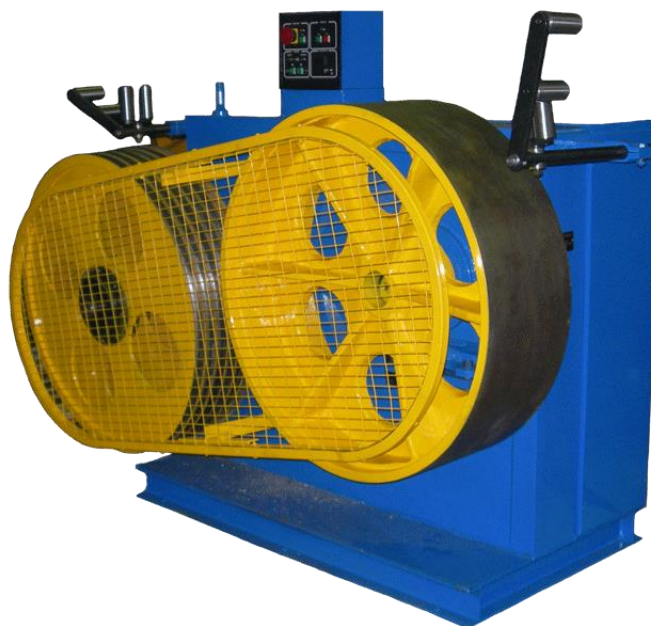


Рисунок 3 – Тяговое устройство

Приемное устройство в крутильной машине является важной составной частью процесса скрутки кабелей. Оно работает совместно с раскладчиком и выполняет функцию приема и намотки скрученного кабеля.

Раскладчик в технологическом процессе отвечает за равномерное распределение готового изделия на барабане приемного устройства, после прохождения через крутильную зону.

Приемное устройство обычно представляет собой специально спроектированную конструкцию, которая обеспечивает аккуратное и регулируемое намотание скрученного кабеля. Оно имеет несколько функций:

Распределение: Приемное устройство распределяет скрученный кабель таким образом, чтобы он равномерно наматывался на барабан или катушку. Это позволяет избежать перекосов и неравномерной намотки, что может привести к проблемам при последующей обработке или использовании кабеля.

Намотка: Приемное устройство обеспечивает управляемую намотку скрученного кабеля на барабан или катушку. Это может быть достигнуто с помощью специальных устройств, таких как регулируемые ролики,

направляющие лапы или другие механизмы, которые создают необходимое напряжение и контролируют процесс намотки.

Управление скоростью: Приемное устройство позволяет регулировать скорость намотки кабеля на барабан или катушку. Это важно для обеспечения равномерной намотки и согласования скорости с процессом скрутки, а также для предотвращения обрывов или перетяжек кабеля.

Приемное устройство взаимодействует с раскладчиком и крутильной машиной, обеспечивая плавный и эффективный процесс скрутки и намотки кабелей. Оно играет важную роль в обеспечении высокого качества производства и минимизации потерь или повреждений кабеля во время его обработки.



Рисунок 4 – Приемное устройство

2 Расчет параметров схемы замещения асинхронного двигателя

2.1 Выбор двигателя

Для определения необходимого диапазона регулирования примем следующие значения [4]:

$$D = \frac{n_{\max}}{n_{\min}} = \frac{1000}{200} = 5.$$

Для обеспечения удовлетворительной работы принимаем следующие значения:

$$1,5 \cdot n_{\text{дв.0}} \geq n_{\max}, \text{ тогда } n_{\text{дв.0}} \geq \frac{n_{\max}}{1,5} \geq \frac{1000}{1,5} \geq 700, \text{ об/мин}$$

Минимальная скорость двигателя, обозначенная как, должна быть не менее 700 об/мин при заданном значении.

Так как, согласно исходным данным, число пар полюсов $p = 3$, то:

$$n_{\text{дв.0}} = \frac{9,55 \cdot 2\pi \cdot f_c}{p} = \frac{9,55 \cdot 2\pi \cdot 50}{3} = 1000 \text{ об/мин.}$$

При использовании двигателя с тремя парами полюсов на максимальной скорости необходимо увеличить частоту напряжения статора до уровня:

$$f_{\max} = \frac{n_{\max} \cdot f_{\text{ном}}}{n_{\text{дв.0}}} = \frac{975 \cdot 50}{1000} = 48,7 \text{ Гц}$$

Для двигателя с тремя парами полюсов на минимальной скорости - снизить частоту напряжения статора до уровня:

$$f_{\min} = \frac{n_{\min} \cdot f_{\text{ном}}}{n_{\text{дв.0}}} = \frac{200 \cdot 50}{1000} = 10 \text{ Гц}$$

Также необходимо учесть постоянный момент нагрузки, создаваемый механизмом, на всем диапазоне регулирования:

$$M_{\text{дв. min}} \geq M_{\text{мех}} \quad M_{\text{дв. max}} \geq M_{\text{мех}}$$

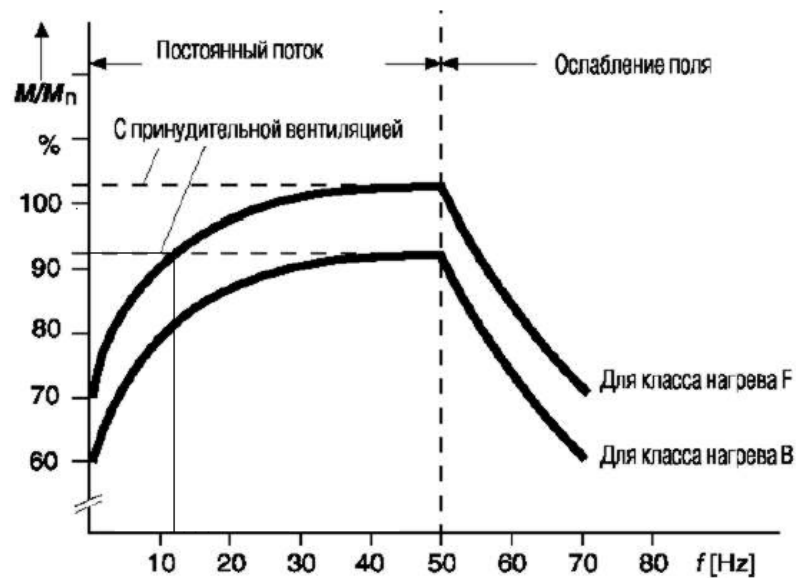


Рисунок 5 – Нагрузочная характеристика АД при частотном регулировании.

При изучении рисунка 5 и анализе работы двигателя с самовентиляцией при частоте 49,3 Гц, мы замечаем важность ограничения момента на определенном уровне $1,03 \cdot M_{\text{дв.ном}}$. Следовательно, для достижения максимальной скорости, необходимо соблюдение определенного 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.

Для обеспечения минимальной скорости при использовании частоты 10 Гц для двигателя с самовентиляцией, возникает потребность в ограничении момента на определенном уровне $0,92 \cdot M_{\text{дв.ном}}$. Следовательно, для достижения данной скорости необходимо выполнение определенного условия:

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

Из двух условий выбираем минимальное ограничение, т.е.:

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

Требуемая мощность АД:

$$P_{mp} \geq \frac{M_{дв.мп} \cdot n_{дв.0}}{9,55} = \frac{108,7 \cdot 1000}{9,55} = 11382,2 \text{ Вт}$$

Для решения задачи выбираем двигатель с требуемой номинальной мощностью и тремя парами полюсов. Подробные технические характеристики данного двигателя приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристики двигателя RA200LB6

Высота оси вращения, мм	160
Мощность P_H , кВт	22
Синхронная частота вращения n_0 , об/мин	100 0
Номинальная частота вращения n_H , об/мин	975
КПД при нагрузке 100% η_H , о.е.	0,9
$\cos \varphi$ при нагрузке 100%, о.е.	0,8 4
Ток номинальный $I_{H.P.}$, А	44
Кратность пускового тока k_i , о.е.	7
Кратность пускового момента k_p , о.е.	2,4
Кратность максимального момента k_{max} , о.е.	3,3
Момент инерции J , кг·м ²	0,2 1
Номинальное фазное напряжение $U_{1\Phi}$, В	220
Коэффициент загрузки двигателя $p_{ж}$, о.е.	0,7 5
Число пар полюсов p , о.е.	3

Перед окончательным выбором двигателя требуется провести дополнительную проверку так как $n_{\text{дв.ном}} < n_{\text{дв.0}}$. Рассчитаем момент, соответствующий данному двигателю, который составляет:

$$M_{\text{дв.ном}} = 9,55 \cdot \frac{P_{\text{дв.ном}}}{n_{\text{дв.ном}}} = 9,55 \cdot \frac{22000}{1000} = 210,1 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

После анализа условия $M_{\text{дв.ном}} \geq M_{\text{дв.тр}}$ можно сделать вывод, что выбор двигателя является правильным.

2.2 Определение параметров схемы замещения асинхронного двигателя по каталожным данным

Для более удобного и простого расчета электромеханических и механических характеристик асинхронного двигателя часто используется Т-образная схема замещения. Эта схема замещения позволяет проводить инженерные расчеты без необходимости применения более сложных методов. В Т-образной схеме замещения асинхронный двигатель представляется в виде комбинации индуктивностей, активных и реактивных сопротивлений, которые описывают его электрические свойства.

Такая модель позволяет учитывать основные электромагнитные параметры двигателя, такие как реактивное сопротивление статора и ротора, активное сопротивление ротора, индуктивности статора и ротора. При использовании этой модели можно определить характеристики двигателя, такие как момент сопротивления, мощность, КПД и другие.

Т-образная схема замещения является удобной и практической моделью, которая позволяет инженерам проводить расчеты и анализировать работу асинхронных двигателей без необходимости в более сложных и времязатратных методах расчета. Она является основой для многих инженерных расчетов и исследований в области асинхронных двигателей [5].

Это позволяет инженерам и исследователям эффективно проектировать и анализировать работу асинхронных двигателей, учитывая их электрические свойства и характеристики. Т-образная схема замещения

является широко применяемым инструментом в инженерных расчетах и исследованиях асинхронных двигателей.

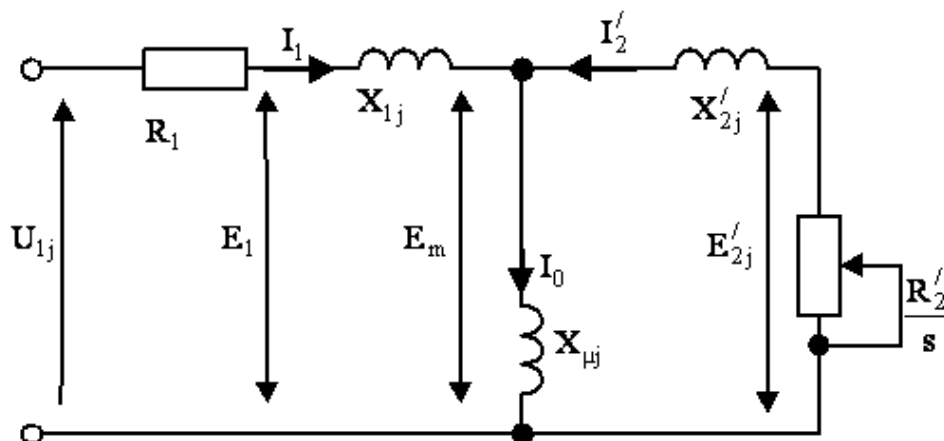


Рисунок 9 – Схема замещения асинхронного двигателя

Представлены основные уравнения асинхронного двигателя, которые относятся к выбранной схеме замещения:

$$U_{1\phi} - \bar{E}_m - j \cdot X_1 \cdot \bar{I}_1 - R_1 \cdot \bar{I}_1 = 0 \quad (2.1)$$

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

На рисунке 10 представлена наглядная векторная диаграмма, иллюстрирующая соответствие между векторами токов, ЭДС и напряжений в системе. Данная диаграмма была разработана с учетом уравнений (4.1) и позволяет наглядно представить связь между указанными величинами.

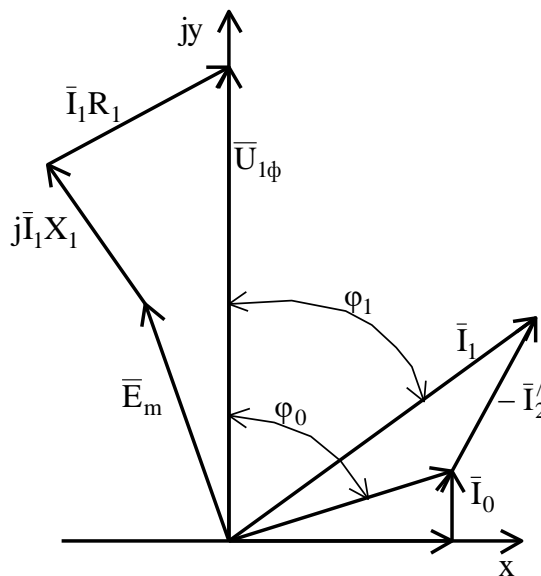


Рисунок 10 – Векторная диаграмма асинхронной машины

Используя T-образную схему замещения для расчета асинхронного двигателя, следующие данные требуются для более точных результатов:

Номинальная мощность двигателя P_n (в киловаттах, кВт) указывает на мощность, при которой двигатель должен работать в номинальных условиях. Это важный параметр, определяющий рабочие характеристики двигателя.

Номинальное линейное напряжение U_{1n} (в вольтах) представляет собой напряжение, при котором двигатель должен функционировать. Этот параметр обеспечивает правильную работу двигателя и его соответствие номинальным условиям.

Номинальная частота вращения n_n (в оборотах в минуту, об/мин) определяет скорость вращения ротора при номинальных условиях. Это важная характеристика, влияющая на производительность и эффективность работы двигателя.

Номинальное скольжение s_n (в относительных единицах, о.е.) выражает отношение разности между синхронной частотой и фактической частотой вращения ротора к синхронной частоте. Этот параметр помогает оценить отклонение скорости вращения двигателя от синхронной частоты.

КПД η_n (Коэффициент полезного действия) в режиме номинальной мощности (в процентах, %) отображает отношение выходной мощности к входной мощности при номинальной мощности. Этот показатель позволяет оценить эффективность работы двигателя при его номинальной мощности.

Коэффициент мощности в режиме номинальной мощности $\cos \phi_n$ (в относительных единицах, о.е.) представляет собой отношение активной мощности к полной мощности в режиме номинальной мощности. Этот коэффициент отражает энергетическую эффективность работы двигателя.

Кратность пускового тока $k_i = \frac{I_n}{I_n}$ (в относительных единицах, о.е.)

показывает отношение максимального тока пуска к номинальному току. Этот

параметр помогает оценить потенциальную нагрузку на систему при пуске двигателя.

Кратность пускового момента $k_n = \frac{M_n}{M_n}$ (в относительных единицах,

о.е.) отражает отношение максимального момента пуска к номинальному моменту. Этот параметр помогает определить пусковые характеристики двигателя.

Кратность максимального момента $k_{\max} = \frac{M_{\kappa}}{M_n}$ (в относительных

единицах, о.е.) определяет отношение максимального момента к номинальному моменту. Этот параметр помогает оценить максимальную производительность двигателя при перегрузках.

Кратность минимального момента $k_{\min} = \frac{M_{\min}}{M_n}$ (в относительных

единицах, о.е.) выражает отношение минимального момента к номинальному моменту. Этот параметр помогает определить работу двигателя при низких нагрузках.

Эти данные позволяют более точно определить характеристики и параметры работы асинхронного двигателя в различных режимах и условиях. Они являются важной информацией при проектировании и выборе асинхронного двигателя для конкретных задач.

При расчете асинхронного двигателя с использованием Т-образной схемы замещения необходимо учитывать следующие допущения:

Постоянные магнитные и механические потери: В расчетах принимается, что потери энергии в виде тепла и трения внутри двигателя остаются постоянными при любом режиме работы. Для упрощения анализа эти потери считаются равными 0,02.

Независимость активных сопротивлений статорной и роторной обмоток: предполагается, что активные сопротивления обмоток не зависят от

режима работы двигателя. Это значит, что эффекты вытеснения в расчетах не учитываются.

Эти допущения позволяют упростить расчеты и предоставить общую оценку работы асинхронного двигателя в различных режимах. Однако, в реальных условиях эксплуатации могут возникать отклонения от данных допущений, которые могут влиять на точность модели и результаты расчетов. Поэтому при более точном и подробном анализе асинхронной машины могут использоваться более сложные модели, учитывающие более реалистичные условия работы.

Для определения тока холостого хода асинхронного двигателя можно использовать следующие выражения:

Выражение для расчета тока холостого хода:

$$I_0 = \sqrt{\frac{I_{11}^2 - (p_* \cdot I_{1i} \cdot (1 - s_i) / (1 - p_* \cdot s_i))^2}{1 - (p_* \cdot (1 - s_i) / (1 - p_* \cdot s_i))^2}}, \quad (2.2)$$

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;

Выражение для расчета тока статора при частичной нагрузке:

$$I_{11} = \frac{p_* \cdot P_n}{3 \cdot U_{1\phi} \cdot \cos \phi_{p_*} \cdot \eta_{p_*}}, \quad (2.3)$$

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

η_{p_*} - КПД при частичной нагрузке;

$p_* = \frac{P}{P_n}$ – коэффициент загрузки двигателя.

КПД при номинальной и частичной нагрузке практически одинаковы, поэтому можно использовать формулу (3.28) для расчета тока холостого хода.

$$\eta_{p*} \approx \eta_n, \quad (2.4)$$

Для расчета критического скольжения можно использовать формулу, известную как формула Клосса. Она позволяет определить соотношение между различными параметрами.

$$s_k = s_n \cdot \frac{k_{\max} + \sqrt{k_{\max}^2 - (1 - 2 \cdot s_n \cdot \beta \cdot (k_{\max} - 1))}}{1 - 2 \cdot s_n \cdot \beta \cdot (k_{\max} - 1)}, \quad (2.5)$$

$$\beta = R_1 / (C_1 \cdot R_2'), \quad (2.6)$$

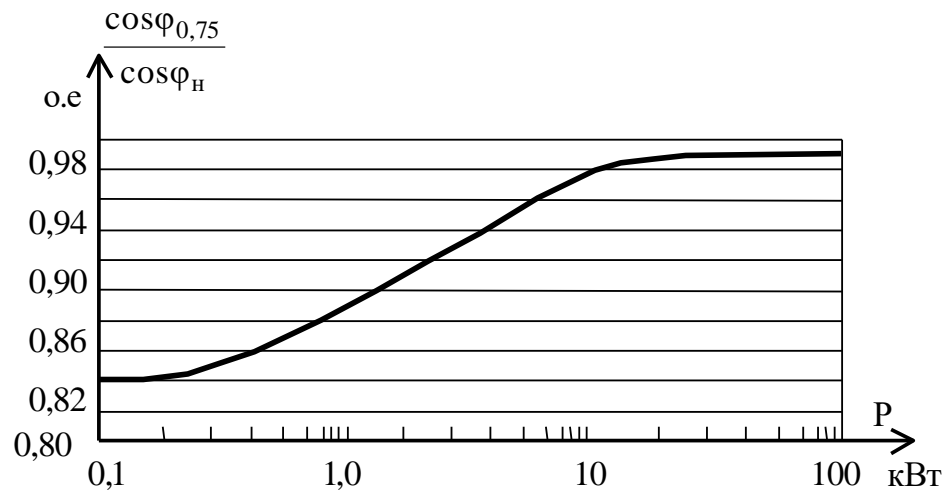


Рисунок 11 – Зависимость $\cos \phi_{0,75} / \cos \phi_i$ от мощности асинхронного двигателя

Учитывая, что коэффициент мощности находится в диапазоне от 0,6 до 4, мы можем выбрать начальное приближение равным $\beta = 1$.

Далее следует определить ряд промежуточных коэффициентов:

$$C_1 = 1 + \frac{I_0}{2 \cdot k_i \cdot I_{1f}}, \quad (3.31)$$

$$A_1 = \frac{m \cdot U_{1\phi}^2 \cdot (1 - s_n)}{2 \cdot C_1 \cdot k_{\max} \cdot P_n}, \quad (3.32)$$

$$A_0 = \frac{I_{1n} \cdot \cos \phi_n - I_0 \cos \phi_0}{U_{1\phi}}, \quad (3.33)$$

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

$$B = \frac{1}{s_H} + \frac{1}{s_K} - A_0 \cdot 2 \cdot \frac{A_1}{s_H}, \quad (3.34)$$

$$C = \frac{1}{s_H \cdot s_K} - \left(\frac{1}{s_K^2} + \frac{1}{s_H^2} \right) \cdot A_0 \cdot A_1, \quad (2.6)$$

По полученным значениям проводим проверку заданного в начале коэффициента:

$$\beta_p = \left| \frac{-B}{2} + \sqrt{\frac{B}{2} - C} \right|, \quad (2.7)$$

Если значение коэффициента β_p не соответствует заданному β , требуется корректировка этого коэффициента. В случае, когда значение β_p превышает заданное значение, необходимо уменьшить его, а если оно меньше заданного, то увеличить. Затем следует повторить расчёт, продолжая итерации до получения удовлетворительных результатов.

Для асинхронного двигателя активное сопротивление ротора, приведенное к обмотке статора, может быть определено как:

$$R_2' = \frac{A_1}{\left(\beta + \frac{1}{s_K} \right) \cdot C_1}, \quad (2.8)$$

Активное сопротивление статорной обмотки может быть определено с использованием следующего выражения:

$$R_1 = C_1 \cdot R_2' \cdot \beta, \quad (2.9)$$

Для определения параметра, необходимого для расчета индуктивного сопротивления короткого замыкания, мы можем использовать следующую формулу:

$$\gamma = \sqrt{\frac{1}{s_e^2} - \beta^2}, \quad (2.10)$$

Таким образом, значение может быть найдено по формуле:

$$X_{кн} = \gamma \cdot C_1 \cdot R_2', \quad (2.11)$$

Чтобы определить индуктивное сопротивление ротора, приведенное к статорной обмотке, мы можем использовать следующее выражение:

$$X_{2н}' = \frac{0,58 \cdot X_{кн}}{C_1}, \quad (2.12)$$

Индуктивное сопротивление статорной обмотки может быть вычислено с помощью следующего выражения:

$$X_{1н} = 0,42 \cdot X_{кн}, \quad (2.13)$$

На векторной диаграмме мы можем наблюдать, что в номинальном режиме ЭДС ветви намагничивания, созданная потоком воздушного зазора в обмотке статора, равна:

$$E_1 = \sqrt{(U_{1\phi} \cdot \cos \phi_n - R_1 \cdot I_{1н})^2 + (U_{1н} \cdot \sin \phi_n - X_{1н} \cdot I_{1н})^2}, \quad (2.14)$$

Таким образом, для расчета индуктивного сопротивления намагничивания мы можем использовать следующую формулу:

$$X_{\mu н} = \frac{E_m}{I_0}, \quad (2.15)$$

После этого мы можем приступить к дальнейшему расчету механических и электромеханических характеристик, используя параметры схемы замещения.

2.3 РАСЧЁТ ПАРАМЕТРОВ И ПОСТРОЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Для определения параметров асинхронного двигателя мы будем использовать методику, описанную в разделе 2.1. Необходимые данные для расчета возьмем из таблицы 1.

Расчет параметров будет произведен с помощью программы MATHCAD.

Для определения тока холостого хода мы должны сначала рассчитать синхронную частоту вращения и номинальное скольжение:

$$\omega_0 = \frac{\pi \cdot n_0}{30} = \frac{3,14 \cdot 1000}{30} = 104.72 \text{ рад/с};$$

$$s_H = \frac{n_0 - n_H}{n_0} = \frac{1000 - 975}{750} = 0,025 \text{ о.е.}$$

Ток холостого хода будет найден с использованием следующей формулы::

$$I_0 = \sqrt{\frac{I_{11}^2 \cdot (p_{\text{ж}} \cdot I_{1\text{H}} \cdot \frac{1 - s_H}{1 - p_{\text{ж}} \cdot s_H})^2}{1 - (p_{\text{ж}} \cdot \frac{1 - s_H}{1 - p_{\text{ж}} \cdot s_H})^2}}, \quad (2.16)$$

Помимо номинального скольжения и синхронной скорости вращения необходимо найти значения номинального тока статора $I_{1\text{H}}$, тока статора при частичной нагрузке I_{11} , кпд при частичной нагрузке $\eta_{\text{НРЖ}} = \eta_{\text{H}} = 0,9$ о.е. и коэффициент мощности $\cos \varphi_{\text{РЖ}}$ при частичной нагрузке по формулам:

$$I_{11} = \frac{p_{\text{ж}} \cdot P_{\text{H}}}{3 \cdot U_{1\Phi} \cdot \cos \varphi_{\text{РЖ}} \cdot \eta_{\text{НРЖ}}} = \frac{0,75 \cdot 22000}{3 \cdot 220 \cdot 0,831 \cdot 0,861} = 33,957 \text{ А},$$

$$\cos \varphi_{\text{РЖ}} = \cos \varphi \cdot \left(\frac{\cos \varphi_{0,75}}{\cos \varphi} \right) = 0,84 \cdot 0,989 = 0,831 \text{ о.е.},$$

Для определения относительного коэффициента мощности при частичной нагрузке мы можем использовать данные с графика, представленного на рисунке 15:

$$\frac{\cos \varphi_{0,75}}{\cos \varphi} = 0,989$$

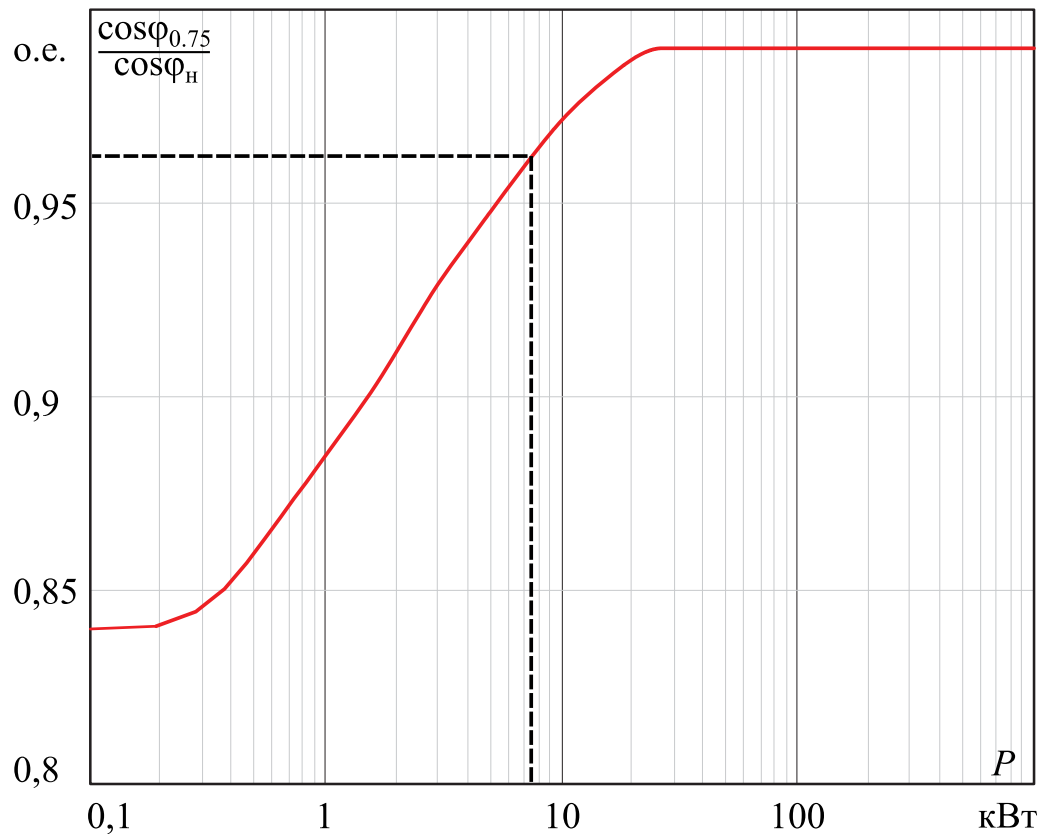


Рисунок 15 – Зависимость $\cos\varphi_{0,75} / \cos\varphi$ от мощности асинхронного двигателя

Номинальный ток статора двигателя:

$$I_{1H} = \frac{P_H}{3 \cdot U_{1\Phi} \cdot \cos\varphi \cdot \eta_H} = \frac{22000}{3 \cdot 220 \cdot 0,84 \cdot 0,9} = 44,092 \text{ А.}$$

Затем, с использованием формулы (2.2), мы сможем найти ток холостого хода двигателя:

$$I_0 = \sqrt{\frac{34,957^2 - \left(0,75 \cdot 44,092 \cdot \frac{1-0,025}{1-0,75 \cdot 0,025}\right)^2}{1 - \left(0,75 \cdot \frac{1-0,025}{1-0,75 \cdot 0,025}\right)^2}} = 17,89 \text{ А.}$$

Далее, воспользуемся формулой Клосса для определения соотношения критического скольжения, приняв значение $\beta = 1$:

Формула для расчета критического скольжения: (2.3)

$$s_K = s_H \cdot \frac{k_{max} + \sqrt{k_{max}^2 - [1 - 2 \cdot s_H \cdot \beta \cdot (k_{max} - 1)]}}{1 - 2 \cdot s_H \cdot \beta \cdot (k_{max} - 1)}, \quad (2.17)$$

Теперь мы можем найти значения критического скольжения с помощью формулы (2.3):

$$s_K = 0,02667 \cdot \frac{3,3 + \sqrt{3,3^2 - [1 - 2 \cdot 0,025 \cdot 1 \cdot (3,2 - 1)]}}{1 - 2 \cdot 0,025 \cdot 1 \cdot (3,2 - 1)} = 0,183 \text{ о.е.}$$

Затем, найдем значения коэффициентов:

$$C_1 = 1 + \frac{I_0}{2 \cdot k_i \cdot I_{IH}} = \frac{17,89}{2 \cdot 7 \cdot 44,092} = 1,029 \text{ о.е.},$$

$$A_1 = m \cdot U_{1\Phi}^2 \cdot \frac{1 - s_H}{2 \cdot C_1 \cdot k_{max} \cdot P_H} = 3 \cdot 220^2 \frac{1 - 0,025}{2 \cdot 1,029 \cdot 3,3 \cdot 22000} = 0,948 \text{ о.е.}$$

Теперь мы готовы определить активное сопротивление ротора, приведенное к обмотке статора асинхронного двигателя:

$$R_2' = \frac{A_1}{\left(\beta + \frac{1}{s_K}\right) \cdot C_1} = \frac{0,948}{\left(1 + \frac{1}{0,183}\right) \cdot 1,029} = 0,142 \text{ Ом.}$$

Активное сопротивление ротора, приведенное к обмотке статора:

$$R_2' = \frac{A_1}{\left(\beta + \frac{1}{s_K}\right) \cdot C_1} = \frac{0,948}{\left(1 + \frac{1}{0,183}\right) \cdot 1,029} = 0,142 \text{ Ом.}$$

Также, определим активное сопротивление обмотки статора:

$$R_1 = C_1 \cdot R_2' \cdot \beta = 1,029 \cdot 0,142 \cdot 1 = 0,146 \text{ Ом.}$$

Наконец, найдем параметр, который поможет нам определить индуктивное сопротивление короткого замыкания:

$$\gamma = \sqrt{\left(\frac{1}{s_K^2}\right) - \beta^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{0,183^2}\right) - 1} = 5,385.$$

Найдем значение индуктивного сопротивления короткого замыкания:

$$X_{KH} = \gamma \cdot C_1 \cdot R_2' = 5,385 \cdot 1,029 \cdot 0,142 = 0,788 \text{ Ом.}$$

Затем, найдем индуктивное сопротивление роторной обмотки, приведенное к статорной::

$$X'_{2\sigma} = 0,58 \cdot \frac{X_{\text{кн}}}{C_1} = 0,58 \cdot \frac{0,788}{1,029} = 0,444 \text{ Ом.}$$

Далее, рассчитаем индуктивность рассеяния роторной обмотки:

$$L'_{2\sigma} = \frac{X_{2\sigma}}{2 \cdot \pi \cdot f_s} = \frac{0,444}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 1,413 \text{ мГн.}$$

Теперь, найдем индуктивное сопротивление статорной обмотки:

$$X_{1\sigma} = 0,42 \cdot X_{\text{кн}} = 0,42 \cdot 0,788 = 0,331 \text{ Ом.}$$

Также, определим индуктивность рассеяния статорной обмотки:

$$L_{1\sigma} = \frac{X_{1\sigma}}{2 \cdot \pi \cdot f_s} = \frac{0,331}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 1,053 \text{ мГн.}$$

Значения C_1 , R'_2 и $X_{\text{кн}}$, которые мы нашли ранее, будут использованы для определения критического скольжения::

$$s_{\text{к1}} = \frac{C_1 \cdot R'_2}{\sqrt{R_1^2 + X_{\text{кн}}^2}} = \frac{1,029 \cdot 0,142}{\sqrt{0,146^2 + 0,788^2}} = 0,183 \text{ о.е.}$$

Рассчитанные значения $s_{\text{к1}} = s_{\text{к}} = 0,183$ равны.

Найдем $\sin \varphi$, для определения ЭДС ветви намагничивания

$$\varphi = \arccos(\cos \varphi) = \arccos(0,84) = 0,574;$$

$$\sin \varphi = 0,543.$$

Найдем ЭДС ветви намагничивания E_1 , наведенную потоком воздушного зазора в обмотке статора в номинальном режиме:

$$E_1 = \sqrt{(U_{1\Phi} \cdot \cos \varphi - R_1 \cdot I_{1\text{н}})^2 + (U_{1\Phi} \cdot \sin \varphi - X_{1\sigma} \cdot I_{1\text{н}})^2}, \quad (2.18)$$

Получаем численные значения ЭДС ветви намагничивания по формуле 2.4

$$E_1 = \sqrt{(220 \cdot 0,84 - 0,146 \cdot 44,092)^2 + (220 \cdot 0,543 - 0,331 \cdot 44,092)^2} = 206,852$$

Тогда индуктивное сопротивление намагничивания:

$$X_m = \frac{E_1}{I_0} = \frac{206,676}{17,89} = 11,562 \text{ Ом.}$$

А индуктивность цепи намагничивания:

$$L_m = \frac{X_m}{2 \cdot \pi \cdot f_s} = \frac{11,562}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 0,07 \text{ Гн.}$$

Сведем все расчетные данные в таблицу 3.

2.3 Статические характеристики асинхронного электродвигателя

Расчет характеристик производим, используя параметры схемы замещения.

Рассчитаем и построим естественную электромеханическую характеристику [6]:

$$I_1(\omega) = \frac{I_0^2 + I_2'^2 + 2 \cdot I_0 \cdot I_2' \cdot \frac{X_{1\sigma} + X_{2\sigma}'}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2' \cdot \omega_0}{\omega_0 - \omega}\right)^2 + (X_{1\sigma} + X_{2\sigma}')^2}}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2' \cdot \omega_0}{\omega_0 - \omega}\right)^2 + (X_{1\sigma} + X_{2\sigma}')^2}}, \quad (2.19)$$

где I_2' рассчитывается по формуле:

$$I_2'(\omega) = \frac{U_{1\Phi}}{\pm \sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2' \cdot \omega_0}{\omega_0 - \omega}\right)^2 + (X_{1\sigma} + X_{2\sigma}')^2}}, \quad (2.20)$$

Используя вышеприведенные формулы, мы можем рассчитать естественные электромеханические характеристики. $I_2'(\omega)$ (рис.4) и $I_1(\omega)$ (рис.5).

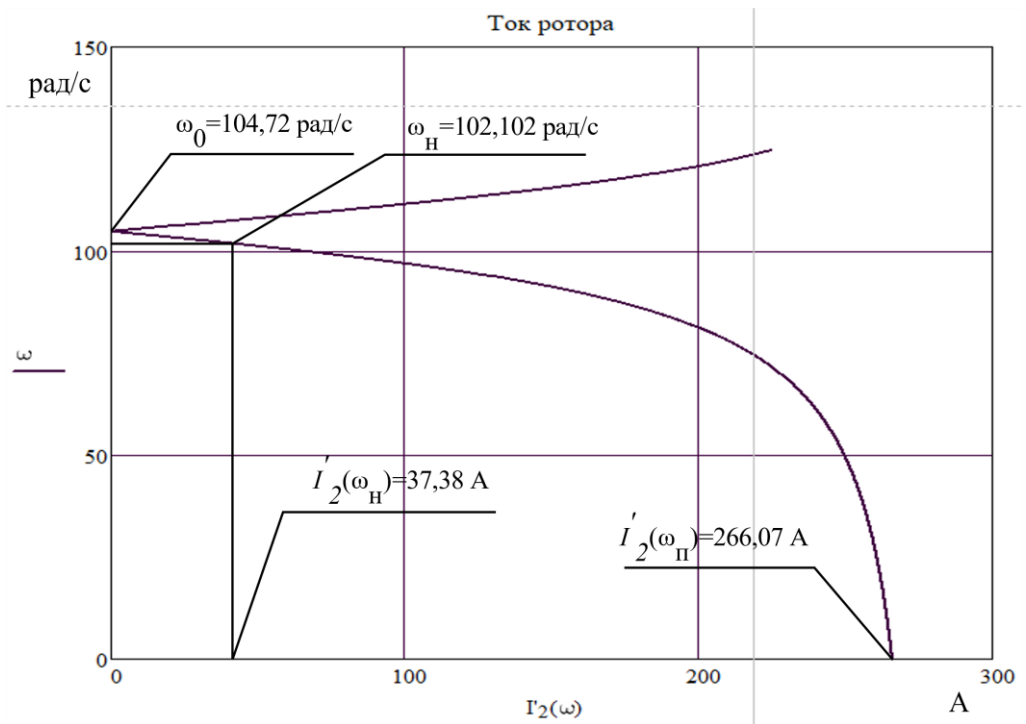


Рисунок 16 – Естественная электромеханическая характеристика

$$I_2'(\omega)$$

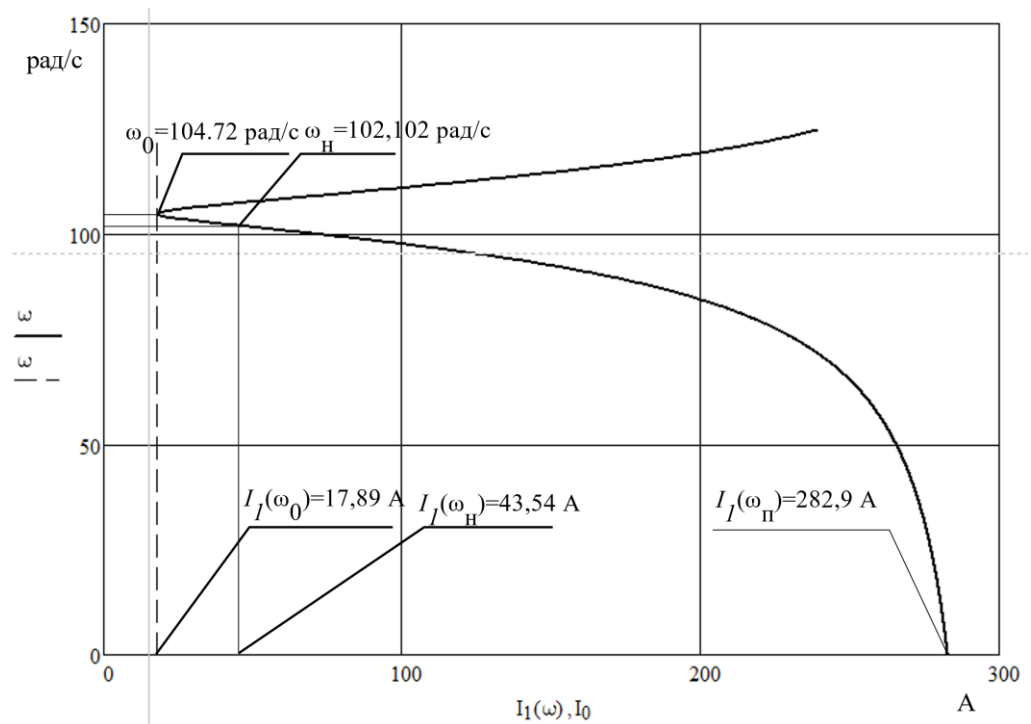


Рисунок 17 – Естественная электромеханическая характеристика $I_1(\omega)$

Чтобы произвести анализ описанных графиков, необходимо определить значения характерных точек с кривой естественной электромеханической характеристики $I_1(\omega)$ [7]. Таким образом из графика, представленного на рисунке 5, были получены значения:

$\omega_H = 102,102$ рад/с - номинальная скорость;

$I_1(\omega_H) = 43,522$ А - номинальный ток;

$\omega_{\Pi} = 0$ рад/с - скорость в момент пуска;

$I_1(\omega_{\Pi}) = 282,904$ А - пусковой ток.

С другой стороны, есть параметры тока, которые можно рассчитать из паспортных данных двигателя.

$I_H = 44,092$ А - номинальный ток;

$I_{\Pi} = I_H \cdot k_i = 44,092 \cdot 7 = 308,644$ А - пусковой ток;

Видно, что между расчетными данными и реальными есть небольшое различие, так, например для номинального тока отклонение вычисленных значений от проектных данных завода-изготовителя

$$\delta_{I_H} = \frac{|I_H - I_1(\omega_H)|}{I_H} = \frac{|44,092 - 43,522|}{44,092} \cdot 100\% = 1,2\% \quad . \quad \text{Это значение}$$

вписывается в инженерные допуски, что говорит о правильности расчета. Аналогичным образом рассчитаем погрешность и для пускового тока, которое

$$\text{равняется} \quad \delta_{I_{\Pi}} = \frac{|I_{\Pi} - I_1(\omega_{\Pi})|}{I_{\Pi}} = \frac{|308,644 - 282,904|}{308,644} \cdot 100\% = 8,3\%$$

Паспортное значение принимает существенно большее значение по сравнению с расчетным и это, по всей видимости, связано с тем, что характеристика, описываемая формулой (3.1) имеет упрощенную структуру, не учитывающую ряд физических и технологических явлений в этом участке кривой, что и дает свои последствия. Но так или иначе в линейной области электромеханической характеристики имеет место быть высокая сходимость расчетных данных с проектными, что и говорит об адекватности расчета и высокой применимости полученных параметров схемы замещения двигателя.

Дополнительно к электромеханическим характеристикам, мы также рассчитаем и построим естественную механическую характеристику, используя следующую формулу:

$$M(\omega) = \frac{3 \cdot U_{1\Phi}^2 \cdot R_2'}{(\omega_0 - \omega) \cdot \left(\left(R_1 + \frac{R_2' \cdot \omega_0}{(\omega_0 - \omega)} \right)^2 + (X_{1\sigma} + X_{2\sigma}')^2 \right)}, \quad (2.21)$$

Согласно этой формуле, мы получаем естественную механическую характеристику, которая представлена на рисунке 6.

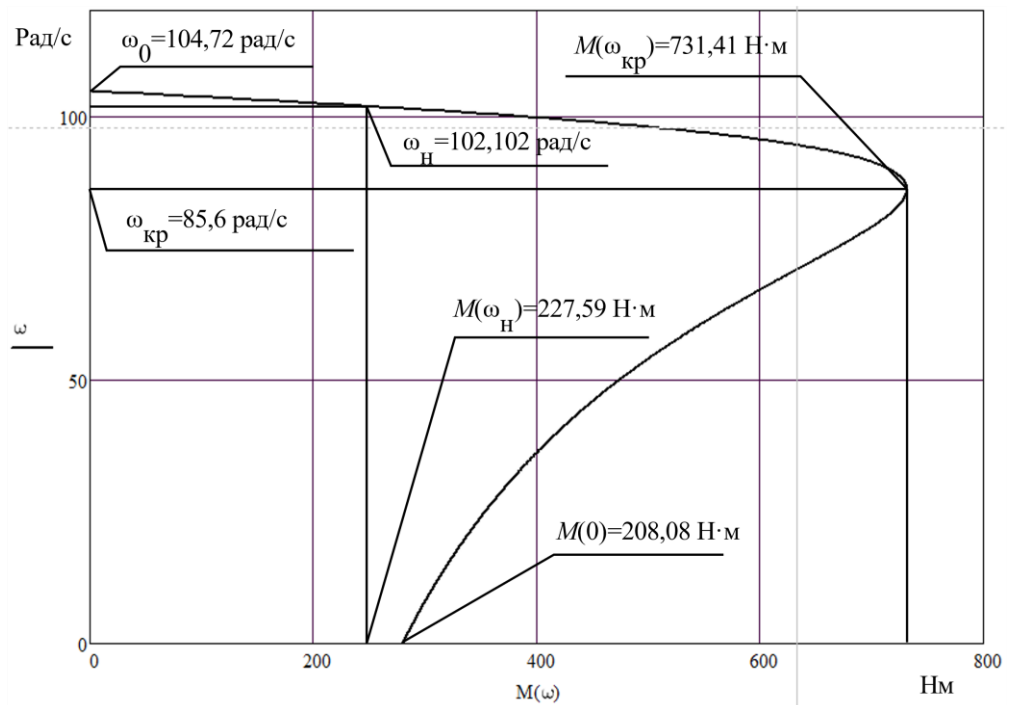


Рисунок 18 – Естественная механическая характеристика двигателя

$$M(\omega)$$

По аналогии с электромеханическими характеристиками произведем сравнение данных расчетной зависимости с данными завода-изготовителя. Из графика механической характеристики определяем:

$\omega_H = 102,102$ рад/с - номинальная скорость;

$M(\omega_H) = 215,471$ Н · м - номинальный момент;

$\omega_{кр} = 85,601 \text{ рад/с}$ - значение скорости, соответствующее критическому скольжению;

$$M(\omega_{кр}) = 731,412 \text{ Н} \cdot \text{м} - \text{критический момент};$$

$$\omega_{п} = 0 \text{ рад/с} - \text{скорость в момент пуска};$$

$$M(\omega_{п}) = 280,078 \text{ Н} \cdot \text{м} - \text{пусковой момент}.$$

Эти же точки, согласно паспортным данным:

$$M_{н} = \frac{P_{н}}{\omega_{н}} = \frac{22000}{102,102} = 215,471 \text{ Н} \cdot \text{м} - \text{номинальный момент};$$

$$M_{к.р} = M_{н} \cdot k_{max} = 215,471 \cdot 3,3 = 711,054 \text{ Н} \cdot \text{м} - \text{критический момент};$$

$$M_{п.р} = M_{н} \cdot k_{п} = 215,471 \cdot 2,4 = 517,13 \text{ Н} \cdot \text{м} - \text{пусковой момент};$$

Сравним численно вышеприведенные значения. Так для номинального момента ошибка вычислений имеет значение

$$\delta_{M_{н}} = \frac{|M_{н} - M(\omega_{н})|}{M_{н}} = \frac{|215,471 - 227,599|}{215,471} \cdot 100\% = 5,62 \%$$

А для критического

$$\delta_{M_{к.р}} = \frac{|M_{к.р} - M(\omega_{кр})|}{M_{к.р}} = \frac{|711,054 - 731,412|}{711,054} \cdot 100\% = 2,86 \%$$

Полученные значения также попадают в инженерную погрешность, что еще раз говорит о адекватной оценке параметров двигателя в линейной области характеристик. Но «ложкой дегтя» является значение расчетного пускового момента, которое отличается от паспортного на

$$\delta_{M_{п}} = \frac{|M_{п.р} - M(\omega_{п})|}{M_{п.р}} = \frac{|517,131 - 280,078|}{517,131} \cdot 100\% = 45,84 \%$$

Такое различие связано, в первую очередь с тем, что при малых скольжениях проявляется поверхностный эффект в обмотке ротора, который не учитывается в формуле (3.3). За счет него сопротивление ротора

существенно растет в начальный момент работы двигателя вместе с пусковым моментом.

Заключение по расчету

Для асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором RA200L6 была выполнена расчетная модель Т-образной схемы замещения. С использованием среды Mathcad были определены все необходимые параметры этой схемы. Таким образом, получена полная характеристика данного двигателя.

Также построены статические характеристики асинхронного электродвигателя и проведен их анализ. Значения контрольных точек, полученных в ходе расчета в большей части несущественно отличаются от тех, которые предоставлены заводом изготовителем. Как правило это наблюдается в линейной области электромеханических и механических характеристик. Значительное различие в значениях пускового момента и тока вызвано поверхностным эффектом вытеснения тока в обмотке стержнях ротора, который не был учтен в расчетах. Этот эффект проявляется при скольжениях, близких к единице, и объясняет наблюдаемую коллизию. Но так или иначе в рабочих областях характеристики расчетные параметры схемы замещения получены адекватные, что и было показано. А это позволит в дальнейшем использовать их в задаче управления этим двигателем

3 Расчет и моделирование системы преобразователь частоты – асинхронный двигатель

3.1. Расчет динамических характеристик асинхронного двигателя

Для окончательной проверки правильности определения параметров схемы замещения асинхронного двигателя необходимо выполнить динамическое моделирование электропривода. Это может быть осуществлено с использованием современных программных средств, таких как MATLAB, которые обеспечивают автоматическое масштабирование моделирования независимо от мощности двигателя и его параметров [8]. Такой подход позволяет достичь высокой точности и надежности в процессе моделирования и подтвердить правильность нахождения параметров схемы замещения.

Такой подход позволяет проверить соответствие результатов моделирования реальному поведению асинхронного электропривода и удостовериться в правильности найденных параметров схемы замещения с учетом допущенной погрешности. Имитационная модель представлена на рисунке 19.

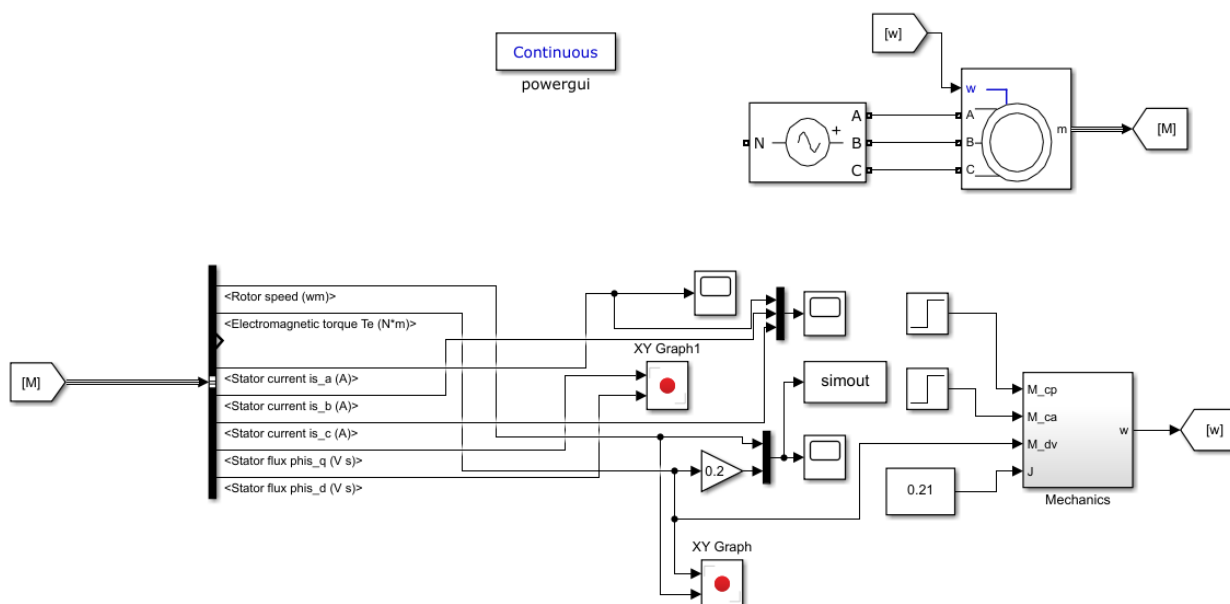


Рисунок 19 – Имитационная модель асинхронного двигателя

С помощью этой модели получены переходные процессы угловой скорости вала двигателя и электромагнитного момента (рис. 20).

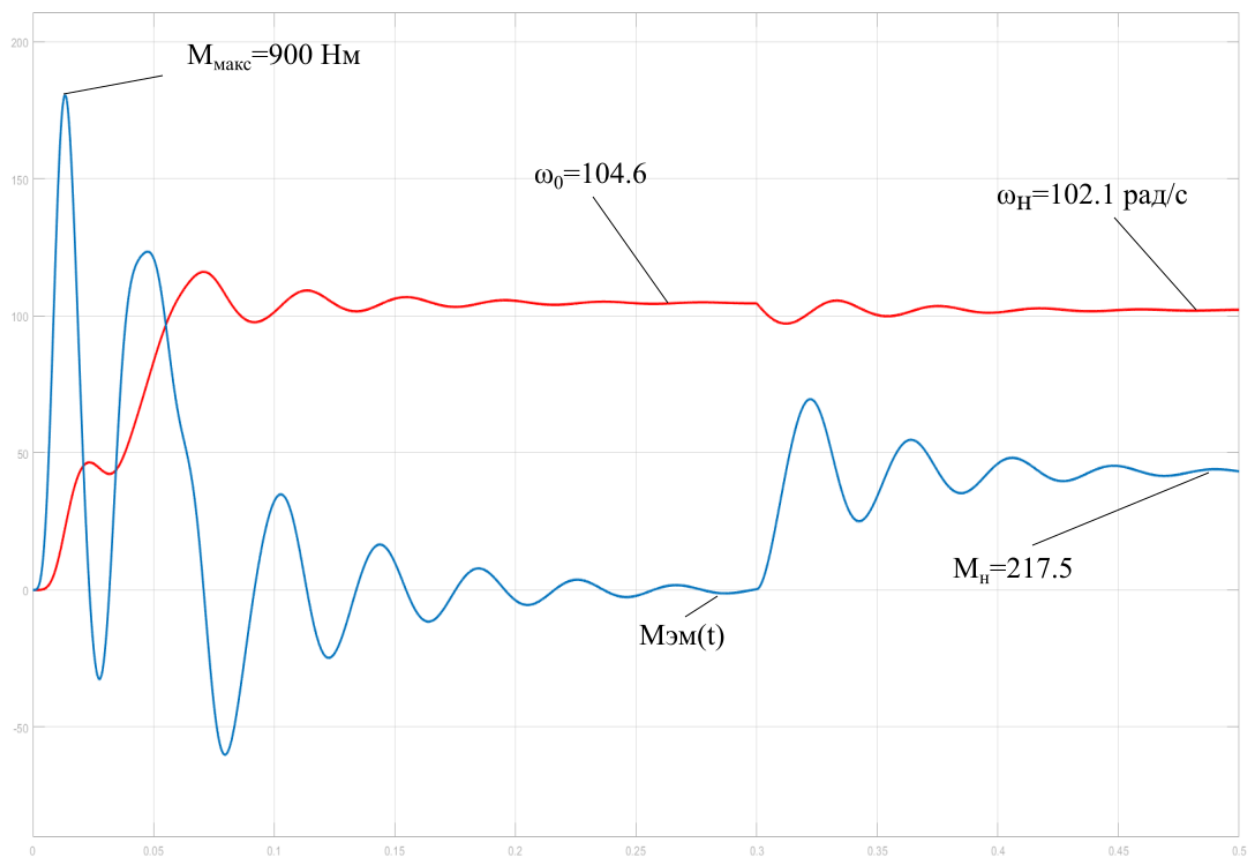


Рис. 20 – Переходные процессы угловой скорости и момента

Этим переходным процессам соответствует некий фазовый портрет – динамическая механическая характеристика, представленная на рисунке 3. Также на этом рисунке приведена кривая статической механической характеристики для сравнения ее с динамической.

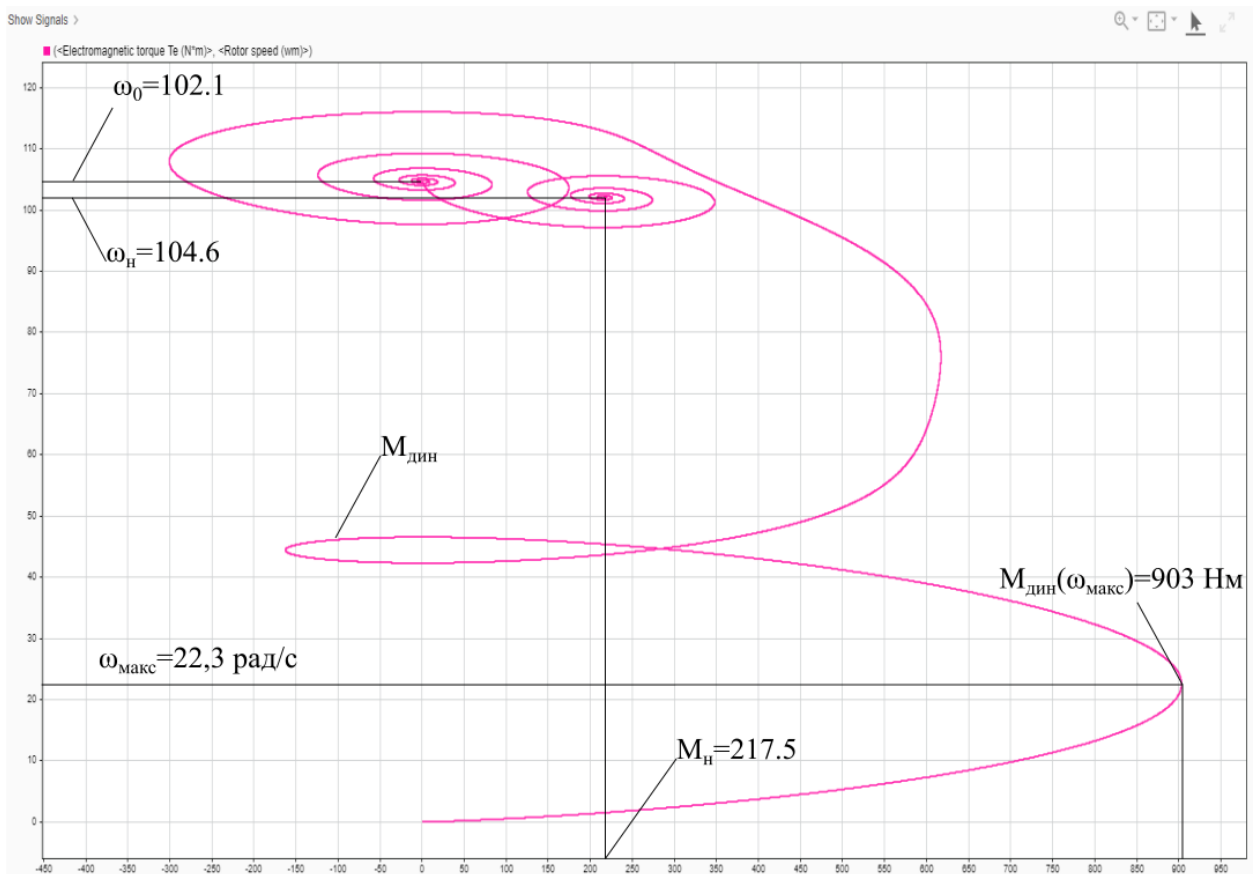


Рис. 21 – Переходные процессы угловой скорости и момента

Как видно из вышеприведенных рисунков фокусы динамической характеристики практически идеально совпадают с кривой статической. Сначала изображающая точка устанавливается в первый фокус с координатами $\omega_0 = 104,72$ рад/с, $M_0 = 0$ Н·м, после чего при набросе нагрузки координаты изображающей точки принимают значения $\omega_n = 102,102$ рад/с, $M_n = 215,471$ Н·м, что и соответствует линейной части кривой механической характеристики. Стоит отметить тот факт, что номинальные значения немногим отличались (не более 0,5%) от эталонных, рассчитанных ранее. Но это связано в первую очередь с округлением результатов расчетов параметров схемы замещения двигателя и вычислительной погрешностью метода расчёта дифференциальных уравнений, описывающих динамику рассматриваемого объекта. Помимо этого, ударные моменты при пуске превышают номинальный в

$$m = \frac{M_{\text{дин}}(\omega_{\text{макс}})}{M_{\text{н}}} = \frac{903}{215,471} = 4,18 \text{ раза, что превышает то, что заявлено в}$$

паспортных данных завода-изготовителя $M_{\text{к.р}} = 3,3 \cdot M_{\text{н}} = 711,054 \text{ Н} \cdot \text{м}$).

Все вышесказанное подчеркивает адекватность модели. Также были сняты переходные процессы фазных токов (рис.4).

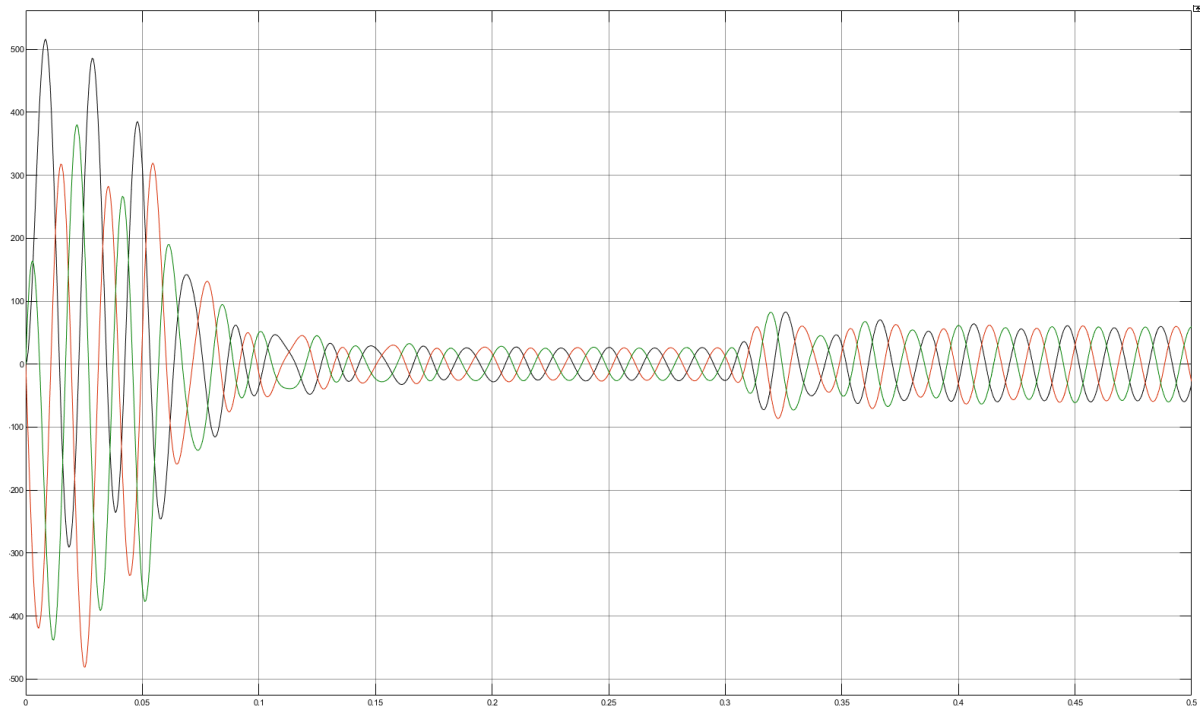


Рисунок 22 – Переходные процессы фазных токов

Для сравнения значений токов в различных режимах с предварительно рассчитанными значениями выделим конкретную фазу, например фазу А (рисунок 5).

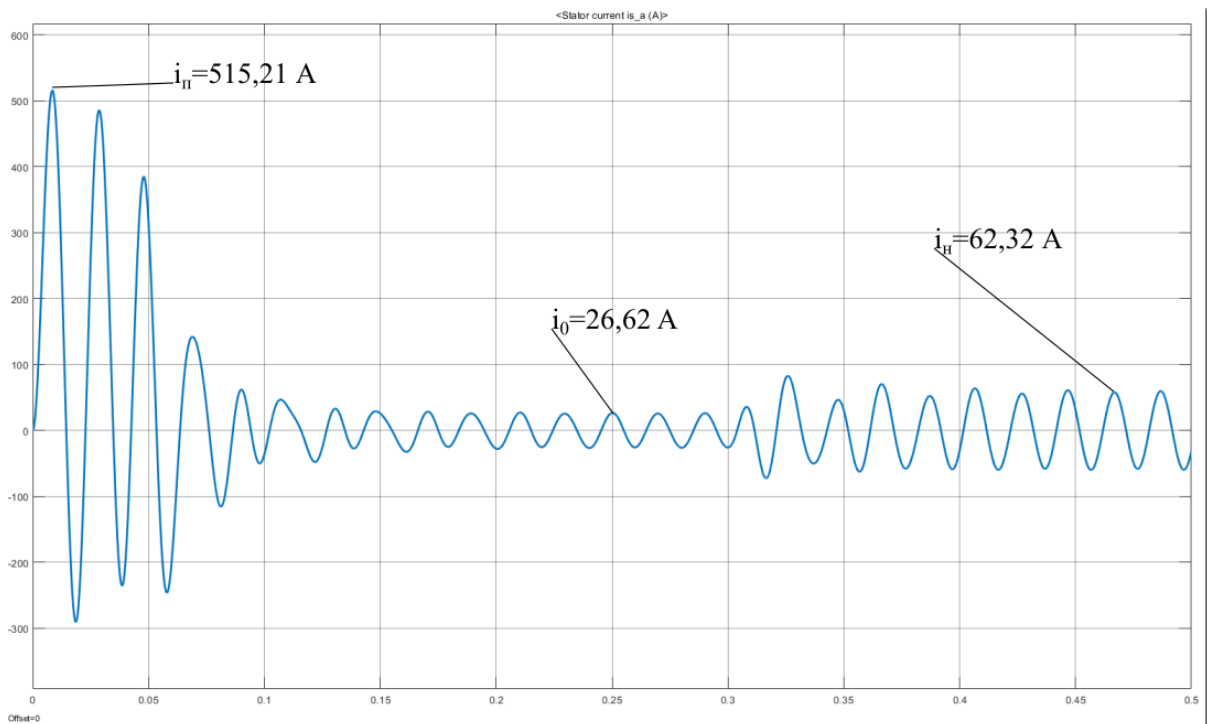


Рисунок 23 – Переходные процессы тока в фазе А

Выпишем значения амплитуд токов в различных режимах:

$i_{\pi} = 515,21 \text{ A}$ - амплитуда пикового тока;

$i_0 = 26,62 \text{ A}$ - амплитуда тока холостого хода;

$i_{\text{н}} = 63,32 \text{ A}$ - амплитуда номинального тока.

В свою очередь среднеквадратичные значения, полученные ранее, принимают вид амплитудных по простому правилу:

$i_{\pi} = \sqrt{2} \cdot I_{\pi} = \sqrt{2} \cdot 308,644 = 436,488 \text{ A}$ - амплитуда пикового тока;

$i_0 = \sqrt{2} \cdot I_0 = \sqrt{2} \cdot 18,8 = 25,3 \text{ A}$ - амплитуда тока холостого хода.

$i_{\text{н}} = \sqrt{2} \cdot I_{\text{н}} = \sqrt{2} \cdot 44,092 = 62,35 \text{ A}$ - амплитуда номинального тока.

В результате численного сравнения можно понять, что ошибка не имеет критически больших значений и модель адекватно описывает статику в некоторых пределах. Так, например, для пускового тока отклонение в процентном соотношении составляет $\delta_{I_{\pi}} = 15,3 \%$; для тока холостого хода $\delta_{I_0} = 4,8 \%$; для номинального тока $\delta_{I_{\text{н}}} = 1,5 \%$.

Также покажем формирование магнитного поля, фазовый портрет которого представлен на рисунке 6.

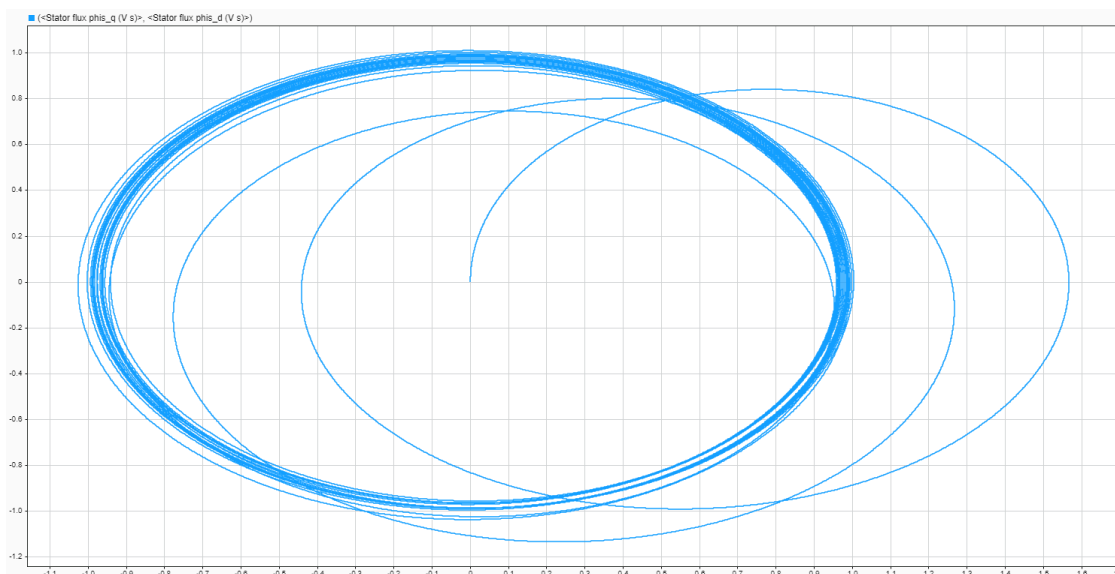


Рисунок 24 – Фазовый портрет вектора потокосцепления статора

Из вышеприведенного рисунка, видно, что потокосцепление статора некоторое время устанавливается в номинальное значение, после чего во временной области координаты вектора будут изменяться по гармоническому закону, а фазовый портрет выродится в окружность и будет иметь такую форму вплоть до какого-либо изменения управляющих/возмущающих воздействий.

Таким образом в дипломной работе был промоделирован асинхронный двигатель RA200LB6, включенный напрямую в сеть в холостую и под номинальной нагрузкой. Получены кривые переходных процессов угловой скорости, электромагнитного момента, токов и потокосцепления. Установлена высокая сходимость установившихся значений динамической механической характеристики и статической, рассчитанной ранее. Так, например значения номинальных скоростей различаются менее чем на 0,5% а ударный момент в $m = 4,18$ раз больше чем номинальный, что укладывается в данные завода-изготовителя. Также самое было произведено в отношении фазных токов статора. В итоге можно заключить то, что рассчитанные параметры позволяют производить адекватное имитационное моделирование в рамках некоторых допущений, присущих самой математической модели асинхронного

двигателя. А соответственно с помощью них можно создать имитационную модель частотно-регулируемого привода, что и будет рассмотрено далее.

3.2. ВЫБОР ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ

Преобразователь частоты для асинхронного двигателя, также известный как преобразователь переменного напряжения/частоты (ЧРП), является электронным устройством, которое позволяет изменять частоту и напряжение, подаваемые на статорные обмотки асинхронного двигателя. Это позволяет контролировать скорость и другие характеристики работы двигателя [9].

Преобразователь частоты состоит из нескольких основных компонентов. Одним из главных компонентов является выпрямитель, который преобразует входное переменное напряжение в постоянное. Затем постоянное напряжение снова преобразуется в переменное с помощью инвертора. Инвертор генерирует переменное напряжение с заданной частотой и амплитудой.

Преобразователь частоты позволяет управлять скоростью асинхронного двигателя путем изменения частоты подаваемого на него напряжения. При повышении частоты напряжения скорость двигателя увеличивается, а при снижении частоты скорость снижается. Это обеспечивает широкий диапазон управления скоростью двигателя и позволяет применять его в различных промышленных приложениях.

Основное преимущество преобразователя частоты состоит в возможности точного и плавного управления скоростью и крутящим моментом асинхронного двигателя. Это позволяет оптимизировать работу двигателя в зависимости от требований процесса и снижает энергопотребление. Кроме того, преобразователь частоты обеспечивает мягкий пуск и остановку двигателя, что увеличивает его срок службы и снижает нагрузку на механические компоненты.

Преобразователи частоты также позволяют реализовать дополнительные функции, такие как защита двигателя от перегрузок, контроль тока и температуры, а также интеграцию с системами автоматизации и управления.

В итоге преобразователь частоты является важным компонентом в современных системах управления электроприводами, позволяющими повысить производительность, эффективность и надежность работы асинхронного двигателя. Он обеспечивает гибкость в управлении скоростью и крутящим моментом двигателя, что особенно полезно в приложениях, где требуется изменение скорости в реальном времени.

Преобразователи частоты также помогают снизить энергопотребление путем оптимизации работы двигателя под текущие условия нагрузки. Например, в системах насосов и вентиляторов, преобразователи частоты позволяют регулировать производительность в зависимости от потребности, что позволяет снизить потребление электроэнергии.

Кроме того, преобразователи частоты предоставляют дополнительные функции защиты двигателя. Они могут контролировать ток и температуру двигателя, предотвращая перегрузки и повреждения. Также они могут обеспечить сглаживание пусковых токов и предотвратить резкие изменения скорости, что способствует увеличению срока службы двигателя.

Преобразователи частоты широко применяются в промышленности, где требуется управление скоростью и крутящим моментом асинхронных двигателей. Они используются в таких областях, как насосные станции, вентиляционные системы, конвейеры, лифты, механизмы управления движением и другие приводные системы. Также преобразователи частоты находят применение в энергетике и возобновляемых источниках энергии для оптимизации работы генераторов и инверторов.

В целом, преобразователь частоты асинхронного двигателя является ключевым элементом современных электроприводных систем, обеспечивающим гибкость, эффективность и надежность работы двигателя.

Он позволяет управлять скоростью и моментом двигателя, оптимизировать энергопотребление и обеспечивать защиту двигателя от перегрузок и повреждений.

ПЧ для питания обмотки статора АД КЗ выбирается из условий:

$$\begin{cases} I_{н.пч} \geq I_{н.дв}; \\ U_{н.пч} \geq U_{н.дв}. \end{cases} \quad (4.1)$$

Выбираем преобразователь частоты «Danfoss VLT Micro Drive FC51 P11KT4E20H3BXCXXXSXXX» со следующими паспортными данными:

$$\begin{cases} I_{н.пч} = 23\text{А} \geq 17,888\text{А}; \\ U_{н.пч} = (380-480)\text{В} \geq 380\text{В}; \\ P_{н} = 11\text{кВт}. \end{cases}$$

Внешний вид преобразователя и схема подключения клемм представлены на рис. 25–26.



Рисунок 25 – Внешний вид частотного преобразователя Danfoss VLT Micro Drive FC51 P11KT4E20H3BXCXXXSXXX

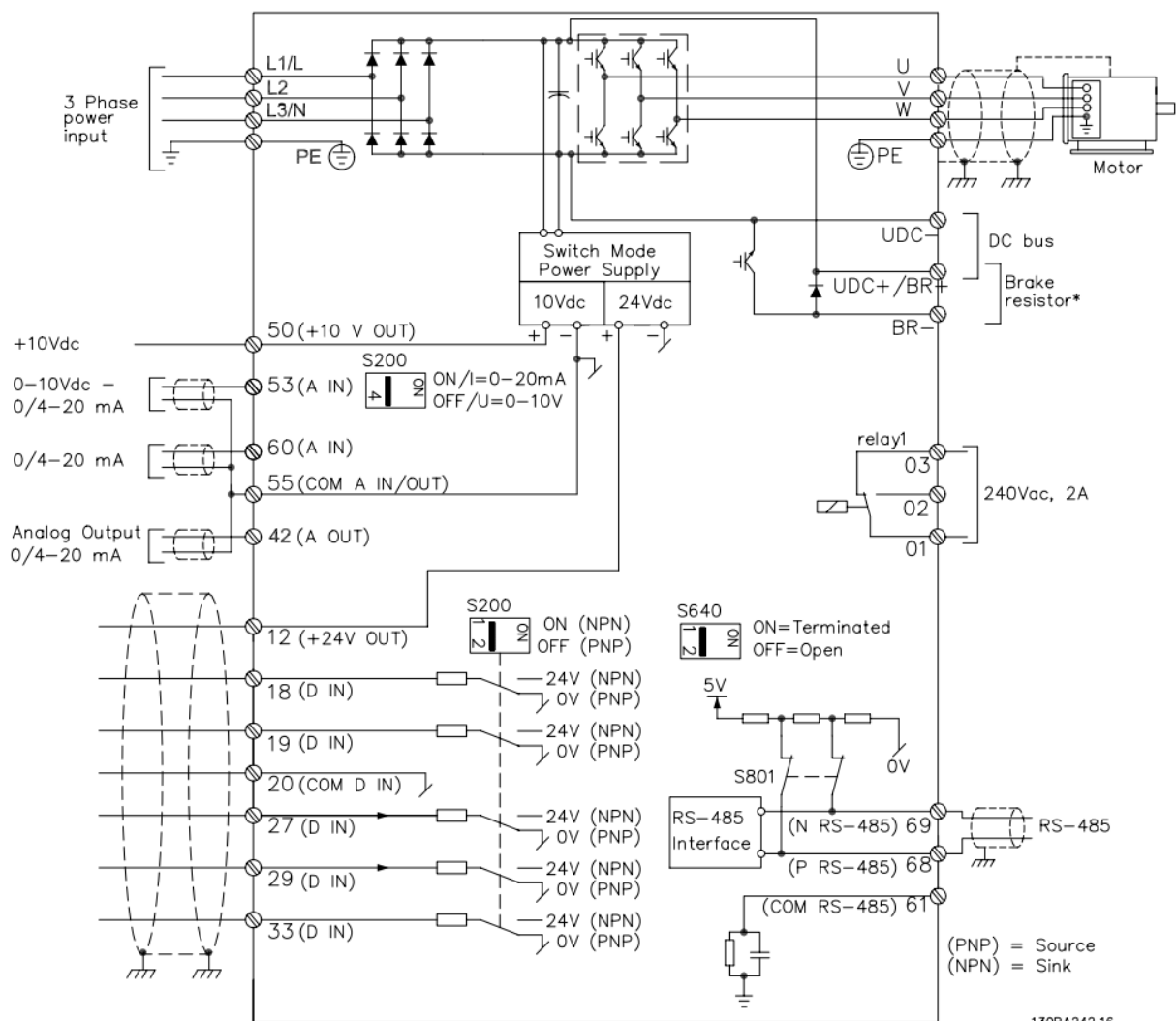


Рисунок 26 – Схема внутреннего устройства выбранного преобразователя

Характеристики преобразователей частоты серии Danfoss VLT Micro Drive FC51 приведены ниже.

Параметры сети питания:

- 3-фазное напряжение питания: $U_{IN} = 380-480$ В
- Частота 50/60 Гц
- Коэффициент мощности:
 - $\cos\varphi_1 = 0,98$ (для основной гармоники)

КПД:

- При номинальной мощности: 98%

Параметры на выходе привода:

- 3-фазное выходное напряжение: $0..U_{IN}$
- Регулирование частоты: $0..±400$ Гц при скалярном законе

3.3 расчет электромеханических и механических характеристик при различных частотах преобразователя: 5, 10, 25 и 50 Гц по законам регулирования $U_{1j}/f_{1j} = \text{const}$

Расчет характеристик производим для частот $f_1=50; 25; 10; 5$ Гц. При законе регулирования [10]:

$$Z_p = \frac{U_{1н}}{f_{1н}} = \frac{U_{1н}}{f_{11}} = \frac{220}{50} = 4,4.$$

Найдем относительные значения частот питающего напряжения:

$$\text{при } f_{11} = 50 \text{ Гц} \quad f_{11}^* = \frac{f_{11}}{f_{1н}} = \frac{50}{50} = 1 \text{ о.е.},$$

$$\text{при } f_{12} = 25 \text{ Гц} \quad f_{12}^* = \frac{f_{12}}{f_{1н}} = \frac{25}{50} = 0,5 \text{ о.е.},$$

$$\text{при } f_{13} = 10 \text{ Гц} \quad f_{13}^* = \frac{f_{13}}{f_{1н}} = \frac{10}{50} = 0,2 \text{ о.е.},$$

$$\text{при } f_{14} = 5 \text{ Гц} \quad f_{14}^* = \frac{f_{14}}{f_{1н}} = \frac{5}{50} = 0,1 \text{ о.е.}$$

Найдем фазное напряжение обмотки статора асинхронного двигателя:

$$U_{11} = Z_p \cdot f_{11} = 4,4 \cdot 50 = 220 \text{ В},$$

$$U_{12} = Z_p \cdot f_{12} = 4,4 \cdot 25 = 110 \text{ В},$$

$$U_{13} = Z_p \cdot f_{13} = 4,4 \cdot 10 = 44 \text{ В},$$

$$U_{14} = Z_p \cdot f_{14} = 4,4 \cdot 5 = 22 \text{ В},$$

Построим вольт-частотную характеристику для закона регулирования

$$\frac{U_1}{f_1} = \text{const} \text{ (рис. 27).}$$

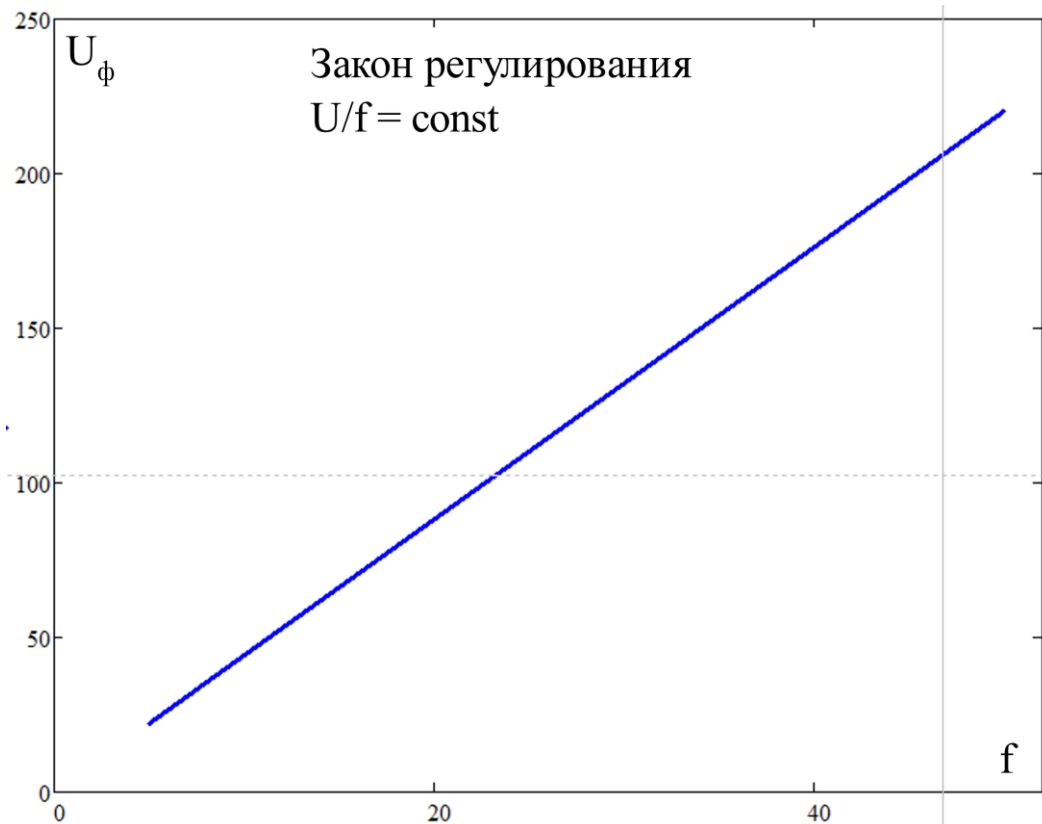


Рисунок 27 – Вольт-частотная характеристика при $\frac{U_1}{f_1} = \text{const}$

В соответствии с представленными частотами питающего напряжения произведем расчет значений скорости идеального холостого хода:

$$\omega_{11} = \frac{2\pi \cdot f_{11}}{p} = \frac{2\pi \cdot 50}{4} = 104,72 \text{ рад/с,}$$

$$\omega_{11} = \frac{2\pi \cdot f_{12}}{p} = \frac{2\pi \cdot 25}{4} = 52,36 \text{ рад/с,}$$

$$\omega_{11} = \frac{2\pi \cdot f_{13}}{p} = \frac{2\pi \cdot 10}{4} = 20,94 \text{ рад/с,}$$

$$\omega_{11} = \frac{2\pi \cdot f_{14}}{p} = \frac{2\pi \cdot 5}{4} = 10,47 \text{ рад/с.}$$

Строим электромеханические характеристики $\Gamma_2(\omega)$ для выбранных частот (рис. 28) по выражениям (5.1,5.2):

$$I_2'(\omega, f) = \frac{U_1(f)}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2 \cdot \omega_0(f)}{\omega_0(f) - \omega}\right)^2 + X_{KH}^2 \cdot f_1^{*2}(f) + \left(\frac{R_1 \cdot R_2 \cdot \omega_0(f)}{(\omega_0(f) - \omega) \cdot X_m \cdot f_1^*(f)}\right)^2}}, \quad (5.1)$$

$$I_1(\omega, f) = \sqrt{I_0(f)^2 + (I_2'(\omega, f))^2 + 2 \cdot I_0(f) \cdot I_2'(\omega, f) \cdot \sin \varphi_2(\omega, f)}, \quad (5.2)$$

где

$$\sin \varphi_2(\omega, f) = \frac{X_{KH} \cdot f_1^*(f)}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2 \cdot \omega_0(f)}{\omega_0(f) - \omega}\right)^2 + X_{KH}^2 \cdot f_1^{*2}(f)}}$$

$$I_0(f) = \frac{U_1(f)}{\sqrt{(R_1)^2 + (X_m + X_{1\sigma})^2 \cdot f_1^{*2}(f)}}$$

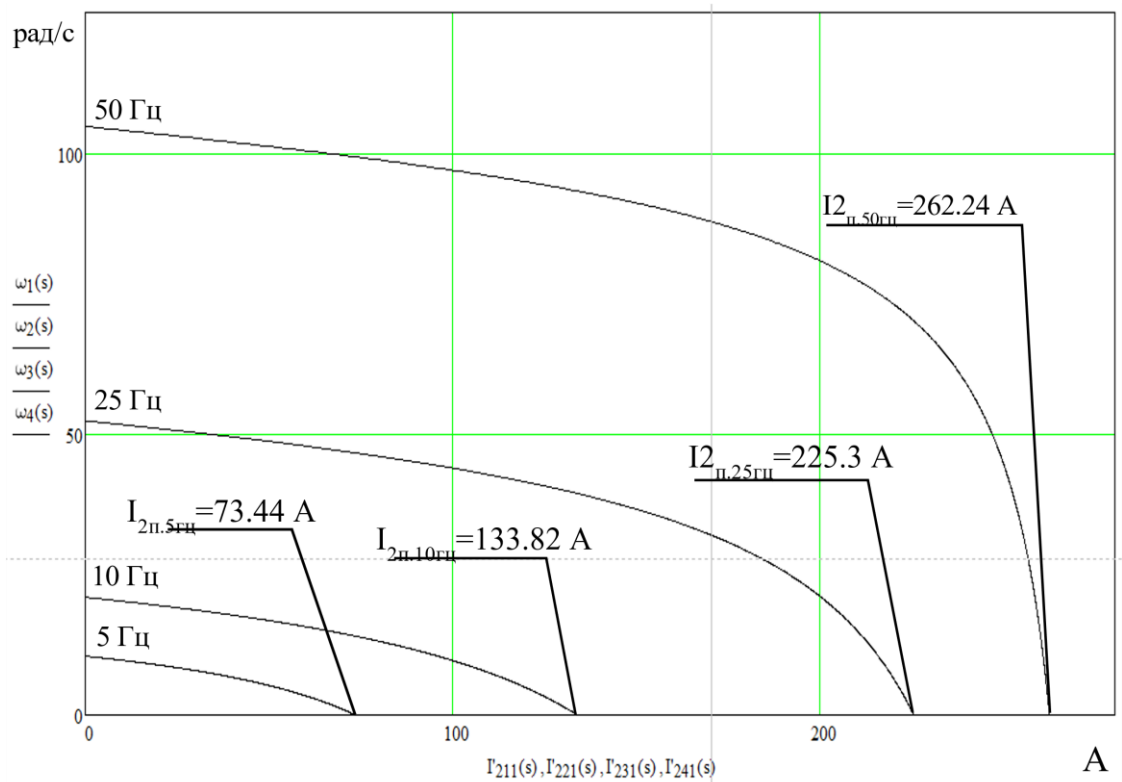


Рисунок 28 – электромеханические характеристики $I_2(\omega)$ при различных частотах

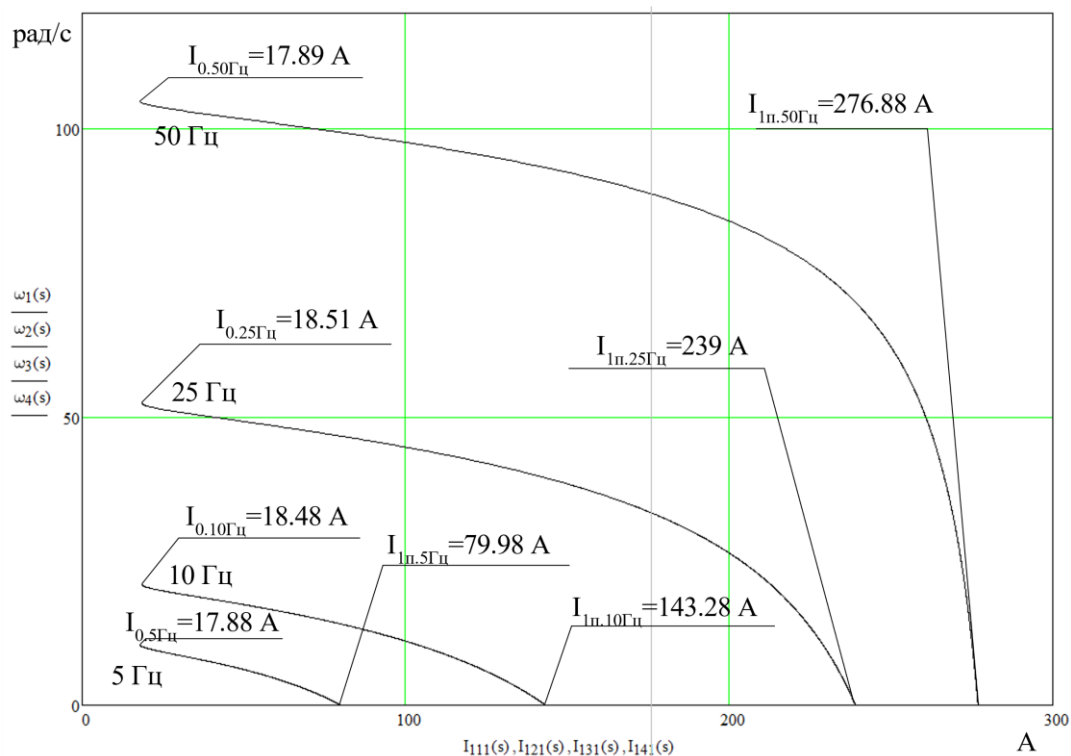


Рисунок 29 – электромеханические характеристики $I_1(\omega)$ при различных частотах

Для выбранных частот мы рассчитываем механические характеристики асинхронного двигателя $M(\omega)$ согласно формуле (5.3).

$$M(\omega, f) = \frac{3 \cdot (U_1(f))^2 \cdot R_2'}{(\omega_0(f) - \omega) \cdot \left[X_{\text{кн}}^2 \cdot f_1^{*2}(f) + \left(R_1 + \frac{R_2' \cdot \omega_0(f)}{\omega_0(f) - \omega} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2' \cdot \omega_0(f)}{(\omega_0(f) - \omega) \cdot X_m \cdot f_1^*(f)} \right)^2 \right]}, \quad (5.3)$$

Зададим функцию нагрузки. Примем ее независимой от скорости $M_c(\omega) = M_n = \text{const}$. Таким образом графическая интерпретация механической характеристики и нагрузки примет вид, представленный на рисунке 15:

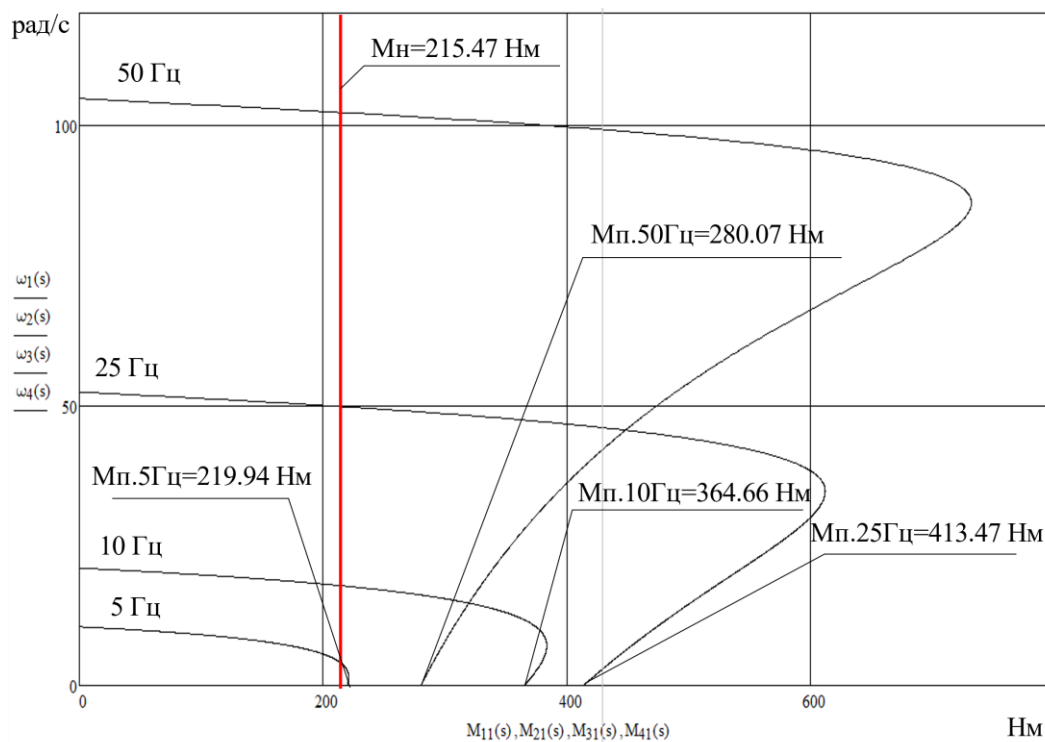


Рисунок 30 – механические характеристики $M(\omega)$ при различных частотах

Можем заметить то, что при частоте питающего напряжения 5 Гц пусковой момент немногим больше нагрузки. Чтобы компенсировать момент можно произвести «вольтдобавку». Так, например, значение напряжения на частоте $f_{14} = 5$ Гц было принято $U_{14} = 27$ В. Остальные значения оставлены прежними (рис.16).

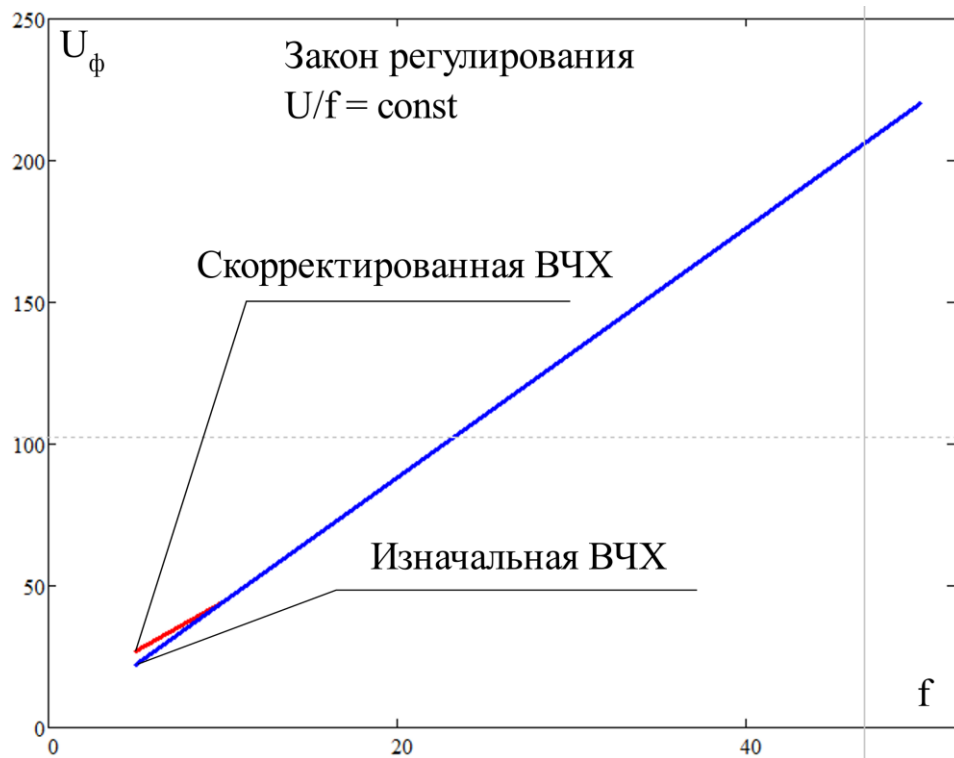


Рисунок 31 – Вольт-частотная характеристика при $\frac{U_1}{f_1} = \text{const}$

Используя такую вольт-частотную характеристику аналогичным образом, были построены электромеханические и механические характеристики (рис 32–34):

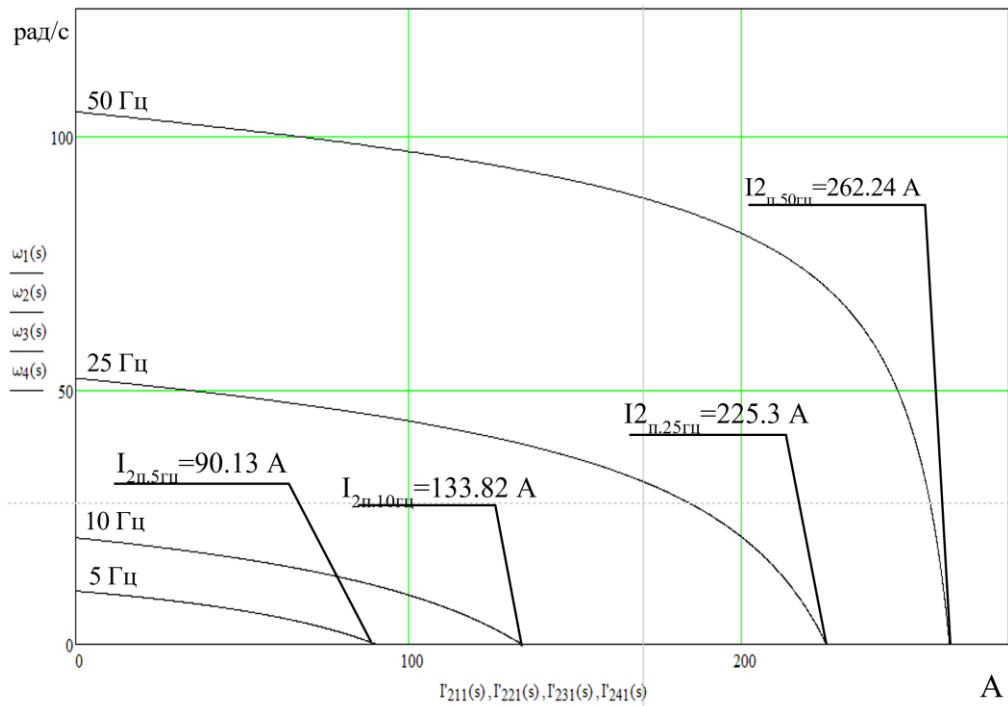


Рисунок 32 – электромеханические характеристики $\Gamma_2(\omega)$ при различных частотах и корректировке ВЧХ

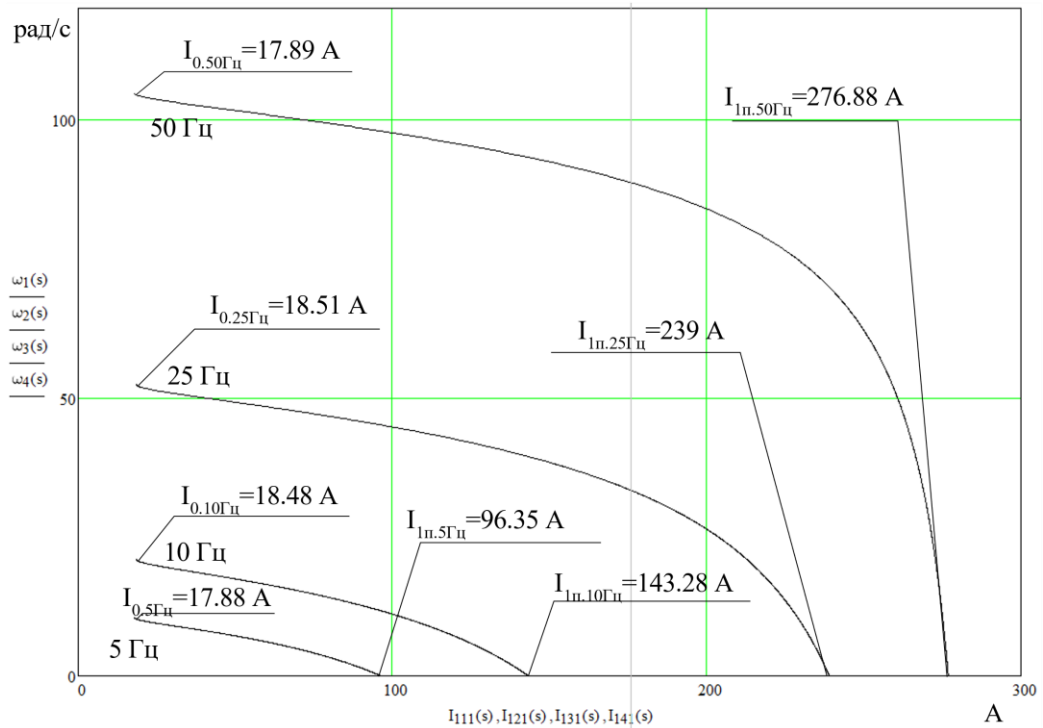


Рисунок 33 – Искусственные электромеханические характеристики $I_1(\omega)$ при различных частотах и корректировке ВЧХ

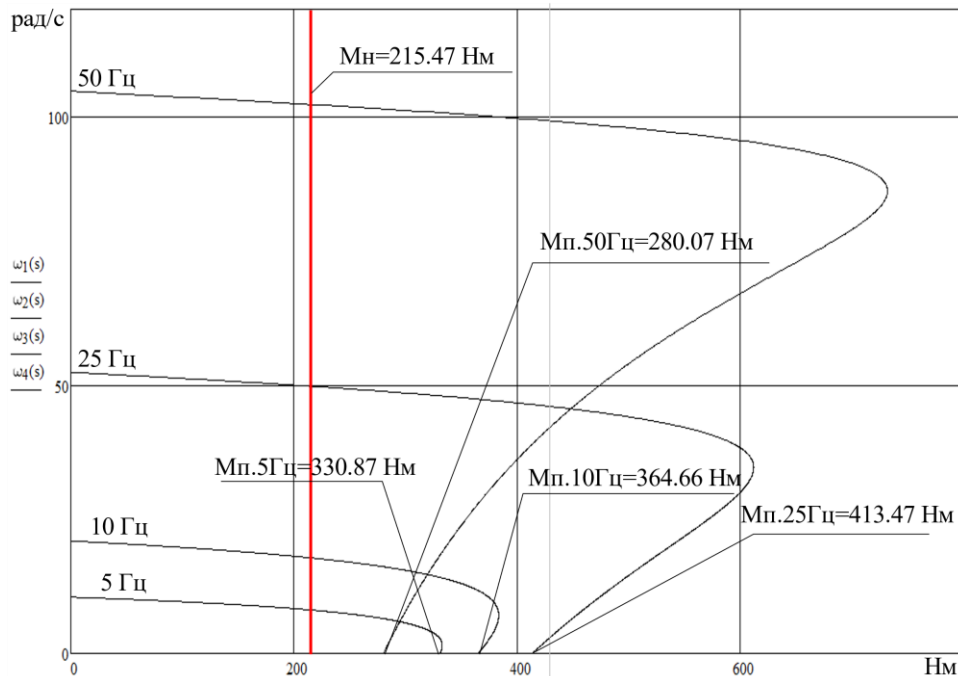


Рисунок 34 – Искусственные механические характеристики $M(\omega)$ при различных частотах и корректировке ВЧХ

Таким образом получены режимы, при которых пусковые моменты существенно больше, чем момент нагрузки, что обеспечит беспроблемный пуск двигателя. Причем стоит отметить, что значения тока в статоре и роторе увеличились несущественно. Также интересен тот факт, что на меньших частотах такая «вольтдобавка» более существенно сказалась на величине пускового тока, что обусловлено снижением индуктивного сопротивления, пропорционально частоте питающего напряжения. Но, помимо этого, можно сделать процесс коррекции более автоматизированным. Такое нововведение называется IR – компенсацией, о которой будет рассказано в следующей главе.

3.4 Расчет электромеханических и механических характеристик системы «ПЧ-АД» с IR – компенсацией

При использовании скалярной IR-компенсации сигнал управления является комбинацией сигналов регулирования и положительной обратной связи по току. Это можно выразить следующим образом [11]:

$$U_y = U_p + U_{кор} = U_p + K_{км} \cdot R_1 \cdot I, \quad (4)$$

где U_y - сигнал управления; U_p - сигнал регулирования; $K_{км}$ - коэффициент компенсации; R_1 - активное сопротивление обмотки статора; I - сигнал пропорциональный фазным токам.

Примем коэффициенты компенсации: $K_{км} = 0, 0,1; 0,2; 0,3$.

Найдем эквивалентные сопротивление ротора с учетом IR-компенсации:

$$R_{1экв1} = R_1 \cdot (1 - K_{км1}) = 0,434 \cdot (1 - 0) = 0,434 \text{ Ом},$$

$$R_{1экв2} = R_1 \cdot (1 - K_{км2}) = 0,434 \cdot (1 - 0,1) = 0,389 \text{ Ом},$$

$$R_{1экв3} = R_1 \cdot (1 - K_{км3}) = 0,434 \cdot (1 - 0,2) = 0,346 \text{ Ом},$$

$$R_{1экв4} = R_1 \cdot (1 - K_{км4}) = 0,434 \cdot (1 - 0,3) = 0,303 \text{ Ом}.$$

Строим электромеханические характеристики $\Gamma_2(\omega)$ для выбранных частот и коэффициентов $K_{км}$ (рис. 35) по выражениям:

$$I_2'(\omega, f, K_{\text{KM}}) = \frac{U_1(f)}{\sqrt{\left(R_{1\text{ЭКВ}}(K_{\text{KM}}) + \frac{R_2' \cdot \omega_0(f)}{\omega_0(f) - \omega} \right)^2 + X_{\text{KH}}^2 \cdot f_1^{*2}(f) + \left(\frac{R_{1\text{ЭКВ}}(K_{\text{KM}}) \cdot R_2' \cdot \omega_0(f)}{(\omega_0(f) - \omega) \cdot X_m \cdot f_1^*(f)} \right)^2}} \quad (6.1)$$

где $R_{1\text{ЭКВ}}(K_{\text{KM}}) = R_1 \cdot (1 - K_{\text{KM}})$ – эквивалентное активное сопротивление статорной цепи.

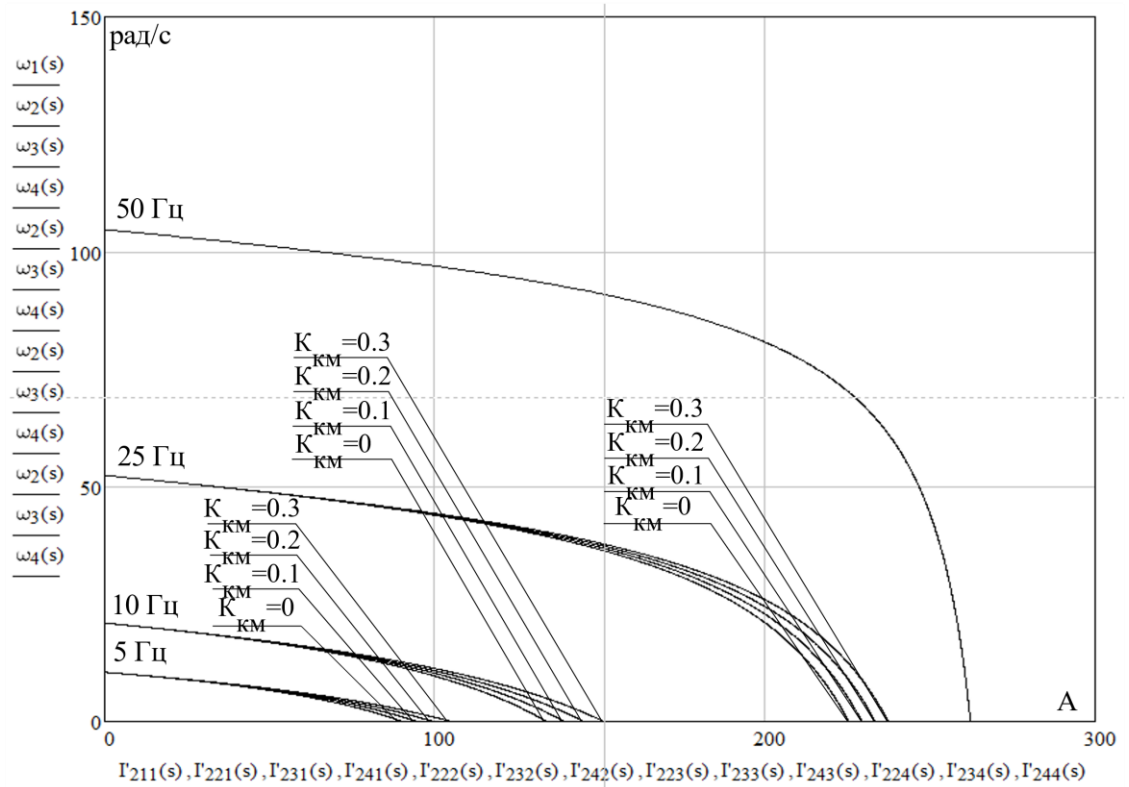


Рисунок 35 – электромеханические характеристики $I_2'(\omega)$ при различных частотах с IR-компенсацией

Также строим электромеханические характеристики $I_1(\omega)$ для выбранных частот и коэффициентов K_{KM} (рис. 21) по выражениям

$$I_1(\omega, f, K_{\text{KM}}) = \sqrt{(I_0(f))^2 + (I_2'(\omega, f, K_{\text{KM}}))^2 + 2 \cdot I_0(f) \cdot I_2'(\omega, f, K_{\text{KM}}) \cdot \sin \varphi_2(\omega, f, K_{\text{KM}})}, \quad (5.2)$$

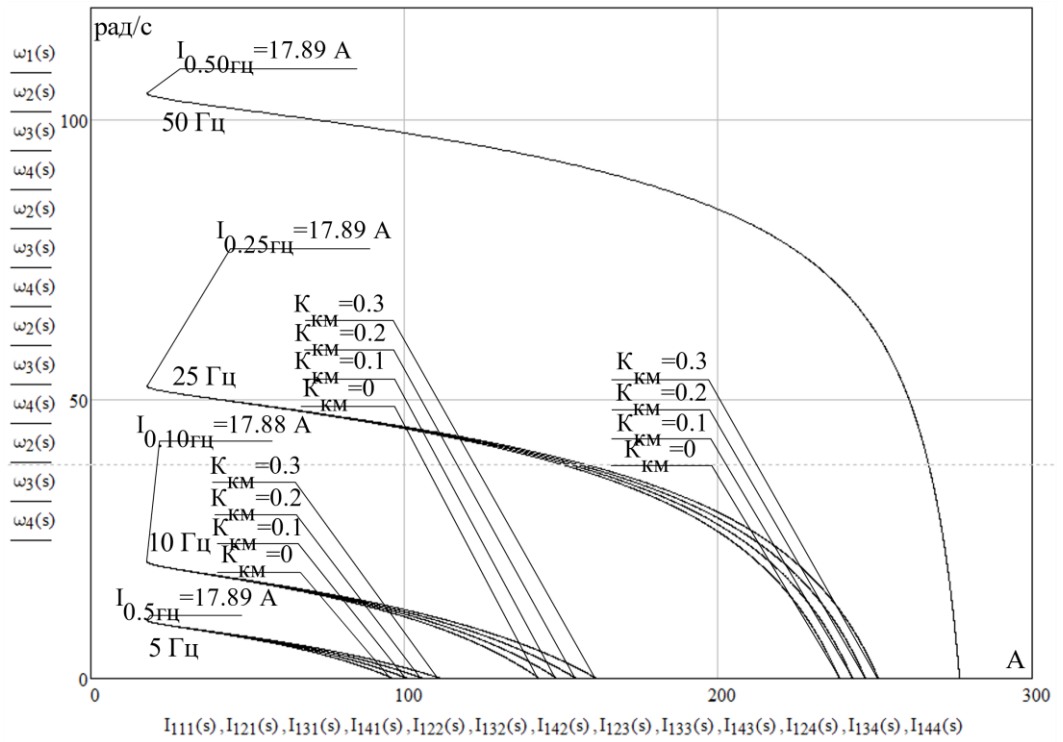


Рисунок 36 – электромеханические характеристики $I_1(\omega)$ при различных частотах с IR-компенсацией

Механические характеристики асинхронного двигателя $M(\omega)$ (рис. 37) рассчитываем для выбранных частот и коэффициентов K_{CM} с помощью выражения:

$$M(\omega, f, K_{CM}) = \frac{3 \cdot (U_1(f))^2 \cdot R_2'}{(\omega_0(f) - \omega) \cdot \left[\left(R_{1\text{экв}}(K_{CM}) + \frac{R_2' \cdot \omega_0(f)}{\omega_0(f) - \omega} \right)^2 + X_{KH}^2 \cdot f_1^{*2}(f) + \left(\frac{R_{1\text{экв}}(K_{CM}) \cdot R_2' \cdot \omega_0(f)}{(\omega_0(f) - \omega) \cdot X_m \cdot f_1^*(f)} \right)^2 \right]}, \quad (5.3)$$

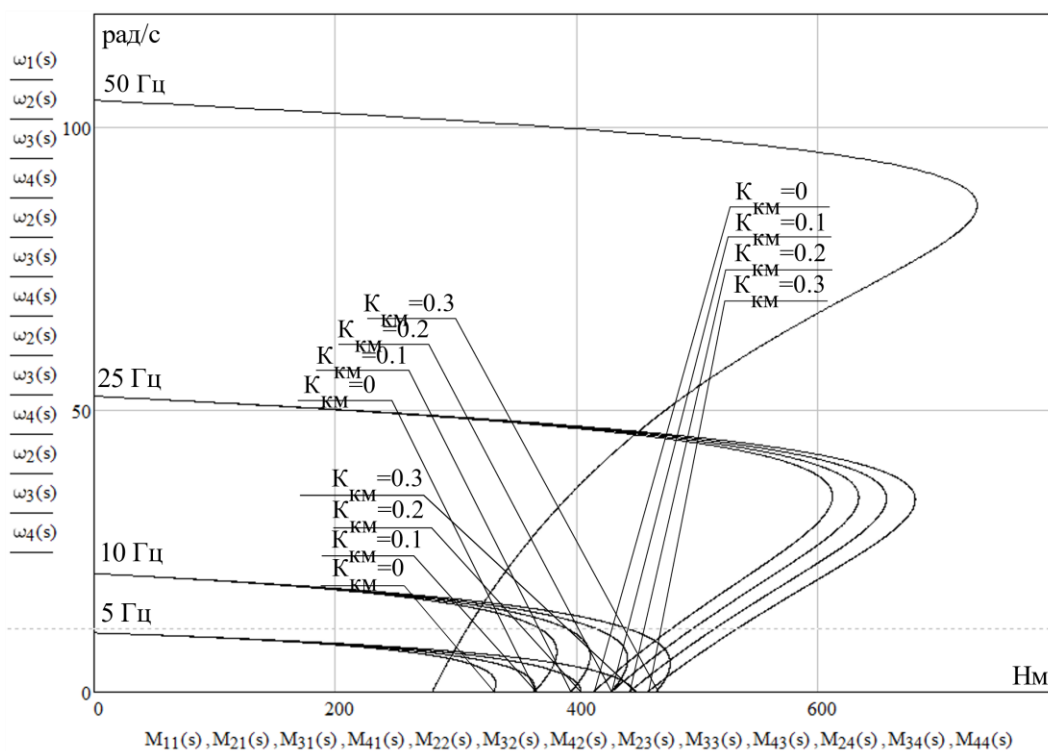


Рисунок 37 – механические характеристики $M(\omega)$ при различных частотах с ИР-компенсацией

В режиме работы на естественной характеристике с частотой 50 Гц отсутствует применение ИР-компенсации. Это обусловлено тем, что фазное напряжение превышает предельное номинальное значение, что противоречит допустимым условиям работы. При увеличении коэффициента компенсации растет пусковой и критический момент, что обуславливается пропорциональным увеличением значения сигнала управления. Это в свою очередь позволяет избежать ситуации «опрокидывания» двигателя.

Выводы по разделу

В ходе работы были построены электромеханические и механические характеристики при законе $U_{1j}/f_{1j} = \text{const}$. Было показано, что при ряде значений частот искусственные характеристики не обеспечивают уверенной работы электродвигателя в нелинейной части характеристик. Этого можно избежать корректировкой вольт-частотной характеристики. За счёт локального увеличения напряжения можно добиться удовлетворительных значений пусковых и критических моментов, что в свою очередь позволило

бы добиться адекватной работы электропривода при пусковых режимах. Помимо этого, было показано, что небольшая «вольтдобавка» несущественно сказывается на значениях пусковых токов. Причем распределение этих значений неравномерное вследствие того, что при снижении частоты питающего напряжения влечет за собой уменьшение индуктивного сопротивления по сравнению с активной частью и большая доля падения напряжения приходится на последнюю. Важно отметить, что изменение тока намагничивания при изменении частоты питания является незначительным. Это происходит в результате пропорционального изменения амплитуды питающего напряжения и частоты. Однако, если передаточная функция амплитудно-частотной характеристики становится нелинейной, различия становятся значительными. Также из электромеханических характеристик, построенных с помощью ИР – компенсации видно, что при увеличении коэффициента компенсации момента $K_{км}$ пусковые токи тоже растут, по аналогии с корректировкой ВЧХ, потому что по сути своей компенсация ей и является. Механические характеристики при увеличении коэффициента компенсации становятся более жесткими, что и требуется, так как при резкой смене величины нагрузки корректирующий сигнал положительной обратной связи позволит увеличить управляющий сигнал, а вместе с ним и критический момент, растягивающий линейную часть характеристики.

4.4 Расчет переходных процессов для режима пуска, наброса-сброса нагрузки на валу двигателя системы с ИР-компенсацией

Для моделирования переходных процессов используется модель, представленная на структурной схеме на рисунке 38 [12].

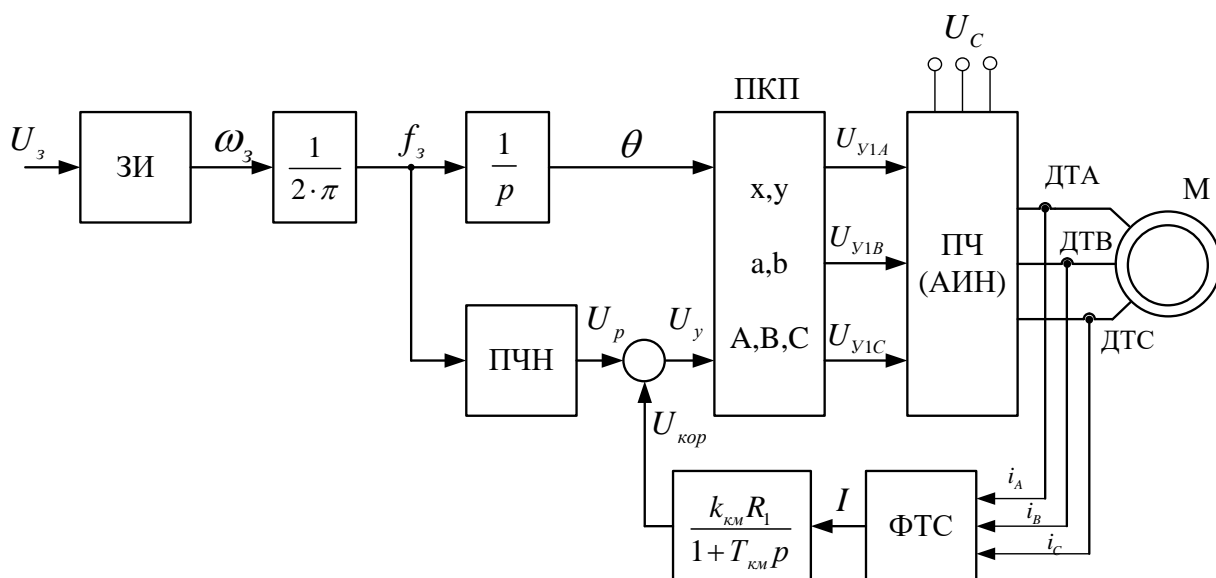


Рисунок 38 – Структурная схема системы скалярного частотного управления с IR – компенсацией

Кривая ВЧХ задается в блоке ПЧН с помощью четырех точек:

$$U_{11} = 220 \text{ В}, f_{11} = 50 \text{ Гц},$$

$$U_{12} = 115 \text{ В}, f_{12} = 25 \text{ Гц},$$

$$U_{13} = 44 \text{ В}, f_{13} = 10 \text{ Гц},$$

$$U_{14} = 27 \text{ В}, f_{14} = 5 \text{ Гц}.$$

На рисунке 31 ранее было показано графическое представление данной кривой.

Теперь определим передаточные функции для компонентов системы управления. Для инвертора напряжения используется апериодическое звено, которое описывается следующей передаточной функцией:

$$W_{\text{ин}} = \frac{k_{\text{ин}}}{T_{\text{ин}} \cdot p + 1} = \frac{1}{0,0001 \cdot p + 1},$$

где $k_{\text{ин}} = 1$ - коэффициент передачи инвертора;

постоянная времени запаздывания автономного инвертора напряжения, где $f_{\text{ин}} = 10000 \text{ Гц}$ - несущая частота инвертора:

$$T_{ин} = \frac{1}{f_{ин}} = \frac{1}{10000} = 0,0001с$$

Положительная обратная связь по току представляется аperiodическим звеном:

$$W_{дт} = \frac{k_M}{T_{кМ} \cdot p + 1} = \frac{k_M}{0,001 \cdot p + 1},$$

где k_M - коэффициент положительной обратной связи по току;

$T_{кМ}$ - постоянная времени задержки контура тока

$T_{кМ} = 0,001с$ - постоянная времени задержки контура тока $T_{кМ} = 0,001с$

На рисунке 39 представлена Simulink модель с IR-компенсацией. Блоки, входящие в эту модель, показаны на рисунках 40–42.

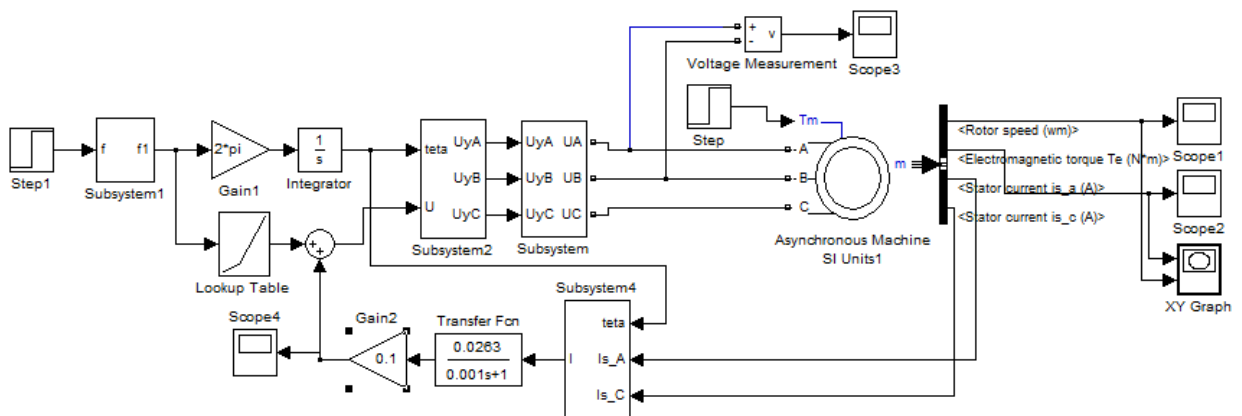


Рисунок 39 – модель системы ПЧ-АД с IR-компенсацией

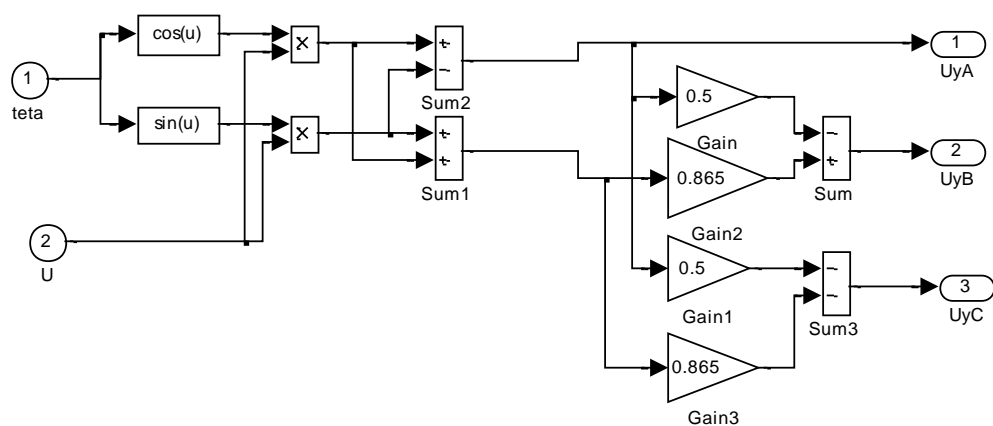


Рисунок 40 – Модель прямого координатного преобразователя

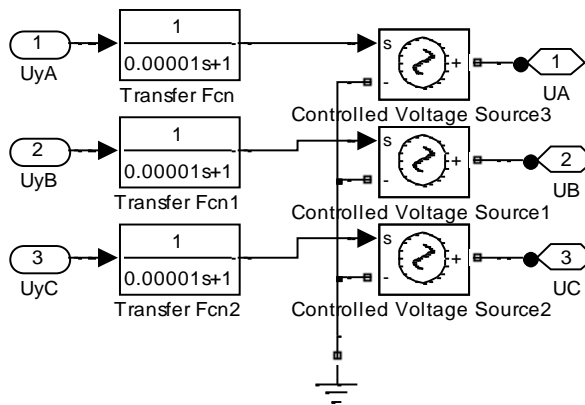


Рисунок 41 – модель преобразователя частоты

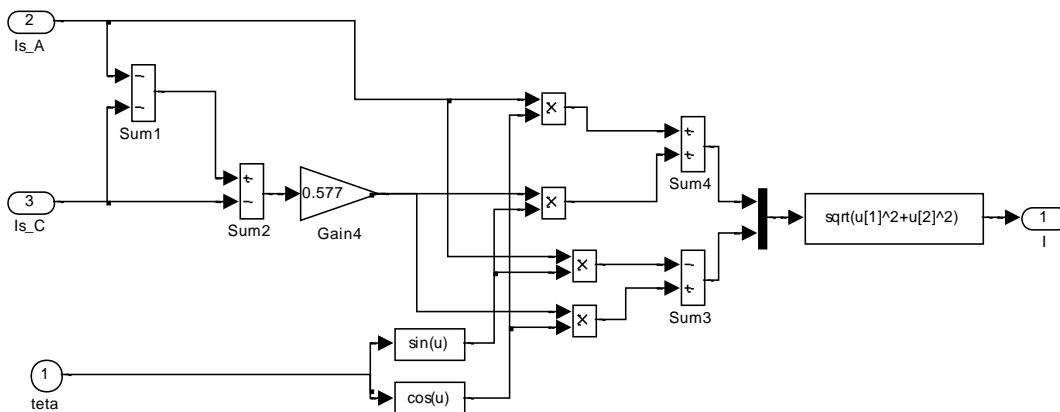


Рисунок 42 – модель обратного координатного преобразователя

получим переходные процессы при пуске и при нагрузке. Это будет выполнено для трех различных значений сопротивления нагрузки $M_c = 71,82 \text{ Н} \cdot \text{м}$; $M_c = 143,6 \text{ Н} \cdot \text{м}$; $M_c = 215,47 \text{ Н} \cdot \text{м}$ и с использованием коэффициента IR-компенсации $k_m = 0; 0,1; 0,2; 0,3$. Для наглядности результатов эти характеристики будут представлены на рисунках 43-54.

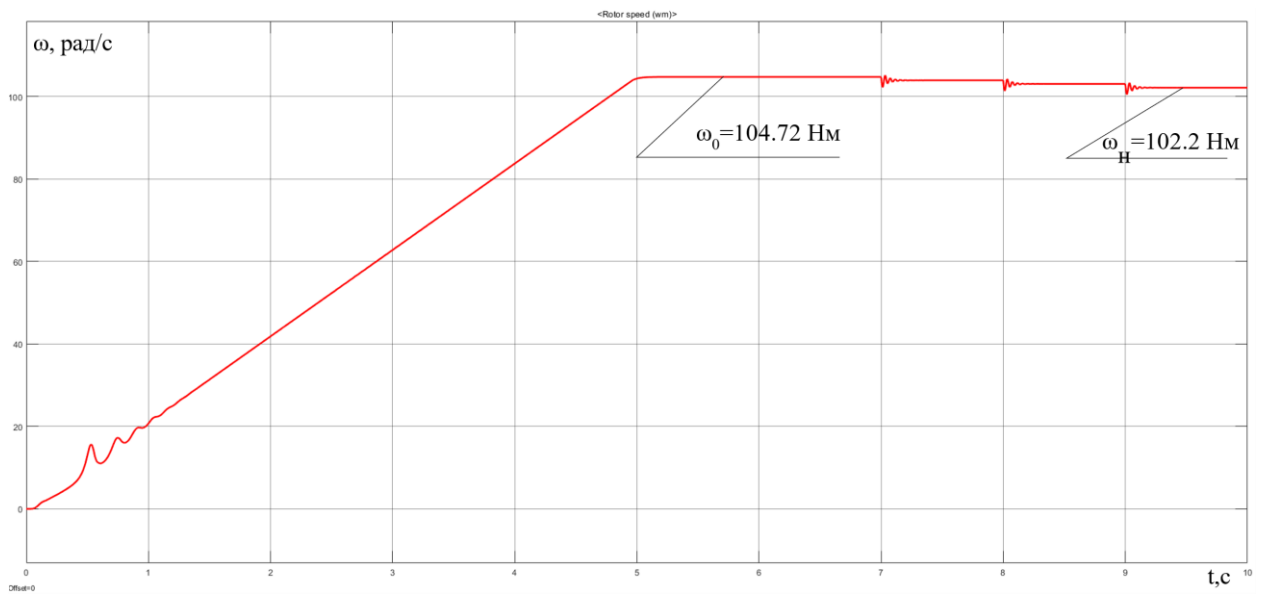


Рисунок 43 – переходный процесс скорости АД при $k_M = 0$

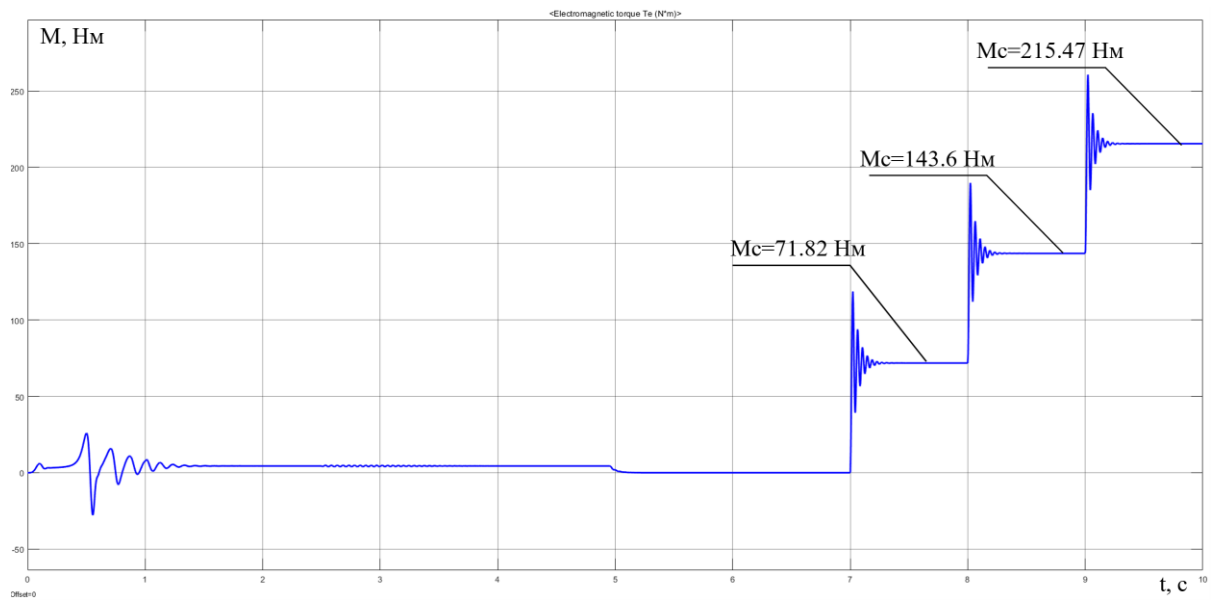


Рисунок 44 – переходный процесс электромагнитного момента АД при $k_M = 0$

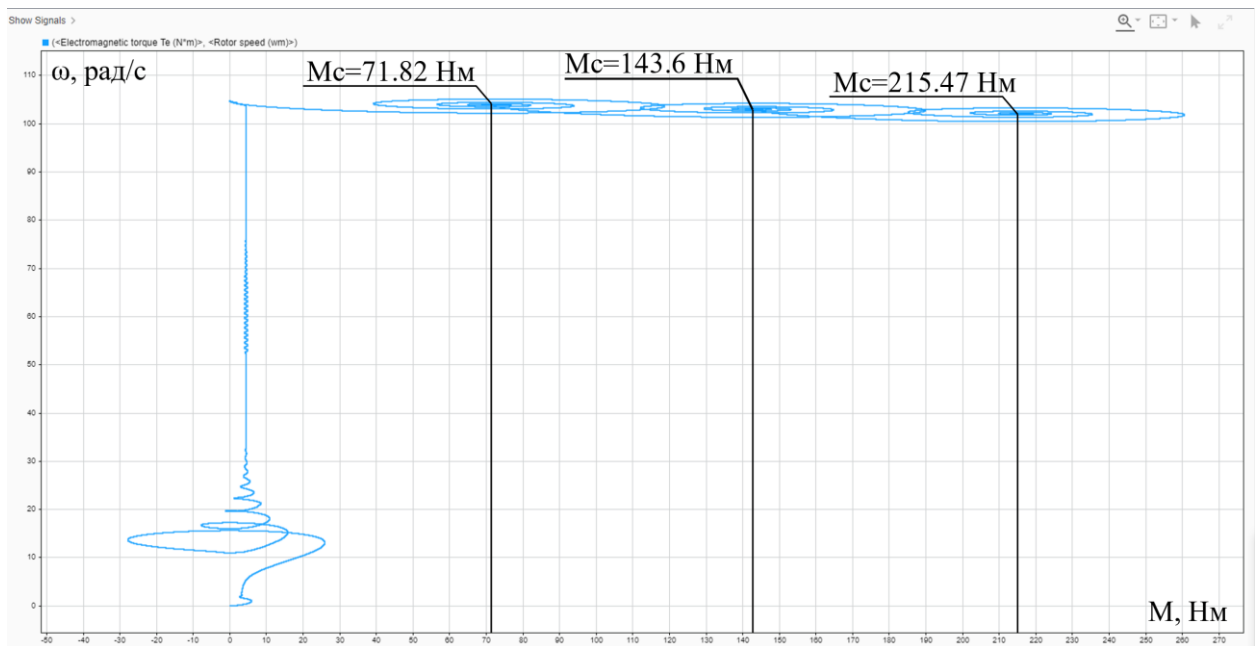


Рисунок 45 – Динамическая механическая характеристика АД при $k_M = 0$

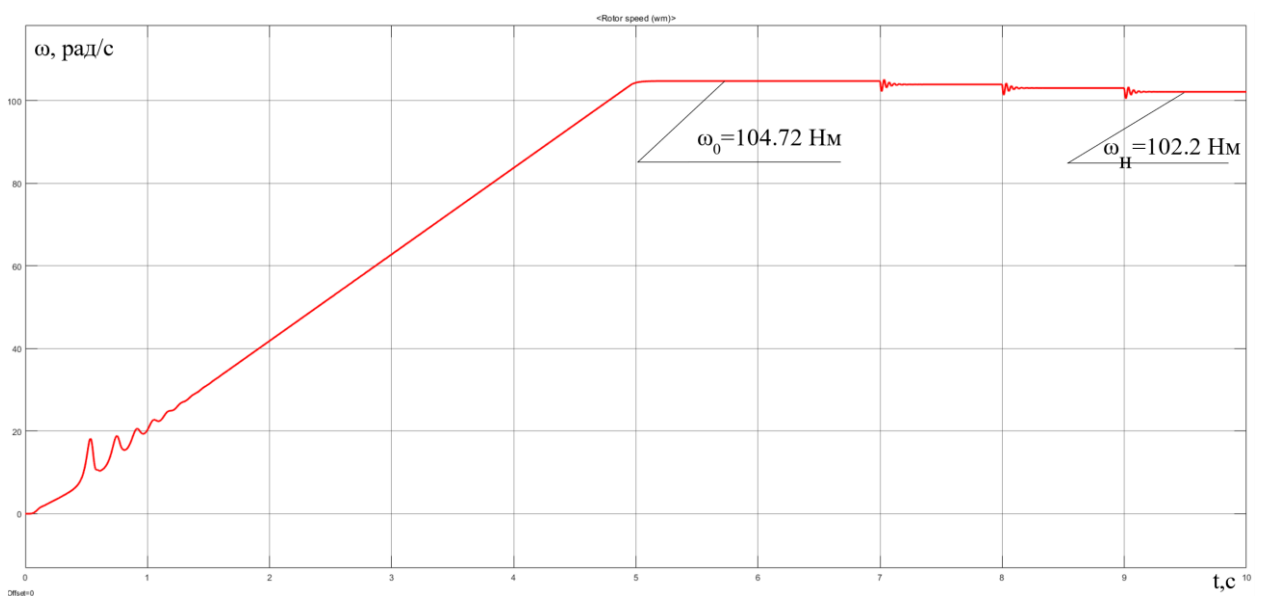


Рисунок 46 – переходный процесс скорости АД при $k_M = 0.1$

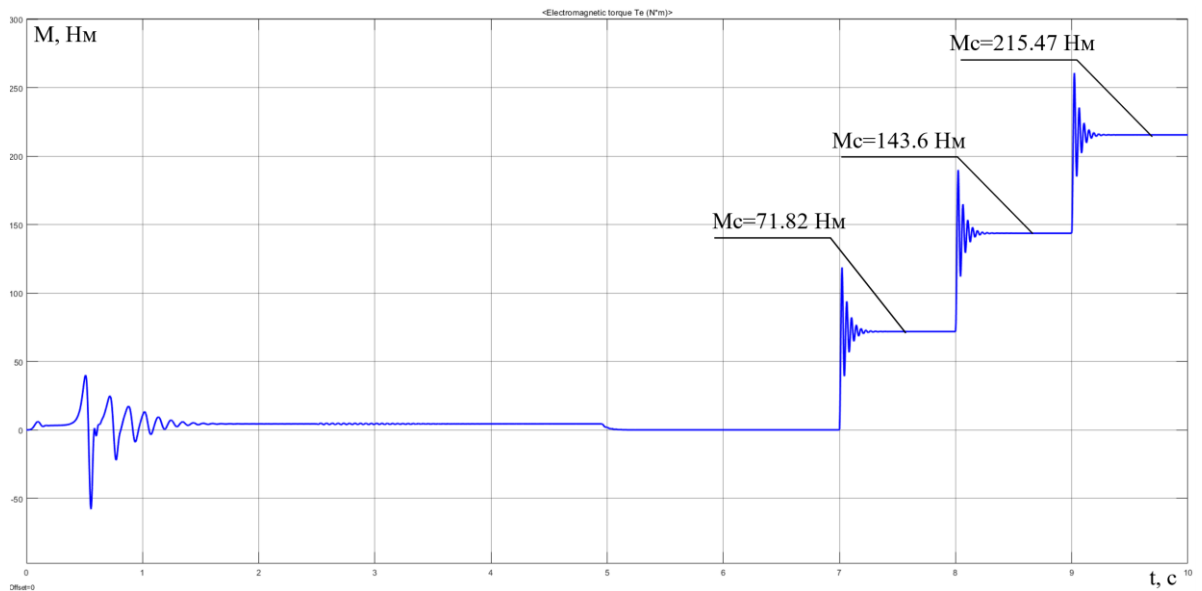


Рисунок 47 – переходный процесс электромагнитного момента АД при $k_M = 0.1$

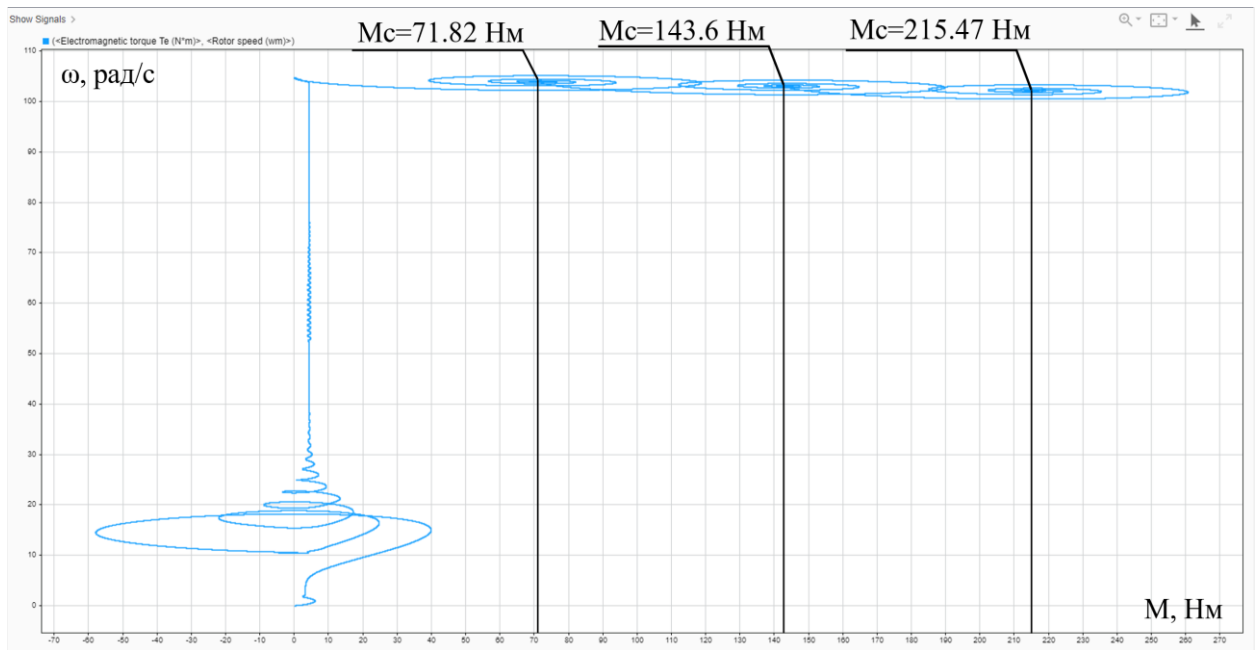


Рисунок 48 – Динамическая механическая характеристика АД при $k_M = 0,1$

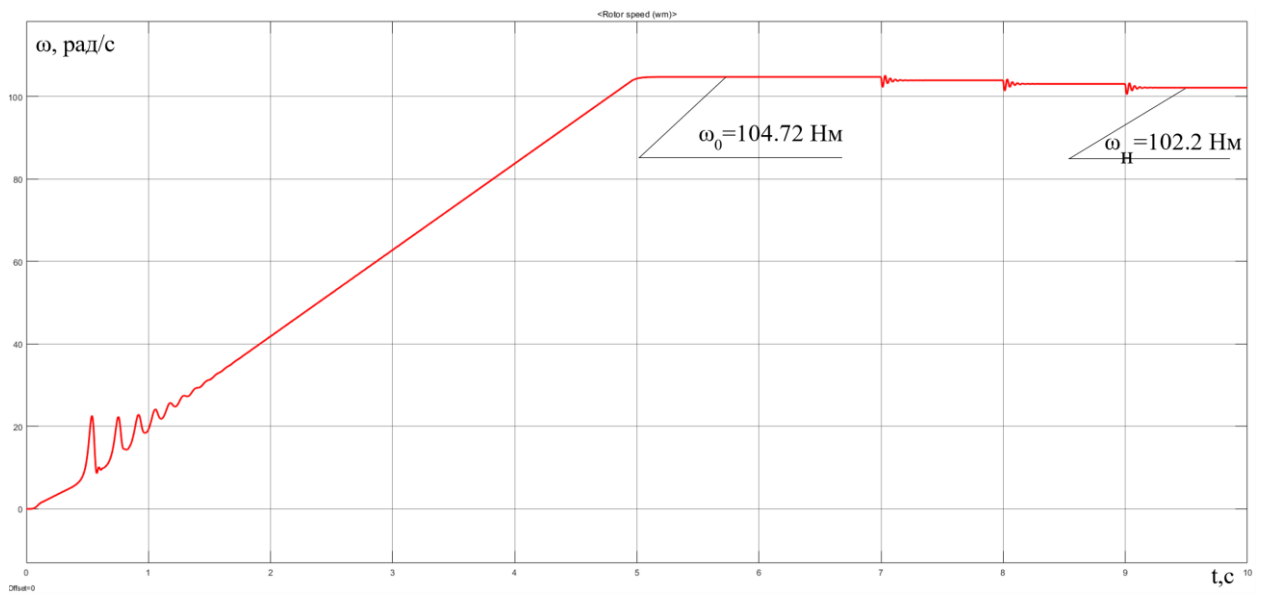


Рисунок 49 – переходный процесс скорости АД при $k_M = 0.2$

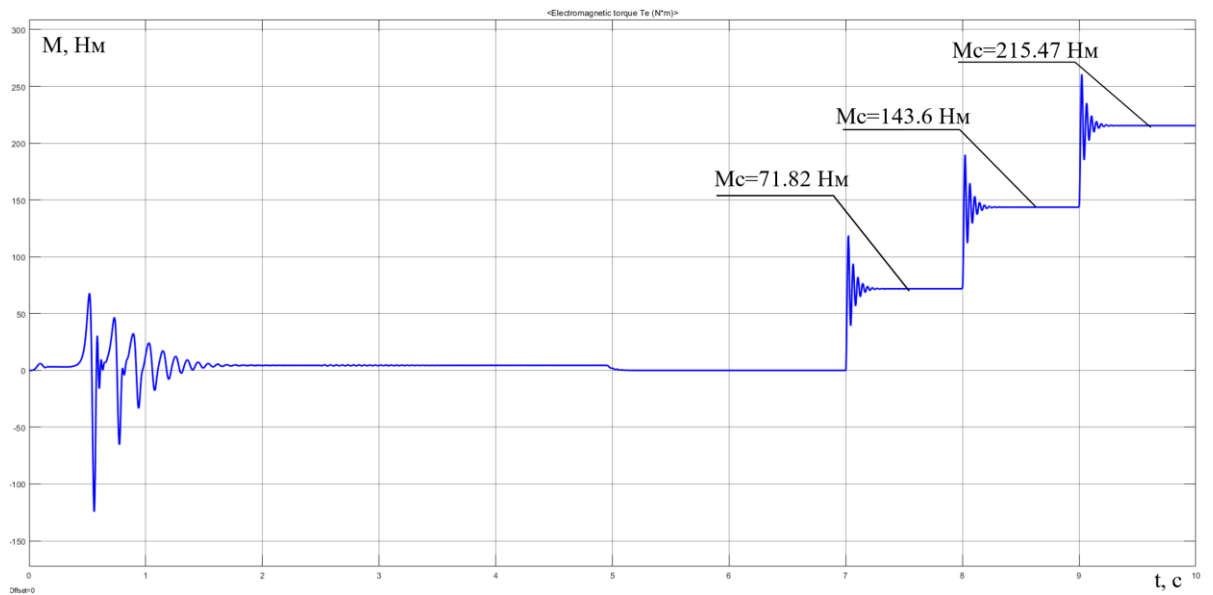


Рисунок 50 – переходный процесс электромагнитного момента АД при $k_M = 0.2$

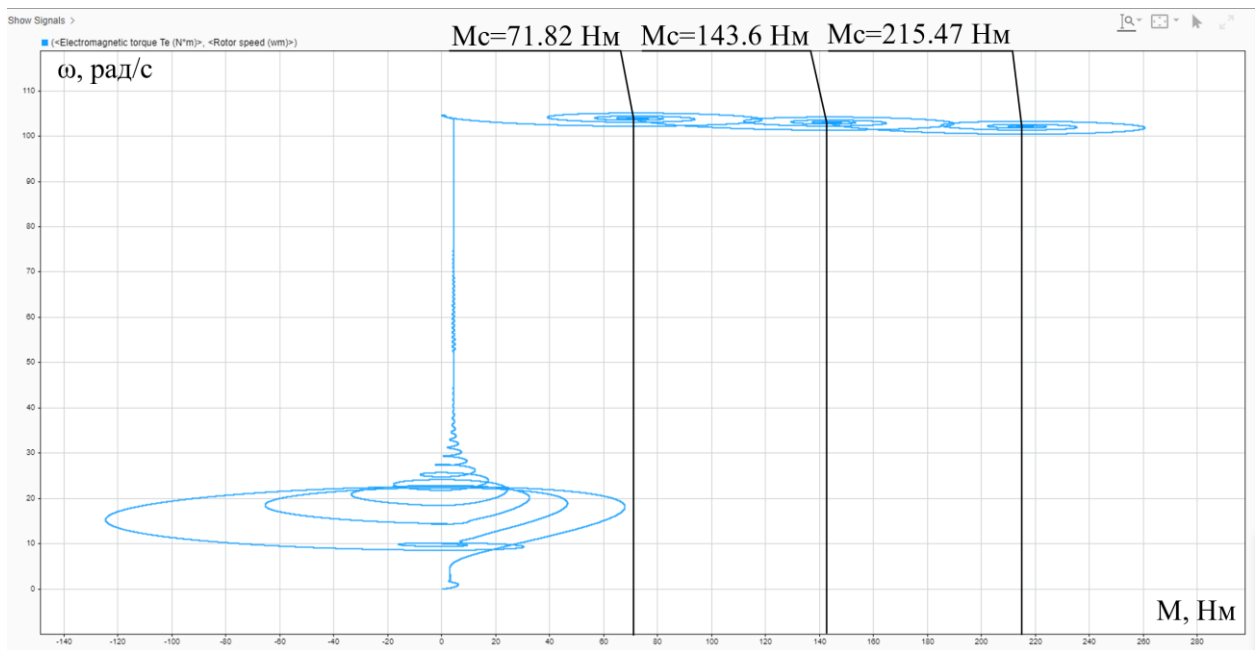


Рисунок 51 – Динамическая механическая характеристика АД при $k_M = 0.2$

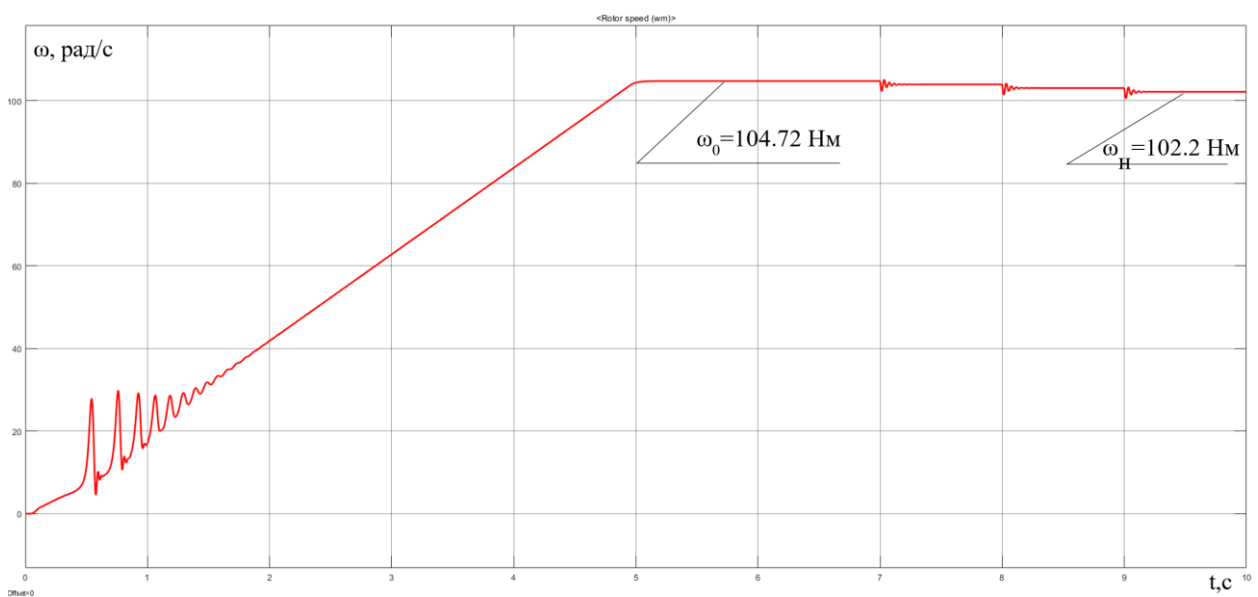


Рисунок 52 – переходный процесс скорости АД при $k_M = 0.3$

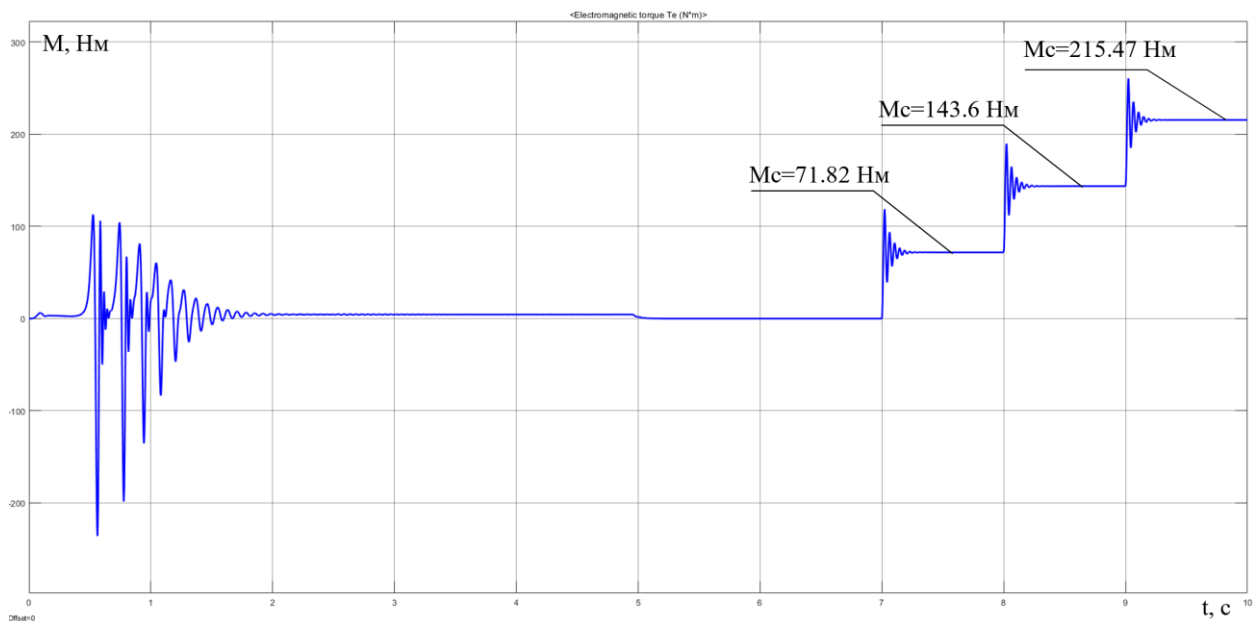


Рисунок 53 – переходный процесс электромагнитного момента АД при $k_M = 0.3$

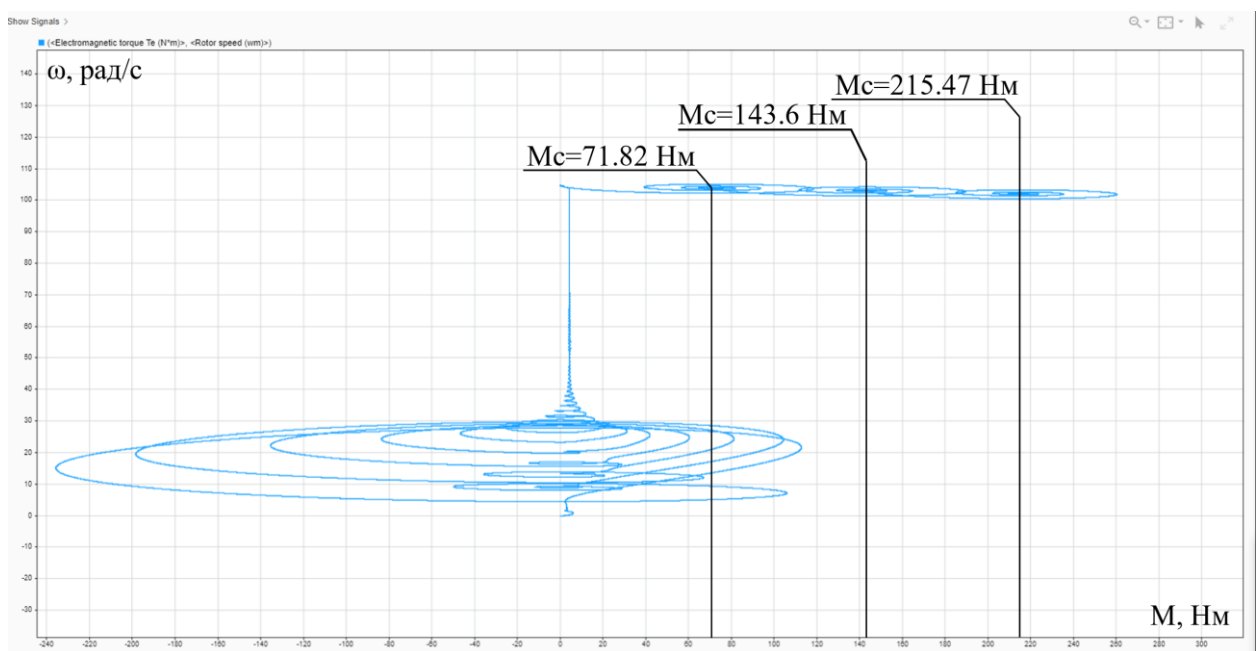


Рисунок 54 – Динамическая механическая характеристика АД при $k_M = 0.3$

Как видно из вышеприведенных рисунков, при увеличении коэффициента компенсации стабильность системы ухудшается – увеличивается колебательность переходных процессов и соответственно «размах» фазового портрета системы. Однако подобные действия позволяют

избежать стопорения двигателя при увеличении нагрузки, так как положительная обратная связь пропорционально реагирует на увеличение тока, сопровождавшееся увеличением механического момента сопротивления на валу, и повышает амплитуду модулирующего сигнала, что в свою очередь увеличивает перегрузочную способность двигателя.

Произведем моделирование при имитации нагрузки

$M_c = 71,82 \text{ Н} \cdot \text{м}; M_c = 143,6 \text{ Н} \cdot \text{м}; M_c = 215,47 \text{ Н} \cdot \text{м}$ при $k_M = 0.15$ (рис. 55–57):

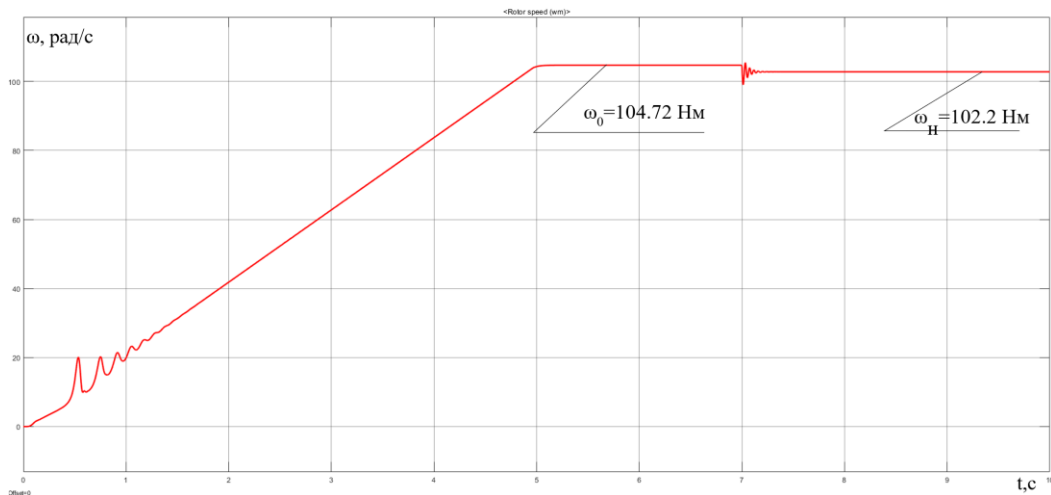


Рисунок 55 – переходный процесс скорости АД при $k_M = 0.15$

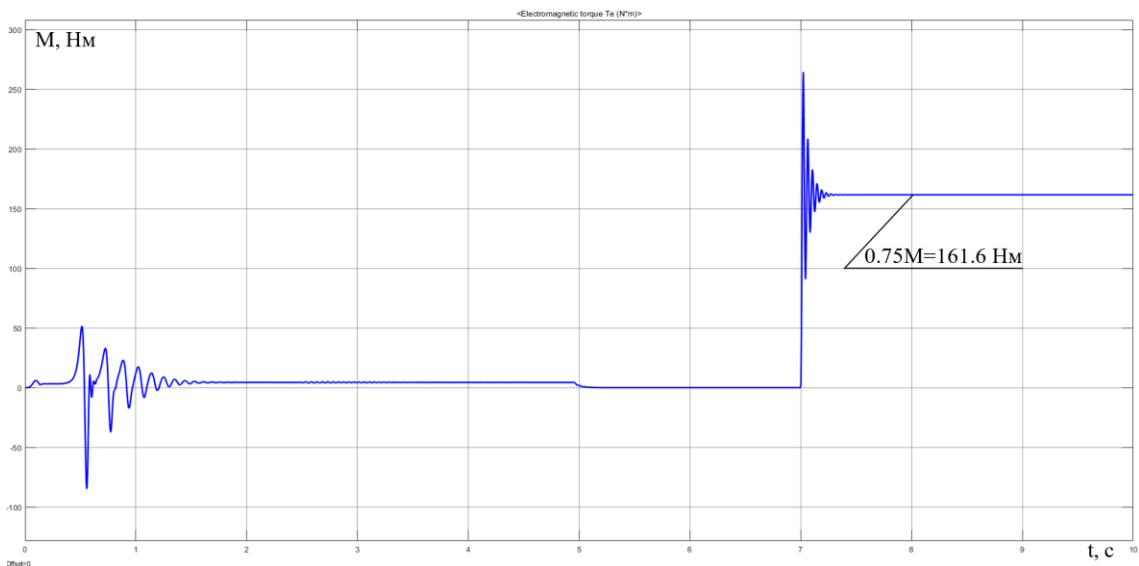


Рисунок 56 – переходный процесс электромагнитного момента АД при $k_M = 0.15$

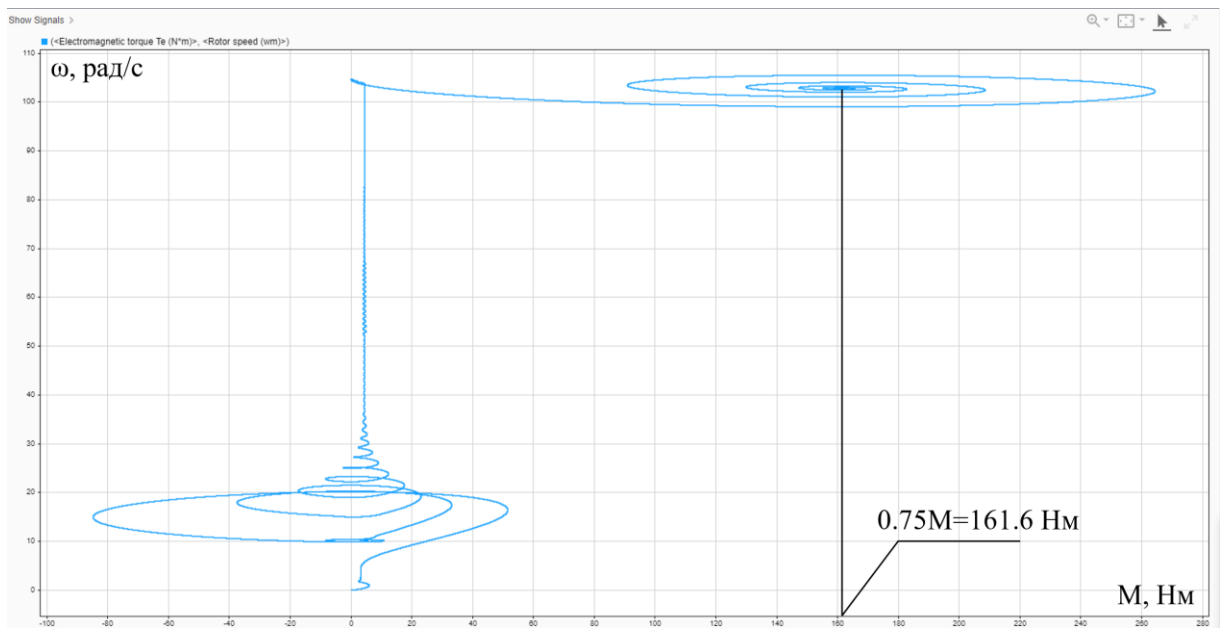


Рисунок 57 – Динамическая механическая характеристика АД при $k_M = 0.15$

Пуск произведен успешно, но при таком значении момента компенсации наблюдаются существенные колебания момента, наличие которых не является положительным аспектом в крутильном механизме, ввиду возникающих волновых эффектов и соответствующих механических перегрузок узлов устройства. Безусловно, можно уменьшить этот коэффициент и привести его в окрестность нуля, но двигатель начинает работать нестабильно на малых значениях угловой скорости из-за нагрузки, что тоже не является хорошим эффектом. Однако, это можно компенсировать введением положительной обратной связи по частотному каналу, о котором пойдет речь в следующей главе

4.5 Расчет переходных процессов скорости и момента для режима пуска, наброса-сброса нагрузки на валу двигателя системы с компенсацией скольжения

На рисунке 58 представлена имитационная модель с компенсацией скольжения..

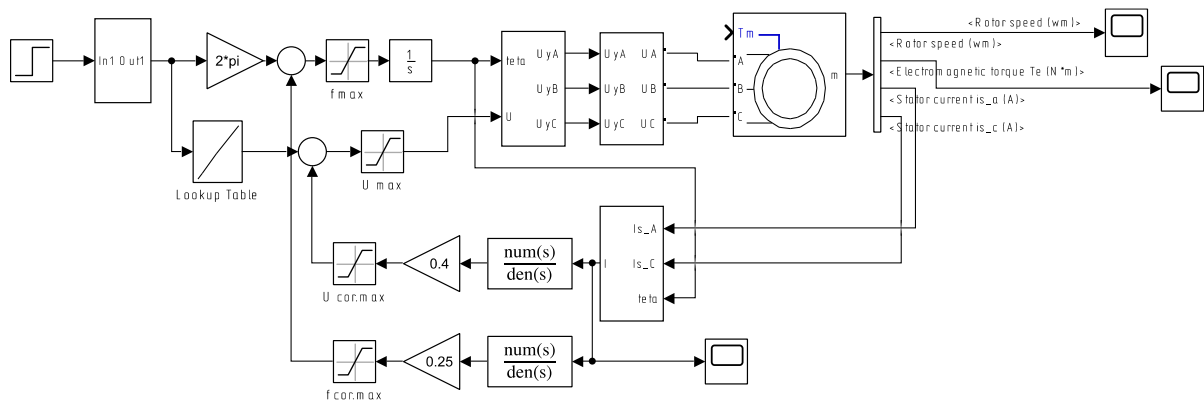


Рисунок 58 - Имитационная модель замкнутой системы ПЧ-АД с компенсацией скольжения

В данной системе предусмотрена корректирующая положительная обратная связь, связанная с заданием частоты модулирующего сигнала ШИМ. Для проведения моделирования использовались различные значения коэффициентов компенсации момента и скольжения в диапазоне $k_M = 0; 0,1; 0,2; 0,3$; $k_C = 0,1; 0,2; 0,3$ (рис.59-85).

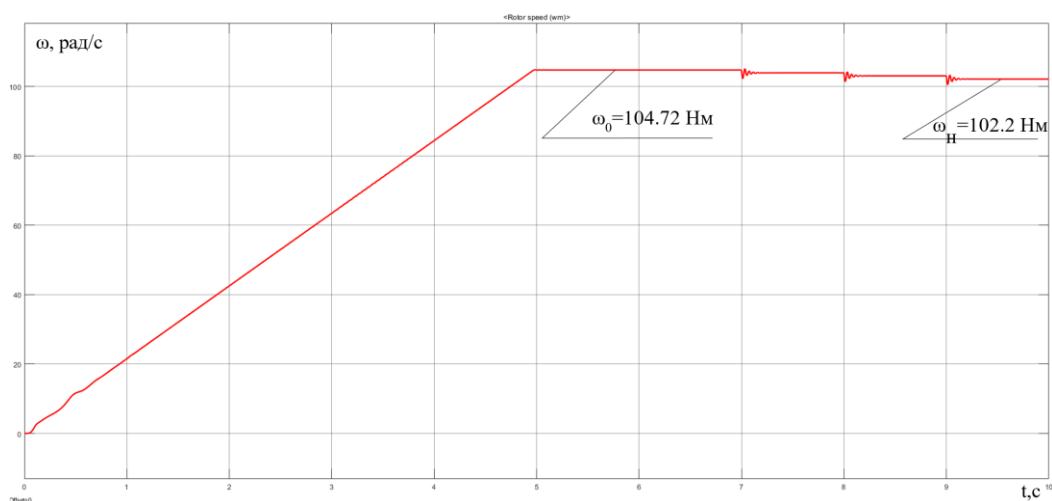


Рисунок 59 – переходный процесс скорости АД при $k_M = 0,1$ и $k_C = 0,1$

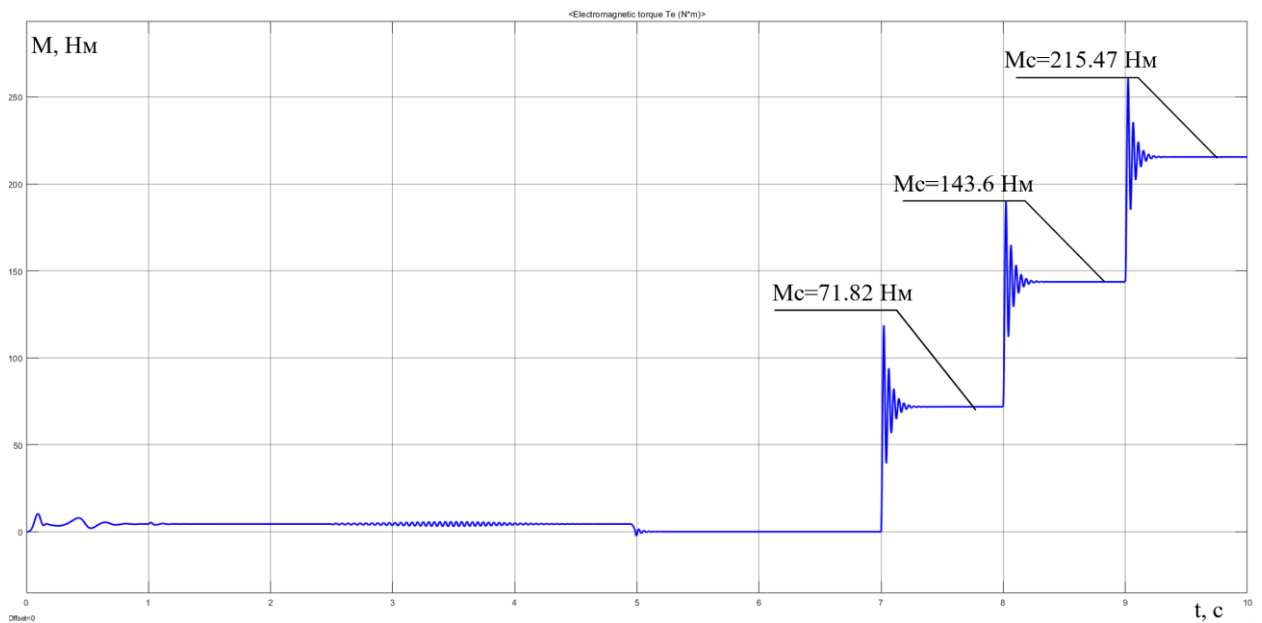


Рисунок 60 – переходный процесс электромагнитного момента АД с набросом нагрузки при $k_M = 0,1$ и $k_C = 0,1$

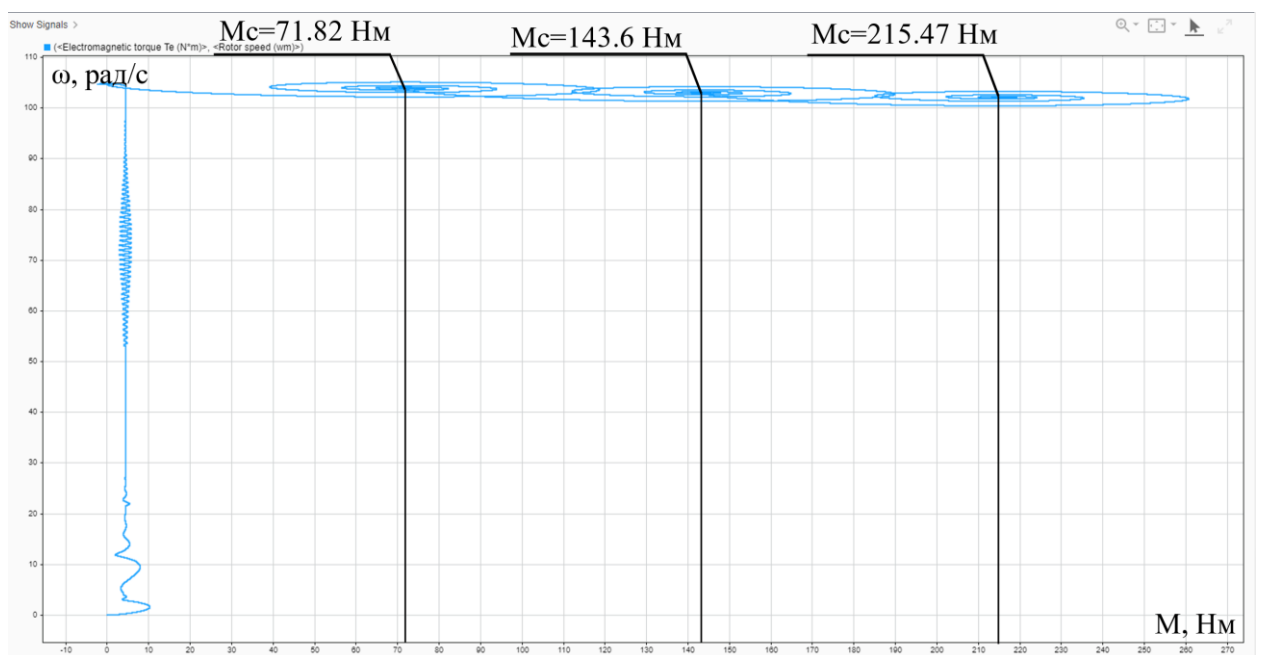


Рисунок 61 – Динамическая механическая характеристика АД при $k_M = 0,1$ и $k_C = 0,1$

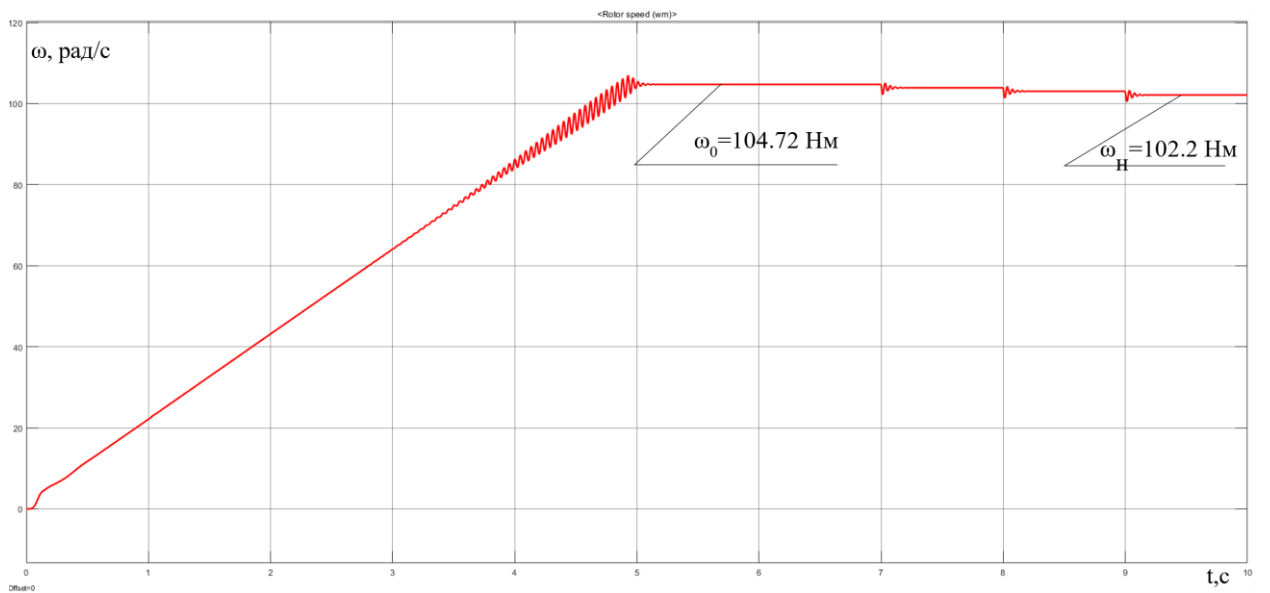


Рисунок 62 – переходный процесс скорости АД при $k_M = 0,1$ и $k_C = 0,2$

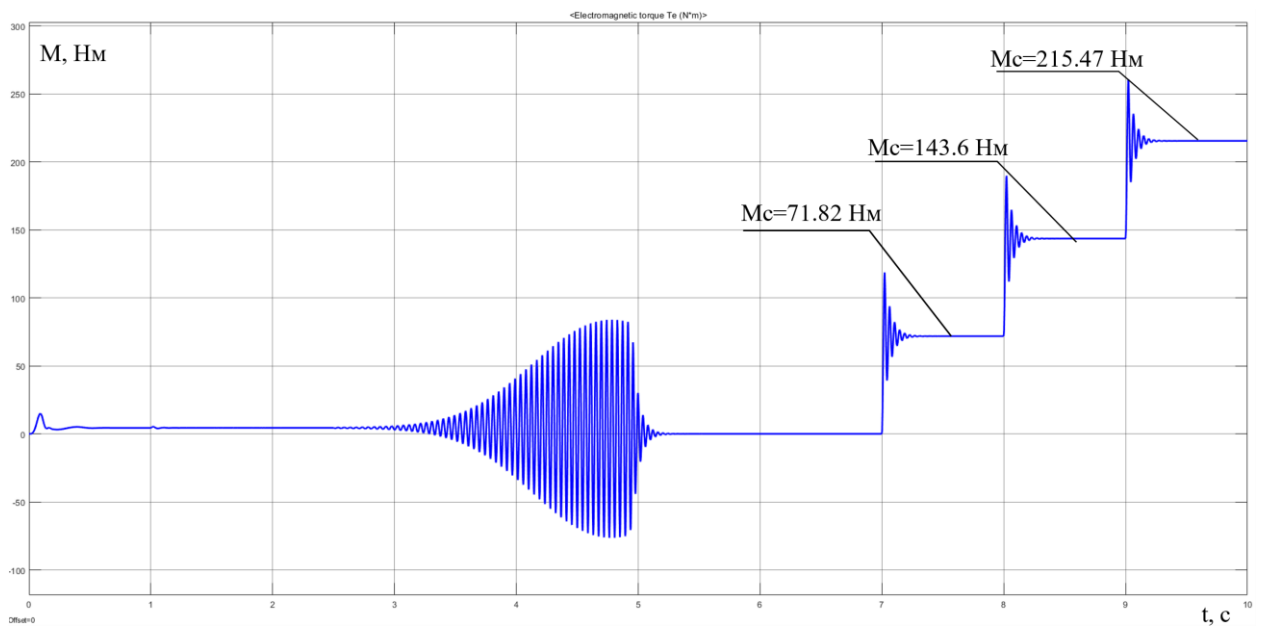


Рисунок 63 – переходный процесс электромагнитного момента АД при $k_M = 0,1$ и $k_C = 0,1$

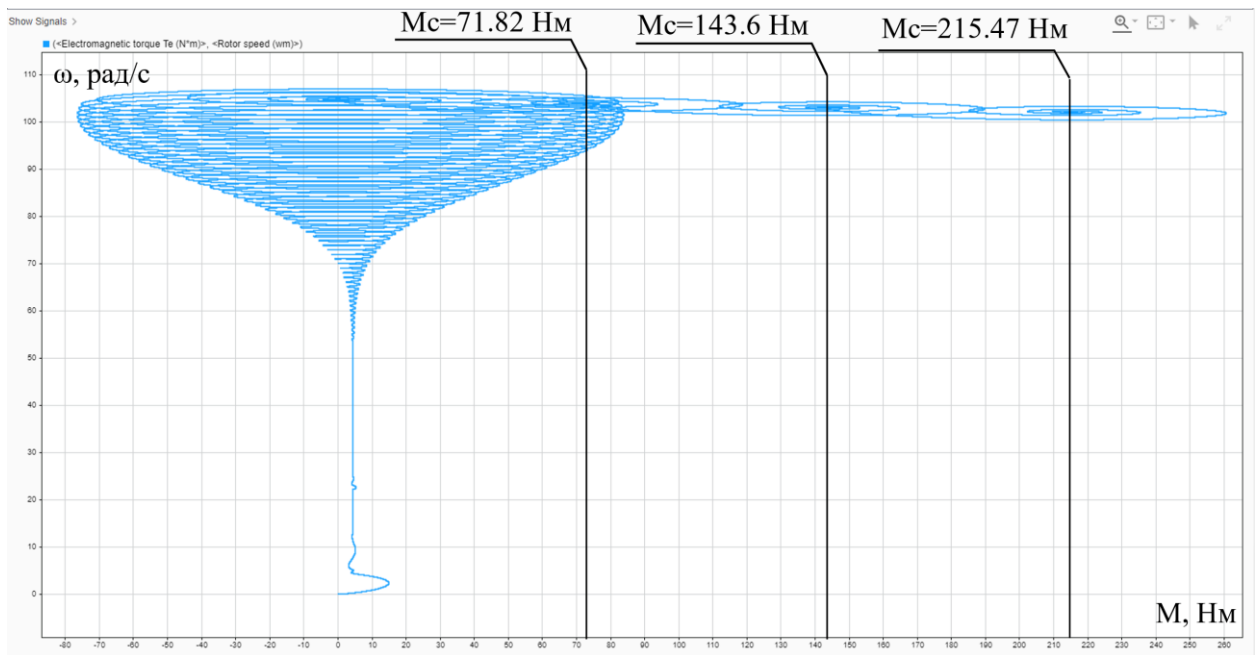


Рисунок 64 – Динамическая механическая характеристика АД при $k_M = 0,1$ и $k_c = 0,2$

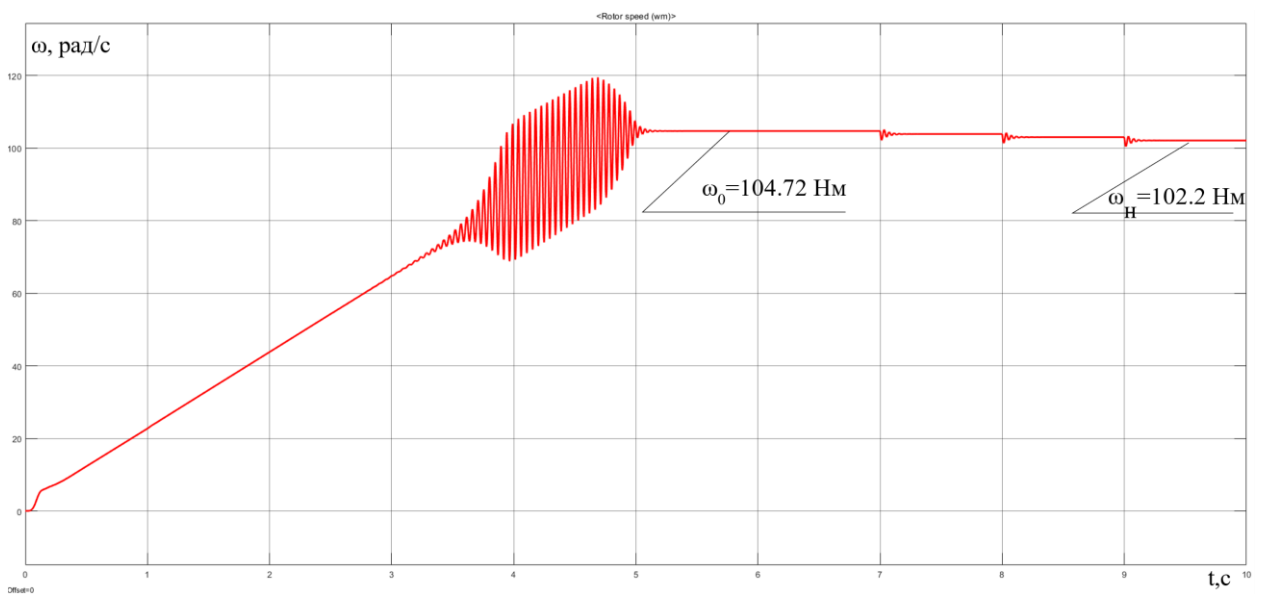


Рисунок 65 – переходный процесс скорости АД при $k_M = 0,1$ и $k_c = 0,3$

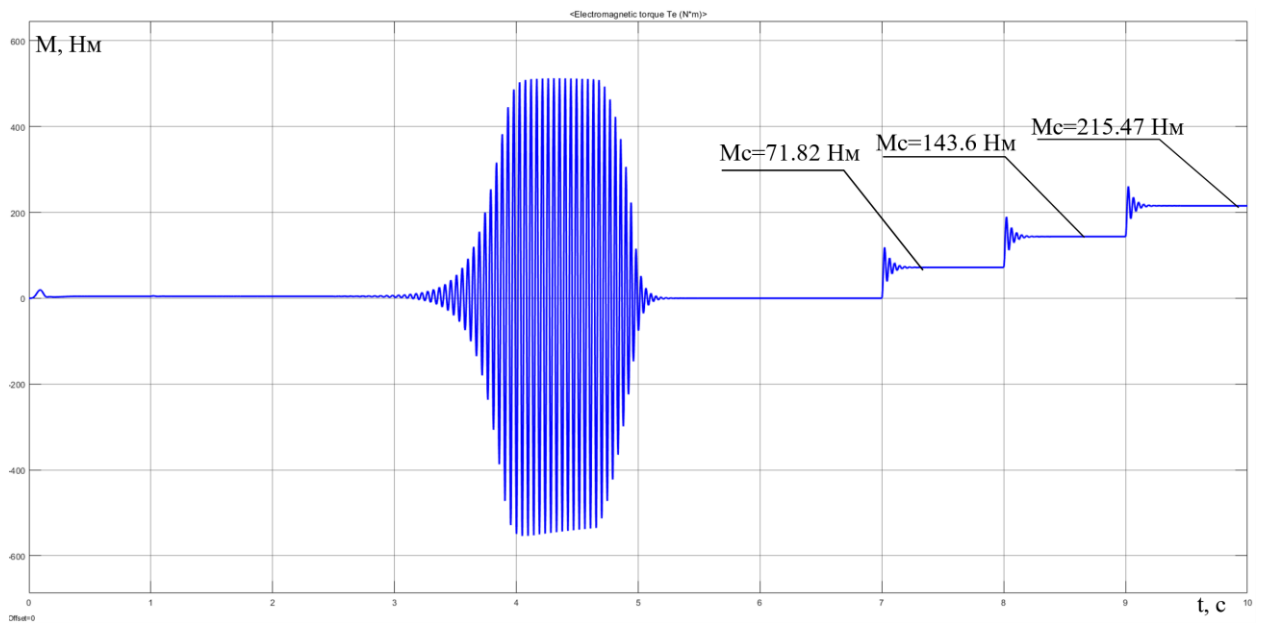


Рисунок 66 – переходный процесс электромагнитного момента АД при $k_M = 0,1$ и $k_c = 0,3$

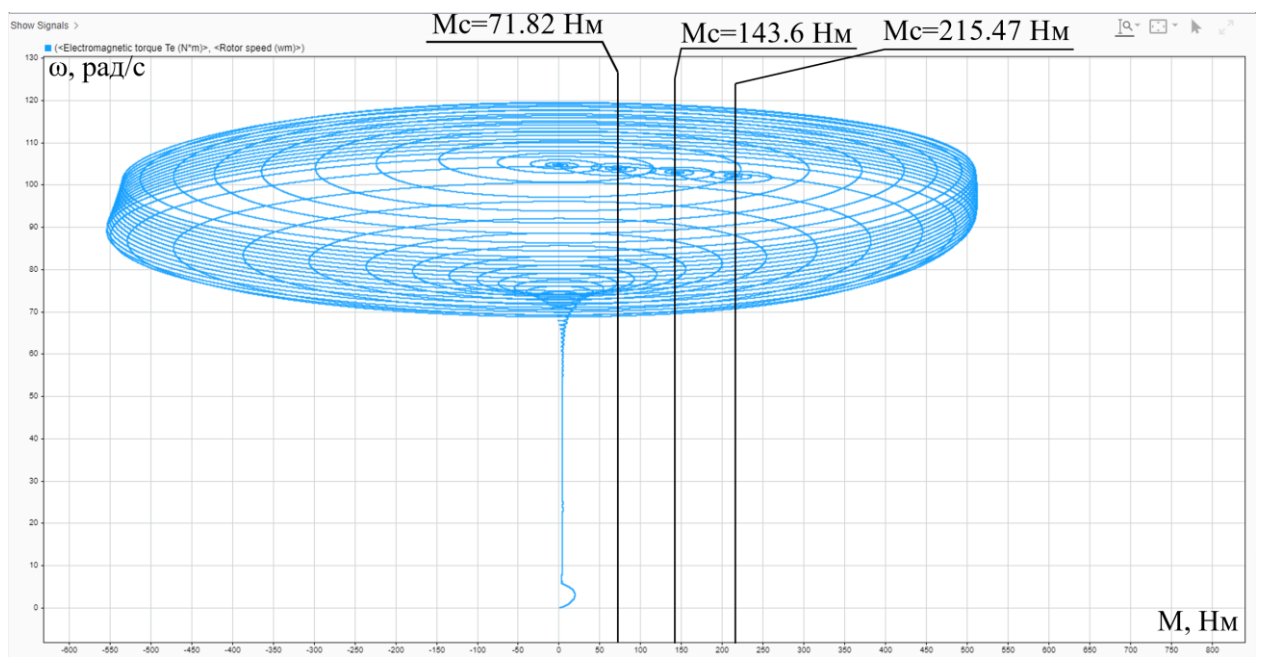


Рисунок 67 – Динамическая механическая характеристика АД при $k_M = 0,1$ и $k_c = 0,3$

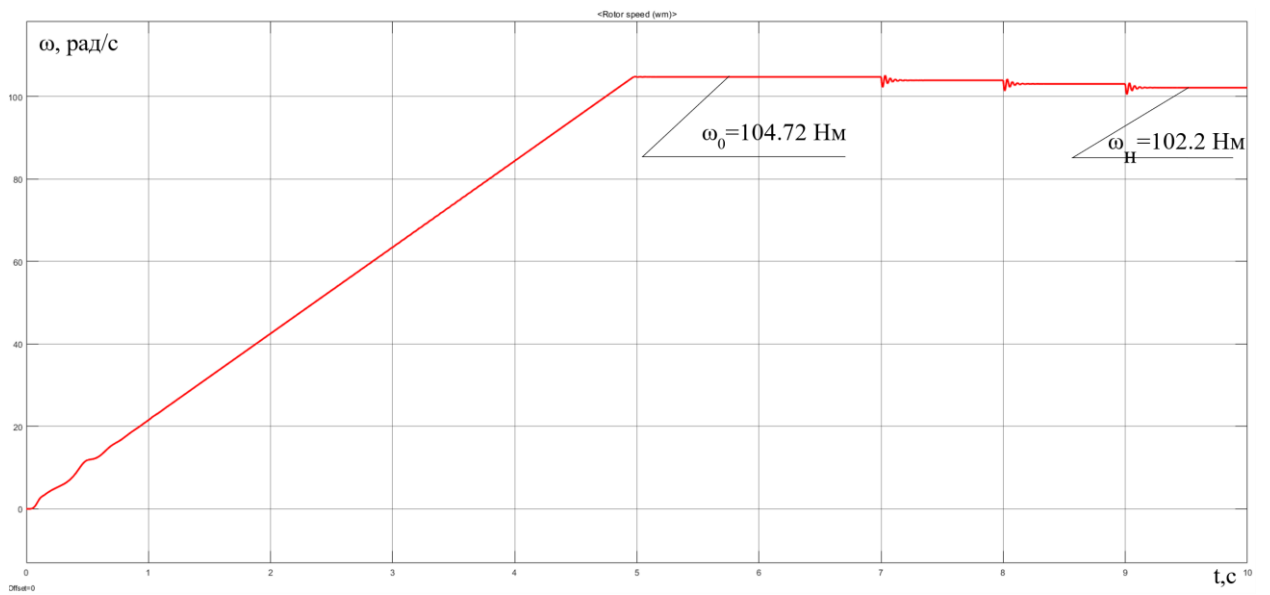


Рисунок 68 – переходный процесс скорости АД при $k_M = 0,2$ и $k_C = 0,1$

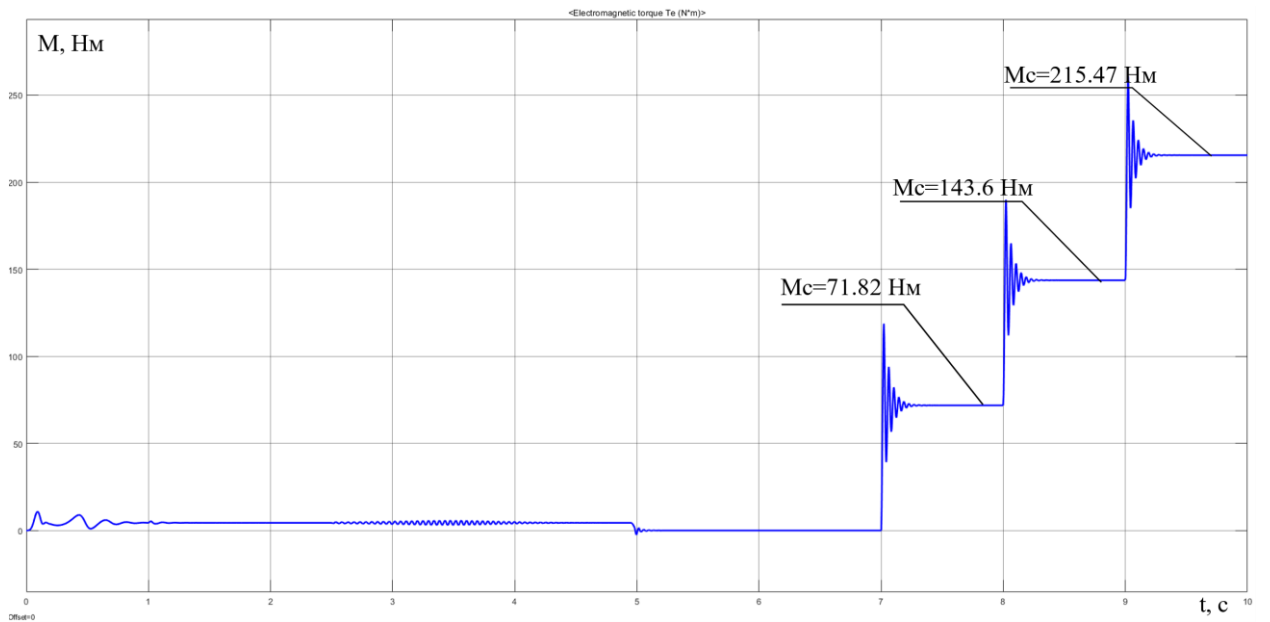


Рисунок 69 – переходный процесс электромагнитного момента АД при $k_M = 0,2$ и $k_C = 0,1$

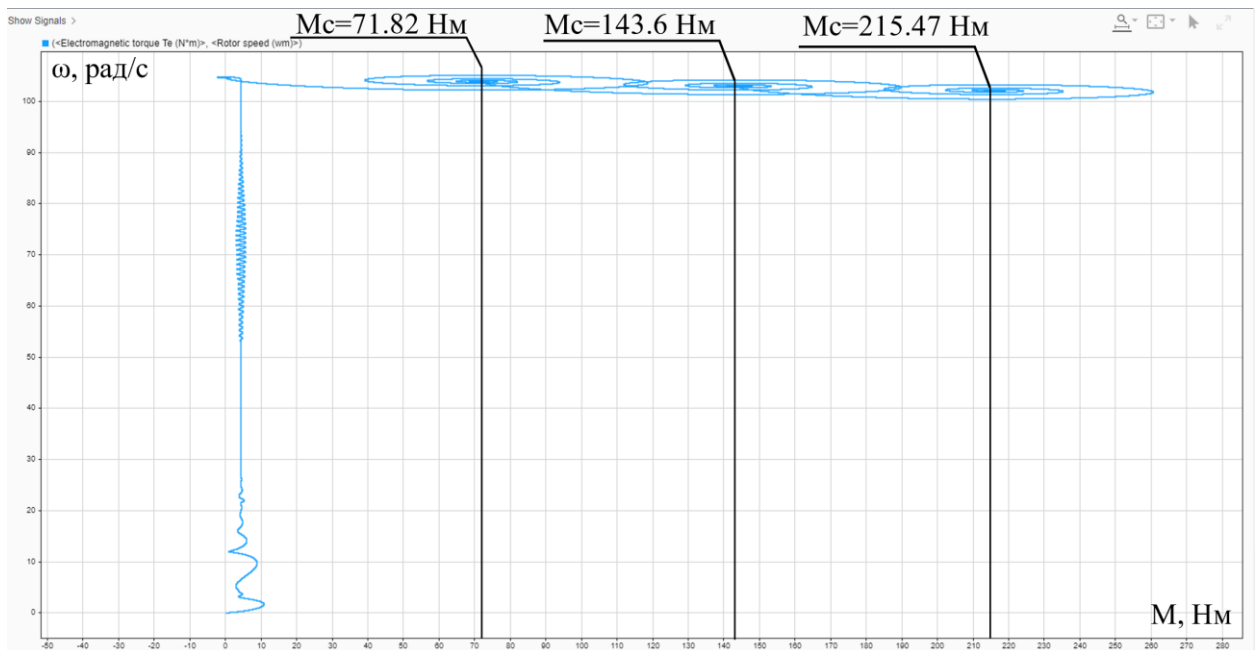


Рисунок 70 – Динамическая механическая характеристика АД при $k_M = 0,2$ и $k_c = 0,1$

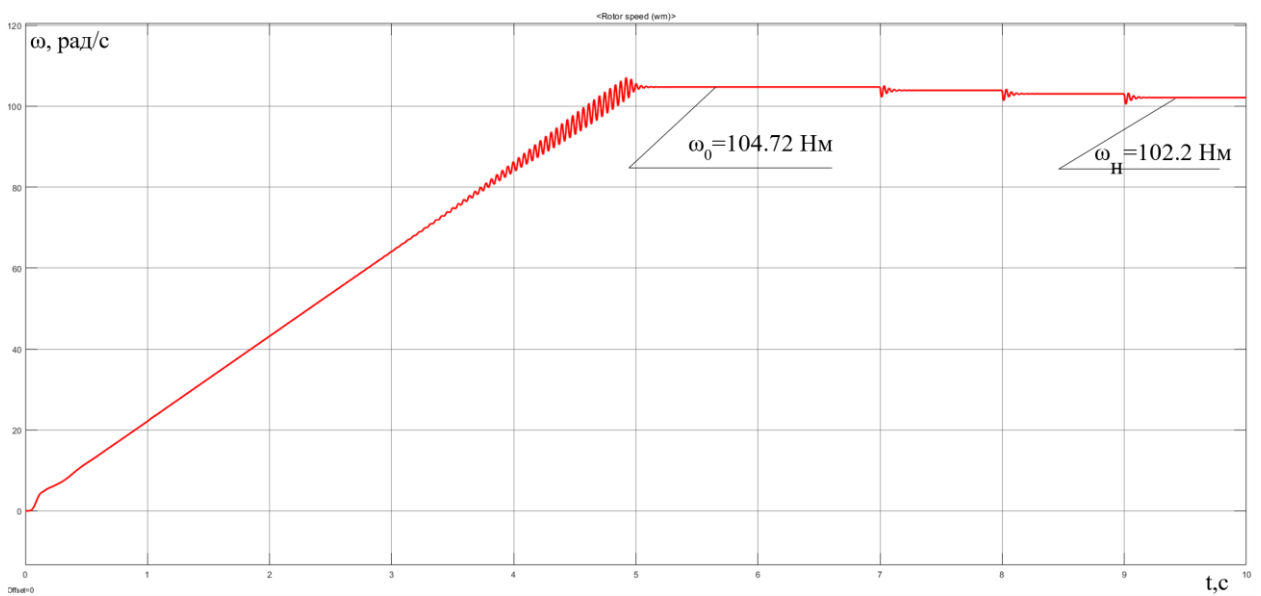


Рисунок 71 – переходный процесс скорости АД при $k_M = 0,2$ и $k_c = 0,2$

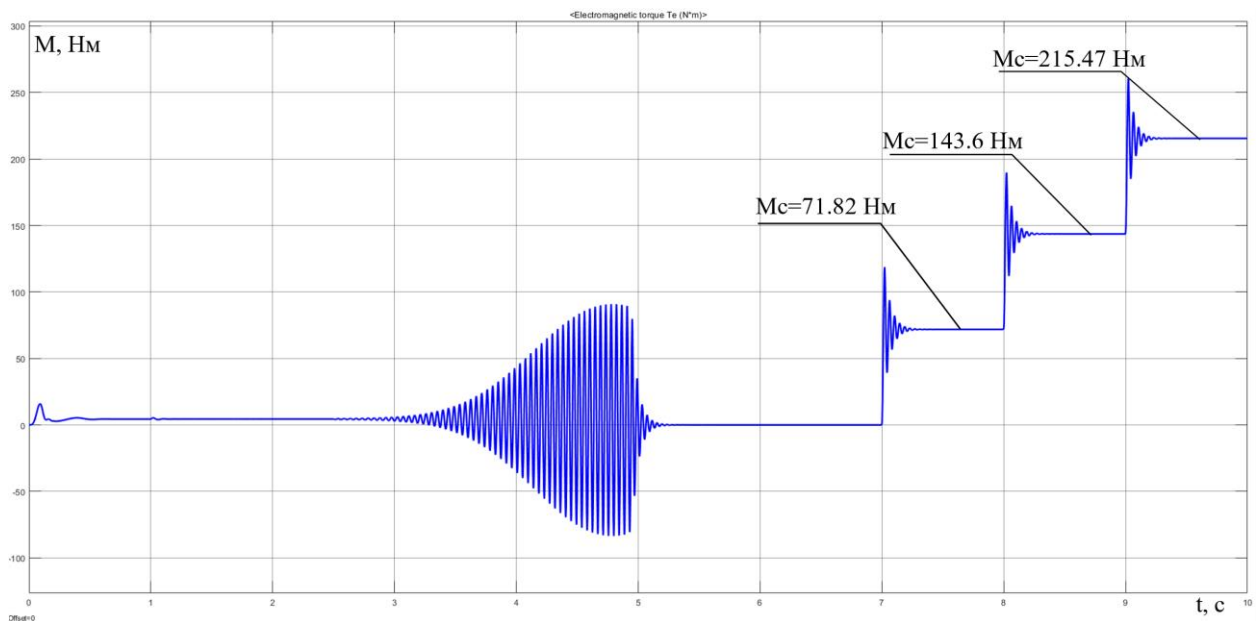


Рисунок 72 – переходный процесс электромагнитного момента АД при $k_M = 0,2$ и $k_c = 0,2$

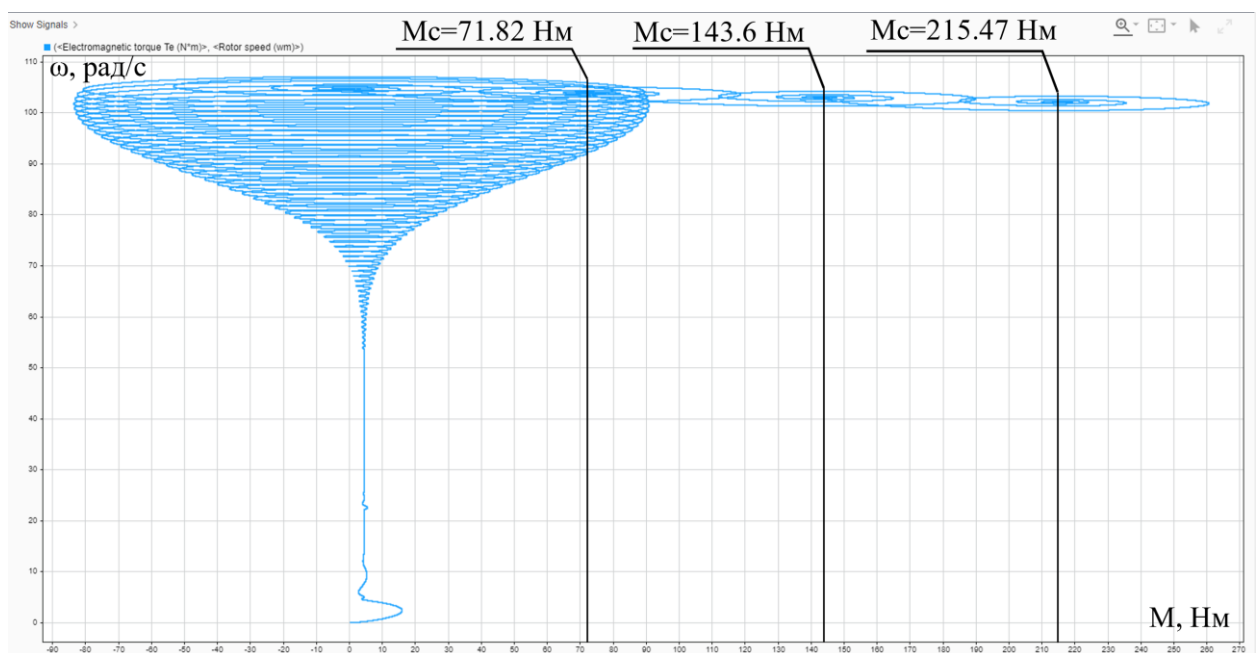


Рисунок 73 – Динамическая механическая характеристика АД при $k_M = 0,2$ и $k_c = 0,2$

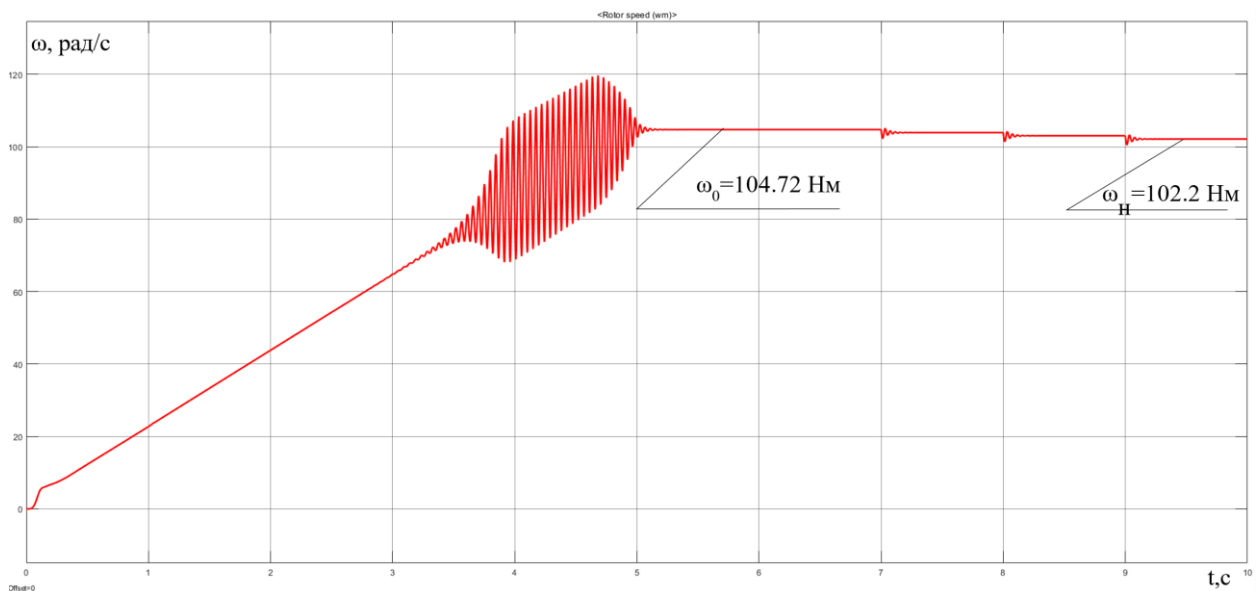


Рисунок 74 – переходный процесс скорости АД при $k_M = 0,2$ и $k_c = 0,3$

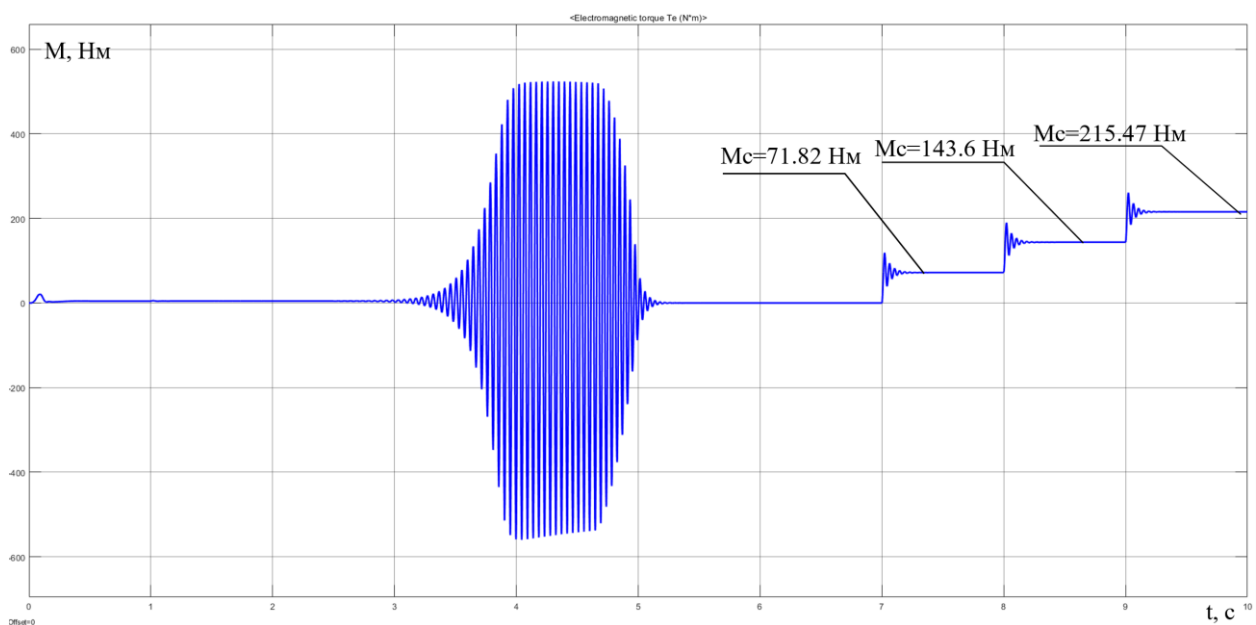


Рисунок 75 – переходный процесс электромагнитного момента АД при $k_M = 0,2$ и $k_c = 0,3$

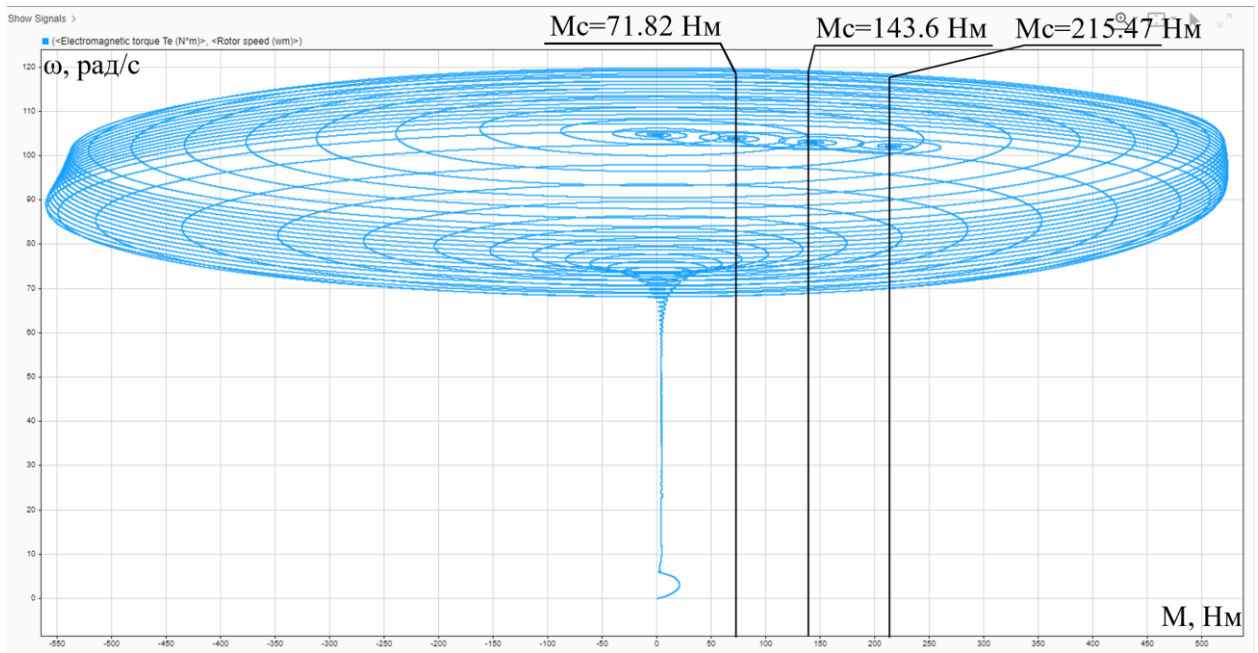


Рисунок 76 – Динамическая механическая характеристика АД при $k_M = 0,2$ и $k_c = 0,3$

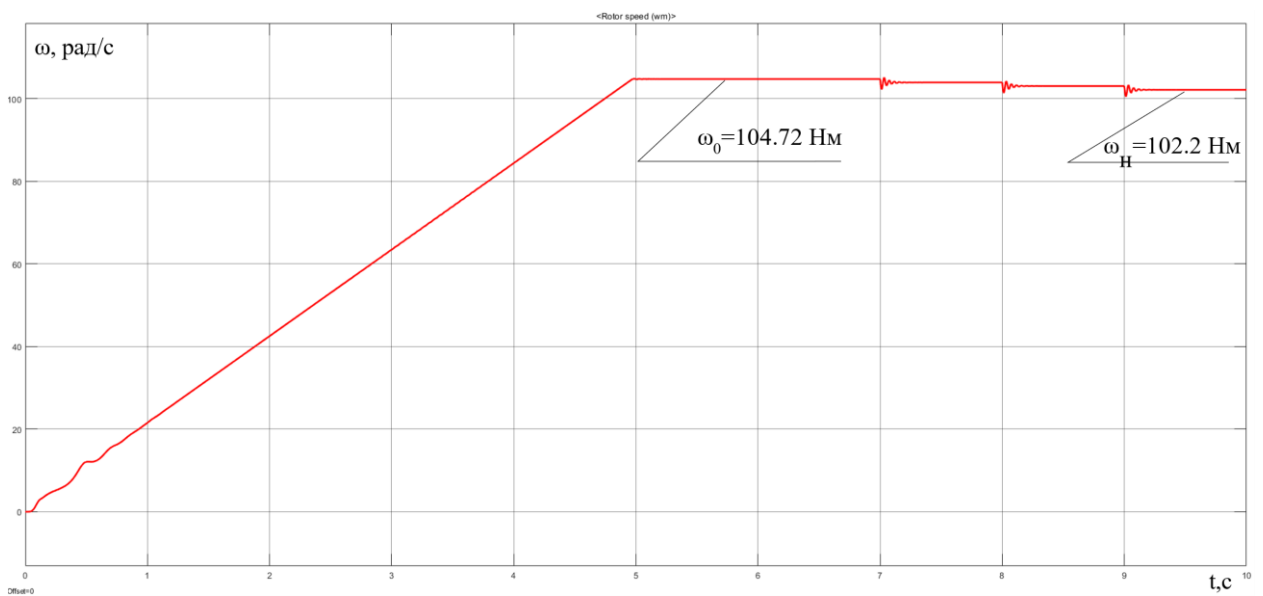


Рисунок 77 – переходный процесс скорости АД при $k_M = 0,3$ и $k_c = 0,1$

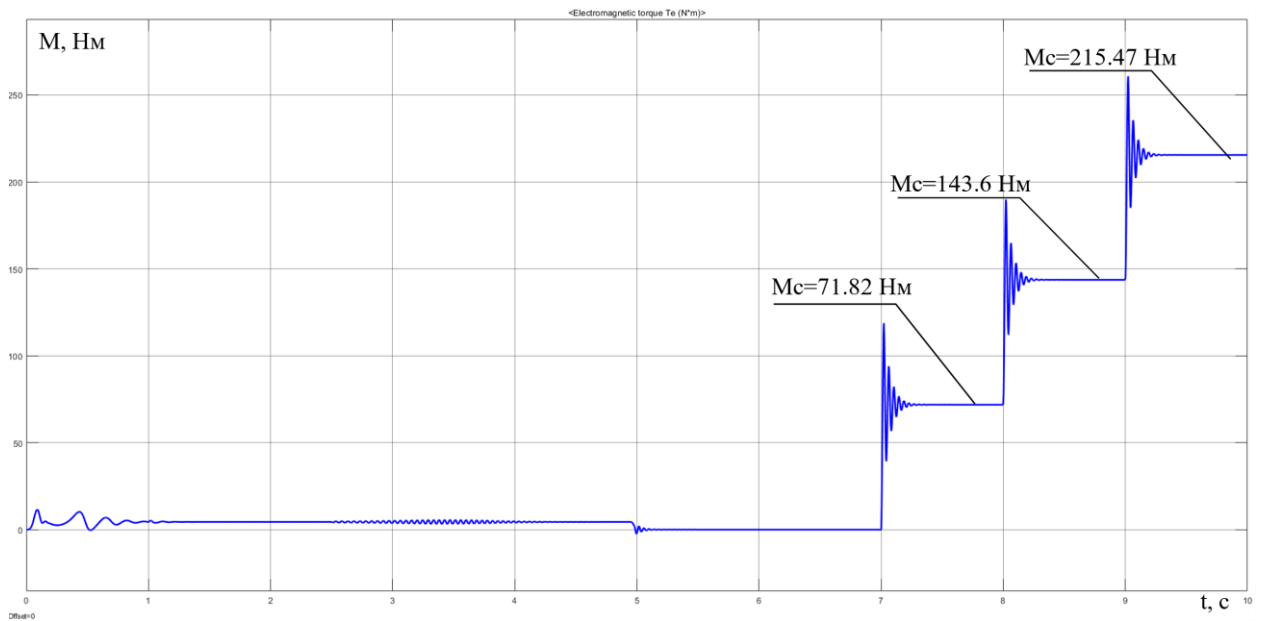


Рисунок 78 – переходный процесс электромагнитного момента АД при $k_M = 0,3$ и $k_c = 0,1$

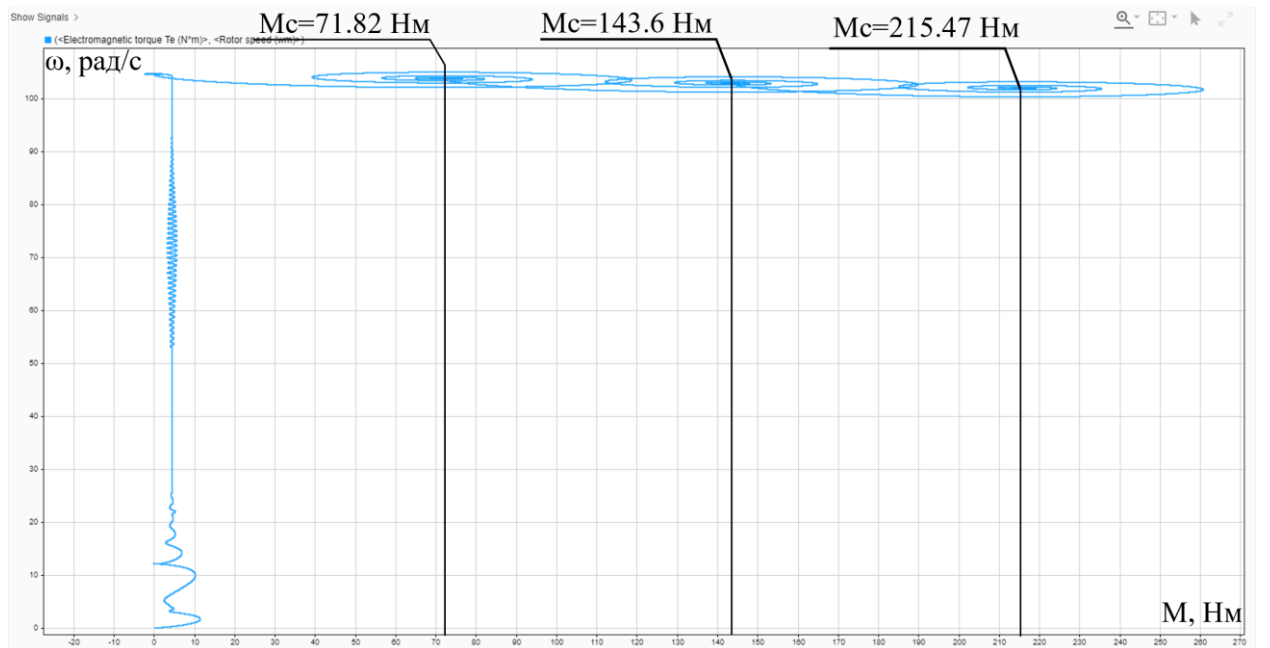


Рисунок 79 – Динамическая механическая характеристика АД при $k_M = 0,3$ и $k_c = 0,1$

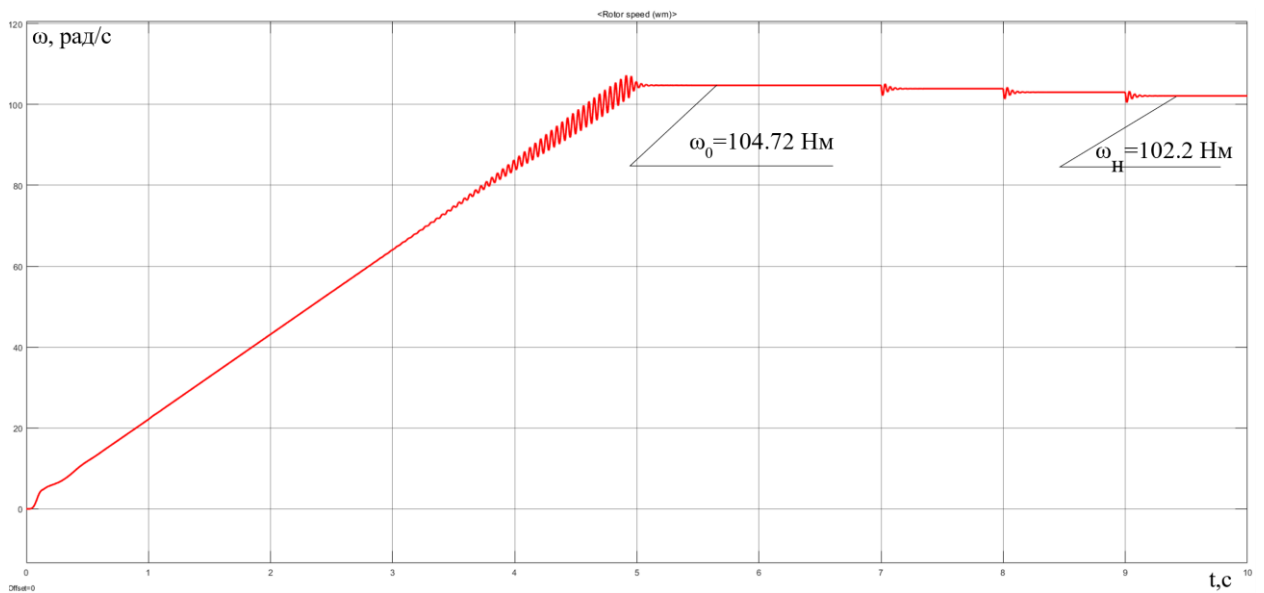


Рисунок 80 – переходный процесс скорости АД при $k_M = 0,3$ и $k_C = 0,2$

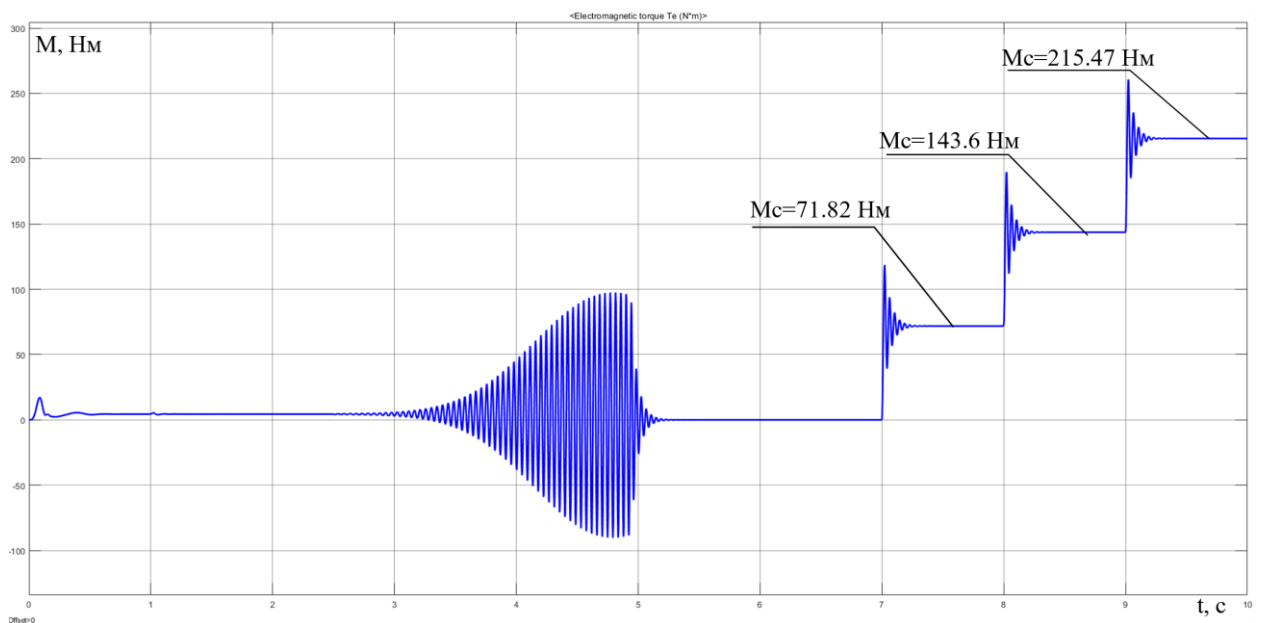


Рисунок 81 – переходный процесс электромагнитного момента АД
при $k_M = 0,3$ и $k_C = 0,2$

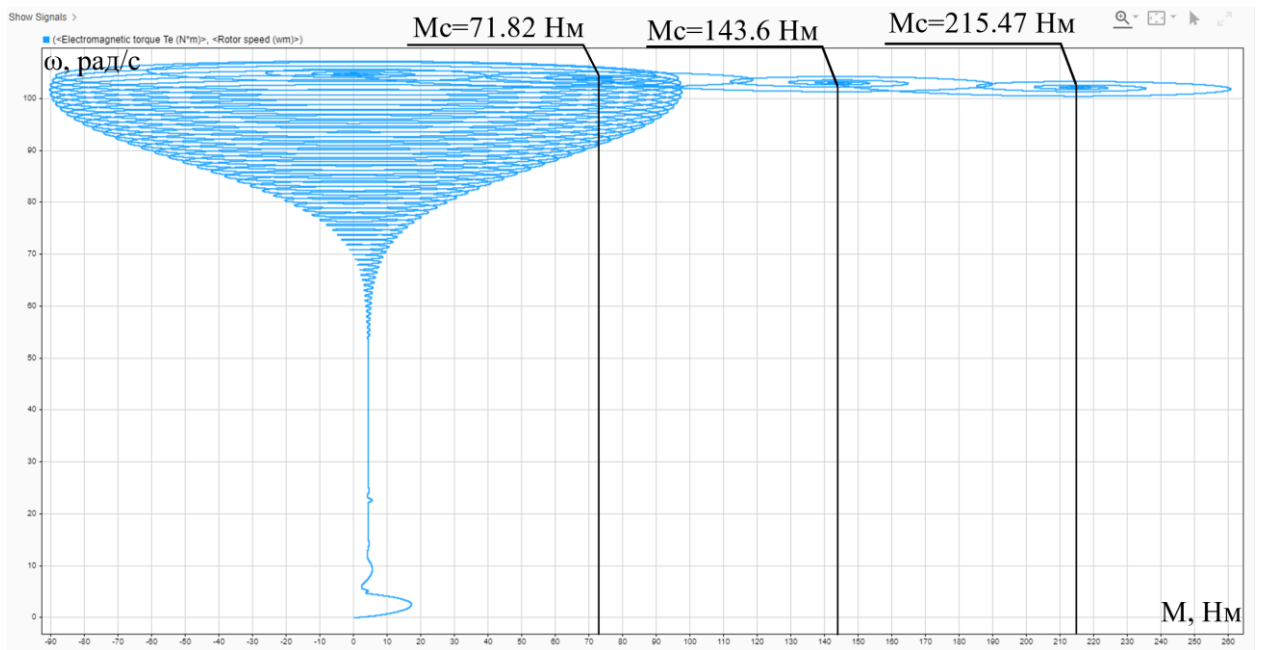


Рисунок 82 – Динамическая механическая характеристика АД при $k_M = 0,3$ и $k_c = 0,2$

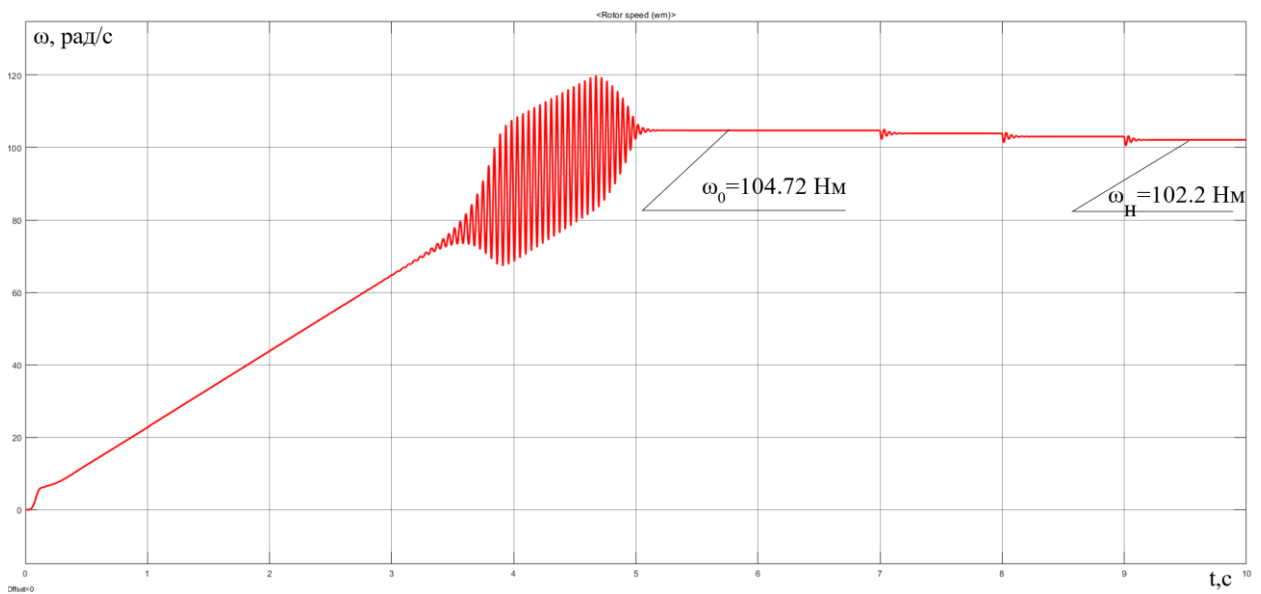


Рисунок 83 – переходный процесс скорости АД при $k_M = 0,3$ и $k_c = 0,3$

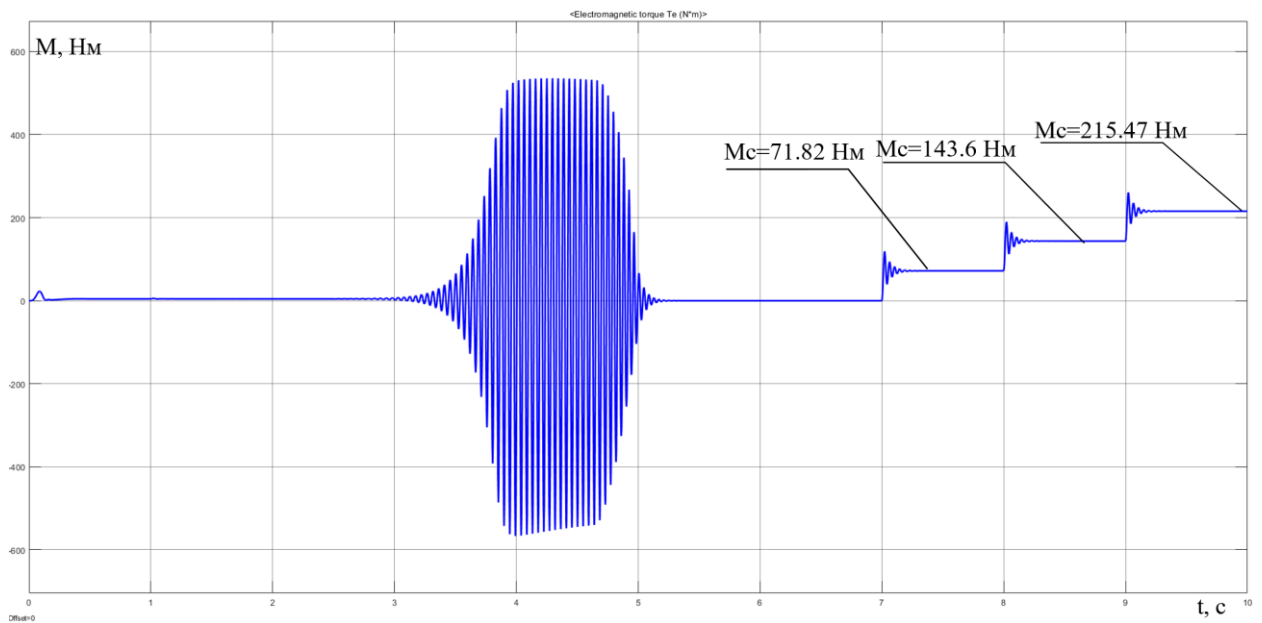


Рисунок 84 – переходный процесс электромагнитного момента АД при $k_M = 0,3$ и $k_c = 0,3$

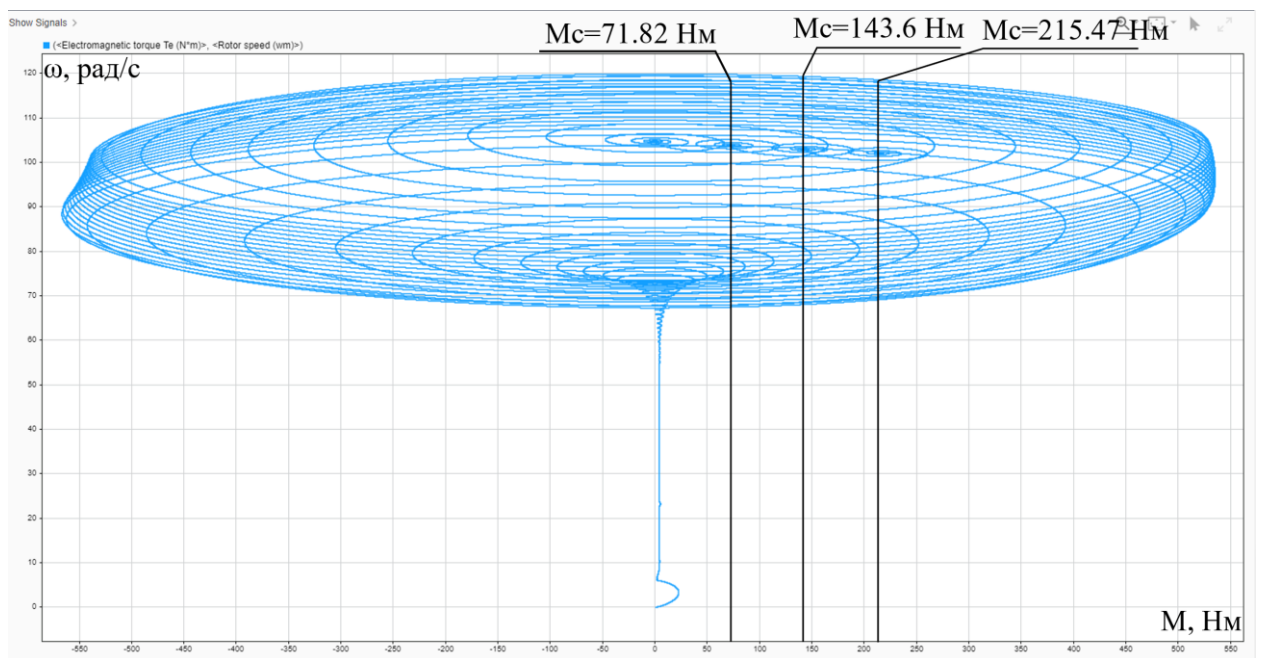


Рисунок 85 – Динамическая механическая характеристика АД при $k_M = 0,3$ и $k_c = 0,3$

Из множества вышеприведенных переходных процессов и динамических характеристик можно сделать вывод о том, что положительная обратная связь по скорости имеет стабилизирующий характер. Так, например для одного и того же коэффициента компенсации момента колебательность кривой на малых частотах вращения существенно уменьшается при

увеличении коэффициента компенсации скольжения, однако в окрестности 50 рад/с наблюдается локальное увеличение колебаний момента за счет повышения пропорциональной части обратной связи компенсации скольжения. Важно отметить то, что есть некая граница значения k_c , так уже при $k_c = 0,75$ система находится вблизи границы устойчивости, а в перспективе, при дальнейшем его увеличении может и вовсе привести электропривод «в разнос». Увеличение k_m по-прежнему только и увеличивает колебания момента.

Так же по аналогии с первым пунктом произведем моделирование при имитации нагрузки $M_c = 0,75 \cdot M_H = 0,75 \cdot 215,42 = 161,6 \text{ Н} \cdot \text{м}$ при $k_m = 0,15$ и $k_c = 0,15$ (рис.78-80):

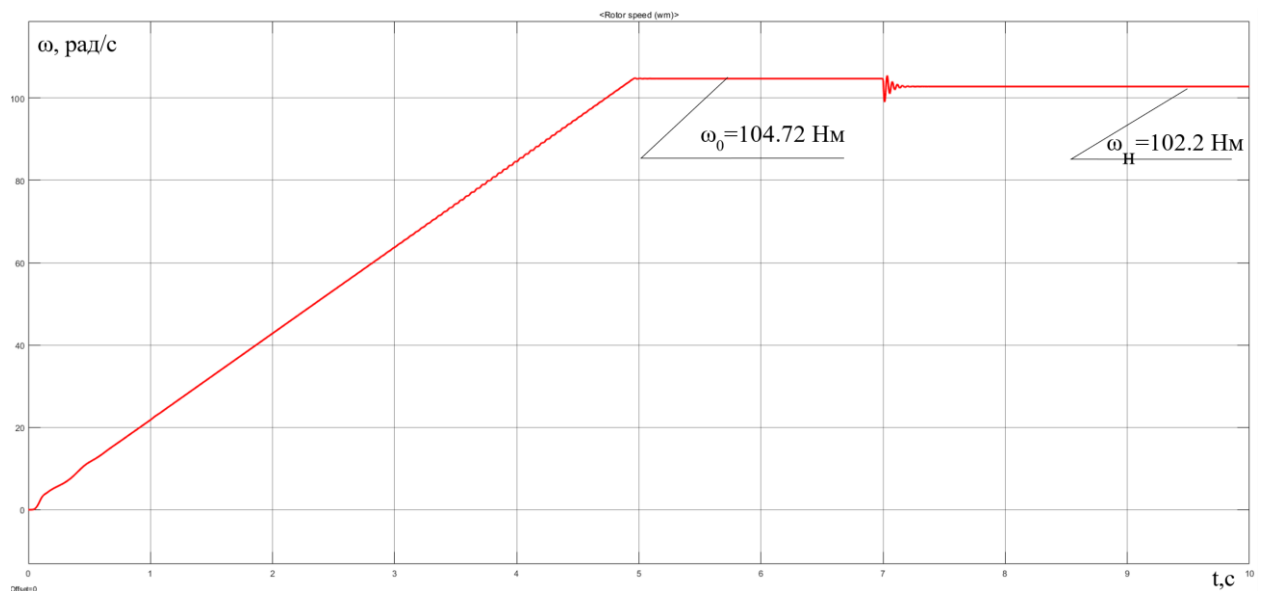


Рисунок 86 – переходный процесс скорости АД при $k_m = 0,15$ и $k_c = 0,15$

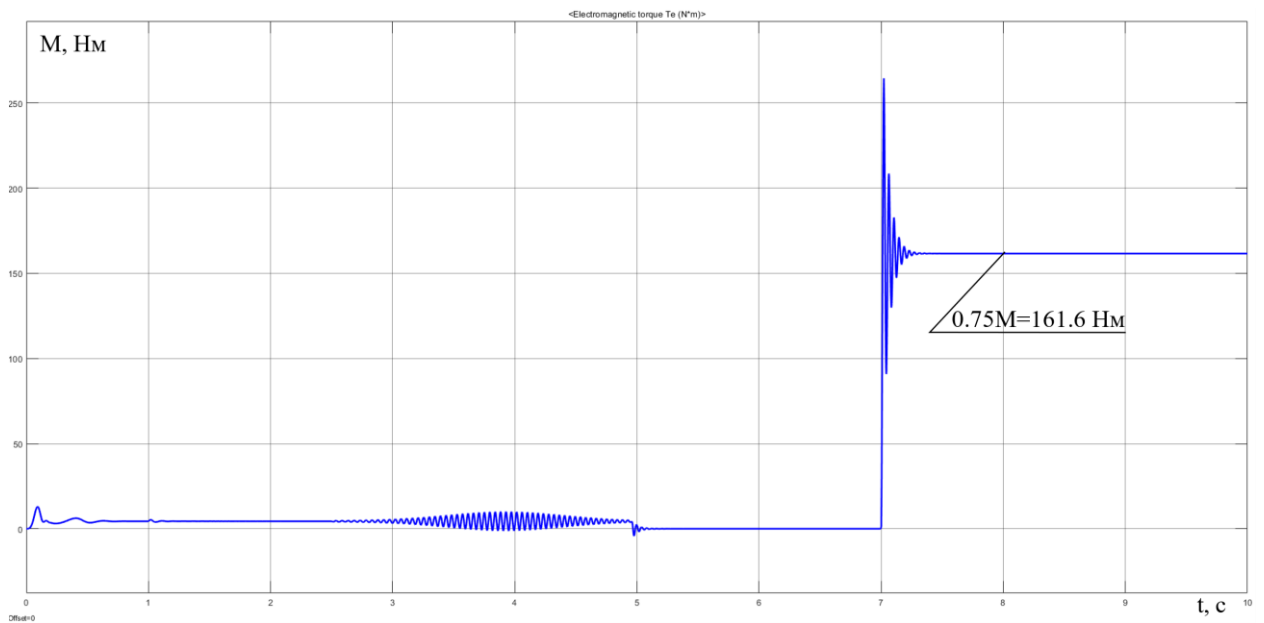


Рисунок 87 – переходный процесс электромагнитного момента АД при $k_M = 0,15$ и $k_c = 0,15$

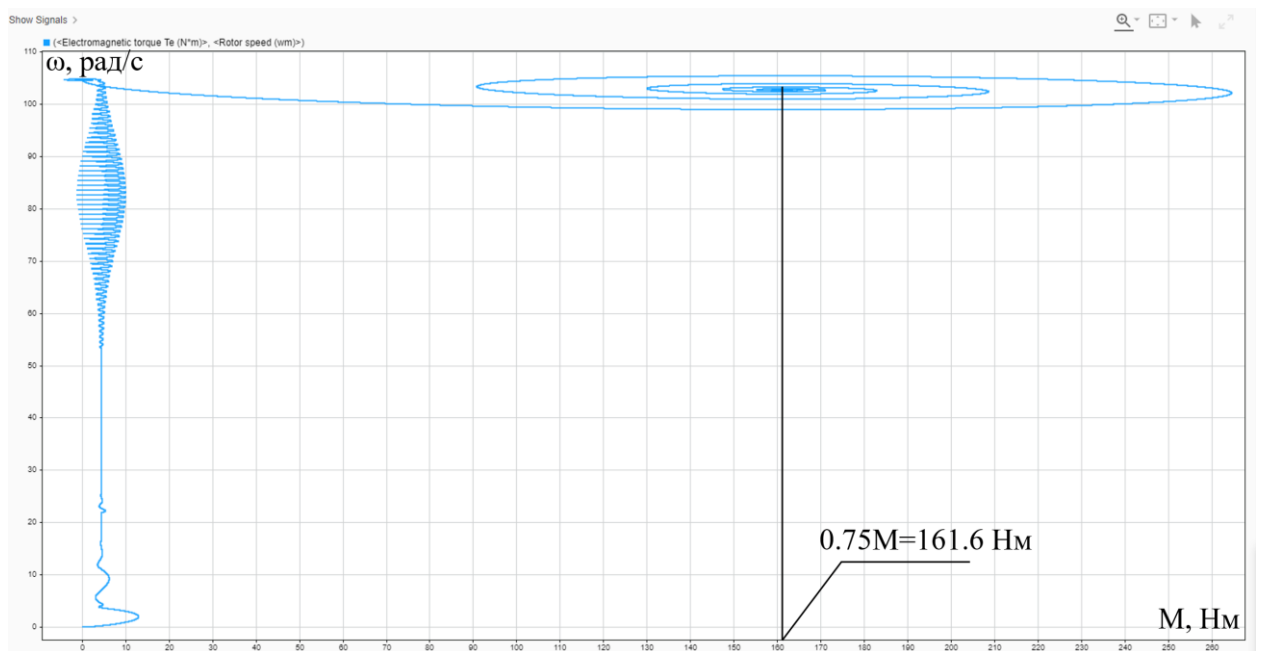


Рисунок 88 – Динамическая механическая характеристика АД при $k_M = 0,15$ и $k_c = 0,15$

4.1 Предпроектный анализ

4.1.1 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 регулирования скорости и качеству переходного процесса.

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 2.

Таблица 2 – Сегментирование коммерческих организаций

	Частотно-регулируемые асинхронные электропривода	Асинхронные электропривода с тиристорным преобразователем	Асинхронные электропривода с реостатным регулированием
Проектирование и производство			
Установка и пуско-наладка			
Обслуживание и ремонт			

Результаты сегментирования:

основными сегментами рынка являются все виды деятельности для электроприводов переменного тока;

предприятие по большей части должно быть ориентировано на сегменты рынка, связанные с проектированием и производством, установкой и пуско-наладкой электроприводов переменного тока;

наиболее привлекательными сегментами рынка являются отрасли, связанные с проектированием и производством, установкой и пуско-наладкой частотно-регулируемых электроприводов переменного тока.

4.1.2 Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

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

Критерии для сравнения и оценки ресурсоэффективности и ресурсосбережения, приведенные в таблице 2, подобраны, исходя из 92 выбранных объектов сравнения с учетом их технических и экономических особенностей разработки, создания и эксплуатации.

Таблица 3– Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		B_{ϕ}	$B_{\kappa 1}$	$B_{\kappa 2}$	B_{ϕ}	$B_{\kappa 1}$	$B_{\kappa 2}$
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
Повышение производительности пользователей	0,14	5	3	4	0,7	0,42	0,56
Удобство использования	0,07	5	4	4	0,35	0,28	0,28
Энергоэффективность	0,2	4	5	5	0,8	1	1

Надежность	0,12	5	3	4	0,6	0,36	0,48
Уровень шума	0,06	4	4	4	0,24	0,24	0,24
Безопасность	0,1	4	4	4	0,4	0,4	0,4
Экономические критерии оценки эффективности							
Конкурентоспособность продукта	0,09	4	3	2	0,36	0,27	0,18
Цена	0,12	4	5	4	0,48	0,6	0,48
Предполагаемый срокэксплуатации	0,1	5	3	4	0,5	0,3	0,4
Итого	1	40	34	35	4,43	3,87	4,02

Итоговый вес показателей должны составлять 1. Позиция разработки и конкурентов оценивается по каждому показателю по пятибалльной шкале, где 1 – наиболее слабая позиция, а 5 – наиболее сильная.

Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле:

$$K = \sum B_i \cdot B_i$$

где: K – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;

B_i – вес показателя (в долях единицы);

B_i – балл i-го показателя.

Основываясь на проведенном анализе конкурентов, можно сказать, что проект превосходит конкурентные исследования, что связано с точностью 93 привода и предполагаемым сроком эксплуатации. Однако конкурентоспособность у выбранных объектов достаточно высока.

4.1.3 FAST-анализ

Стадия 1.

В рамках магистерской диссертации в качестве объекта FAST-анализа

выступает проектируемый асинхронный двигатель электропривода для литцекрытильной машины.

Стадия 2.

Электропривод с асинхронным двигателем является самым массовым видом привода в промышленности, коммунальном и сельском хозяйстве. Такое положение определяется простотой изготовления и эксплуатации АД, их меньшими по сравнению с двигателями постоянного тока массой, габаритами и стоимостью, надёжностью в работе.

В асинхронных двигателях вращающееся магнитное поле создаётся трёхфазной системой при включении её в сеть переменного тока. Вращающееся магнитное поле статора пересекает проводники обмотки ротора и индуцирует в них электродвижущую силу (ЭДС). Если обмотка ротора замкнута на какое-либо сопротивление или накоротко, то в ней под действием индуцируемой э.д.с. проходит ток. В результате взаимодействия тока в обмотке ротора с вращающимся магнитным полем обмотки статора создаётся вращающий момент, под действием которого ротор начинает вращаться по направлению вращения магнитного поля. Для изменения направления вращения ротора необходимо поменять местами по отношению к зажимам сети любые два из трёх проводов, соединяющих обмотку статора с сетью (таблица 4)

Таблица 4 – Классификация функций, выполняемых объектом исследования

Наименование детали (узла, процесса)	Количество во деталей на узел	Выполняемая функция	Ранг функции		
			Главная	Основная	Вспомогательная
Статор	1	Корпус двигателя, она неподвижна, внутри неё имеются специальные	×		

		пазы (магнитопровод), куда пофазно уложены витки (секции) обмоток (статорная обмотка)			
Ротор	1	Вращается и несет на себе обмотку	×		
Обмотки статора	1	Образуют магнитную цепь асинхронного двигателя	×		
Магнитопровод ротора	1	Образуют магнитную цепь асинхронного двигателя	×		
Вал	1	Служит для передачи крутящего момента от двигателя на механическую нагрузку		×	
Коробка выводов	1	К ней подводятся выводы обмоток, также для подключения электропитания двигателя			×
Вентилятор	1	Для создания охлаждения двигателя, так как при своей работе асинхронный двигатель выделяет тепло			×

Стадия 3.

Для оценки значимости функции используем метод расстановки приоритетов, для этого построим матрицу смежности функций (таблица 5), где «<» – менее значимая; «=» – одинаковые функции по значимости; «>» – более значимая, и матрицу количественных соотношений функций (таблица 6), для которой 0,5 при «<»; 1,5 при «>»; 1 при «=».

Таблица 5 – Матрица смежности

	Функция 1	Функция 2	Функция 3	Функция 4	Функция 5	Функция 6	Функция 7

Функция 1	=	=	>	>	>	>	>
Функция 2	=	=	>	>	>	>	>
Функция 3	<	<	=	=	>	>	>
Функция 4	<	<	=	=	>	>	>
Функция 5	<	<	<	<	=	>	>
Функция 6	<	<	<	<	<	=	<
Функция 7	<	<	<	<	<	>	=

Таблица 6 – Матрица смежности

	Функция 1	Функция 2	Функция 3	Функция 4	Функция 5	Функция 6	Функция 7	итого
Функция 1	1	1	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	9,5
Функция 2	1	1	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	9,5
Функция 3	0,5	0,5	1	1	1,5	1,5	1,5	7,5
Функция 4	0,5	0,5	1	1	1,5	1,5	1,5	7,5
Функция 5	0,5	0,5	0,5	0,5	1	1,5	1,5	6
Функция 6	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1	0,5	4
Функция 7	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1,5	1	5

Стадия 4.

С помощью нормативного метода проведена оценка уровня затрат на выполнение каждой функции.

Таблица 7 – Определение стоимости функций, выполняемых объектом исследования

Наимен. детали	Кол-во дет. на узел	Выполняемая функция	Норма расхода, кг	Трудовое мк. дет., нормоч	Стоим. матла, руб	ЗП, руб.	Себестоим., руб.
Статор	1	Корпус двигателя, она неподвижна, внутри неё имеются специальные пазы (магнитопровод), куда пофазно уложены витки (секции) обмоток (статорная обмотка)	54	1,8	23	1219	1242
Ротор	1	Вращается и несет на себе обмотку	36	1,8	7	245	252
Обмотки статора	1	Образуют магнитную цепь асинхронного двигателя	16	1,8	341,5	5122	5464
Магнитопровод ротора	1	Образуют магнитную цепь асинхронного двигателя	175	1,6	65	11310	11375
Вал	1	Служит для передачи крутящего момента от двигателя на механическую нагрузку	54	3,2	23	1219	1242
Коробка выводов	1	К ней подводятся выводы обмоток, также для подключения электропитания двигателя	0,5	2,8	180	180	360
Вентилятор	1	Для создания охлаждения двигателя, так как при своей работе асинхронный двигатель выделяет тепло	0,5	1,2	200	180	380

Стадия 5

Суммирование затрат по каждой из функций определяет общую стоимость каждой из них и используется для построения функциональностоимостной диаграммы (ФСД), представленной на рисунке 89. Построенная ФСД позволяет выявить диспропорции между важностью функций и затратами на них.

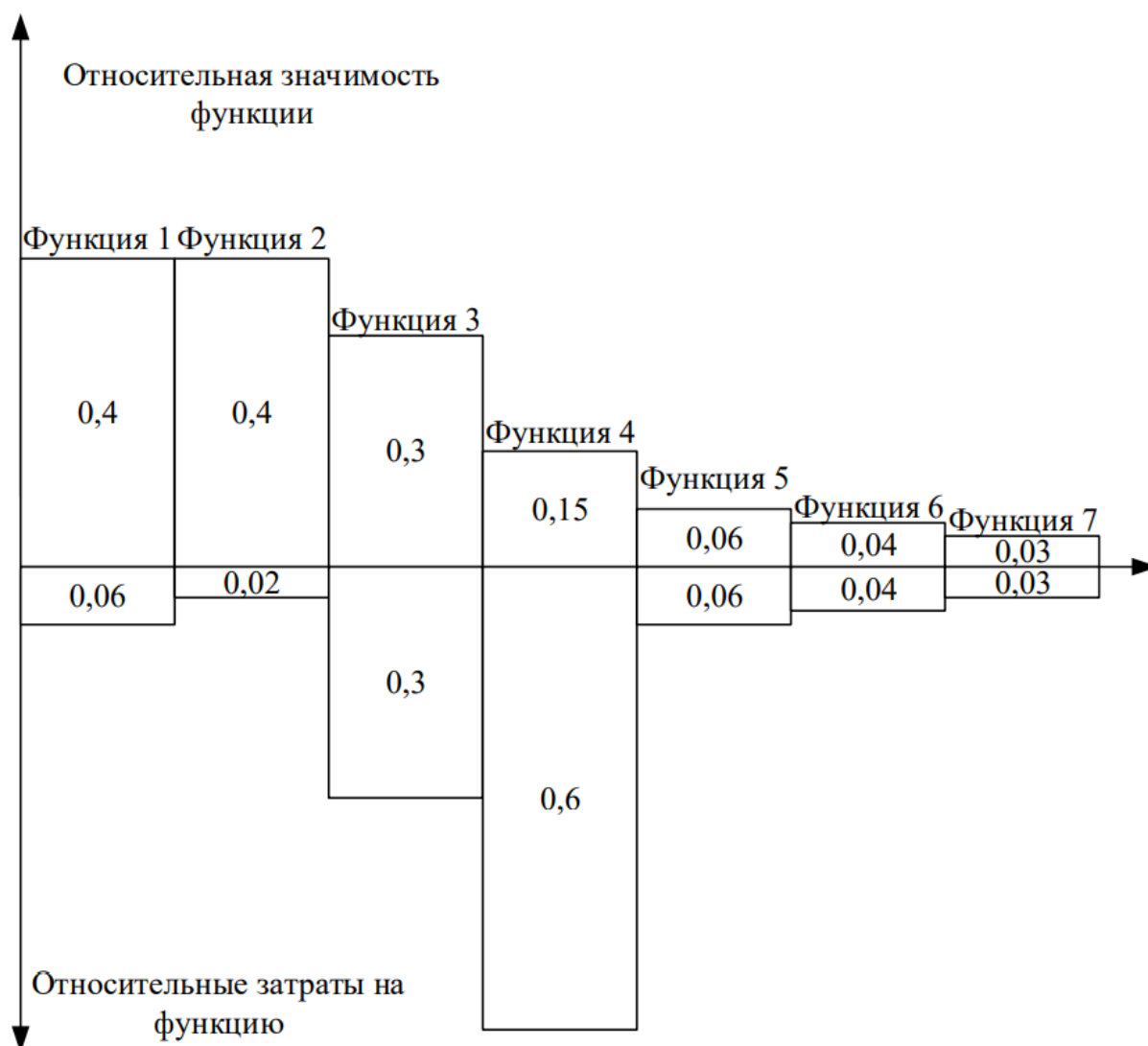


Рисунок 89 – Функционально-стоимостная диаграмма

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

проводится в 3 этапа.

Первый этап заключается в описании сильных и слабых сторон проекта, в выявлении возможностей и угроз для реализации проекта, которые проявились или могут появиться в его внешней среде (таблица 8).

Таблица 8 – Матрица SWOT

<p>Сильные стороны проекта: С1. Высокое качество питающего напряжения С2. Надежность технологии и аварийной сигнализации С3. Квалифицированный персонал</p>	<p>Слабые стороны: Сл1. Отсутствие у потенциальных потребителей квалифицированных кадров по работе с научной разработкой. Сл2. Аварийность Сл3. Высокая стоимость оборудования</p>
<p>Возможности: В1. Экономия электроэнергии за счет использования ПЧ В2. Повышение износостойкости электропривода В3. Повышение стоимости конкурентных систем</p>	<p>Угрозы: У1. Развитая конкуренция У2. Риск несвоевременной поставки оборудования У3. Введения дополнительных государственных требований к стандартизации и сертификации продукции У4. Отсутствие финансового обеспечения со стороны государства</p>

Второй этап – выявление соответствия сильных и слабых сторон научноисследовательского проекта внешним условиям окружающей среды, что поможет выявить степень необходимости проведения стратегических изменений.

Интерактивная матрица проекта представлена в таблице 9. Каждый фактор помечается либо знаком «+» (означает сильное соответствие сильных

сторон возможностям), либо знаком «-» (что означает слабое соответствие); «0» – если есть сомнения в том, что поставить «+» или «-».

Таблица 9 – Интерактивная матрица проекта

Сильные стороны проекта				
Возможности проекта		С1	С2	С3
	В1	+	+	+
	В2	-	+	+
	В3	+	-	-
Слабые стороны				
Возможности проекта		Сл1	Сл2	Сл3
	В1	-	-	+
	В2	-	-	-
	В3	-	-	+
Сильные стороны проекта				
Угрозы		С1	С2	С3
	У1	-	-	-
	У2	-	-	0
	У3	0	-	+
	У4	-	-	-
Слабые стороны проекта				
Угрозы		Сл1	Сл2	Сл3
	У1	-	-	-
	У2	0	-	-
	У3	0	+	-
	У4	-	0	-

В рамках третьего этапа составляется итоговая матрица SWOT-анализа, которая приведена в таблице 10.

Таблица 10 – SWOT-анализ

	<p>Сильные стороны проекта: С1. Высокое качество питающего напряжения С2. Надежность технологии и аварийной сигнализации С3. Квалифицированный персонал</p>	<p>Слабые стороны: Сл1. Отсутствие у потенциальных потребителей квалифицированных кадров по работе с научной разработкой. Сл2. Аварийность Сл3. Высокая стоимость оборудования</p>
<p>Возможности: В1. Экономия электроэнергии за счет использования ПЧ В2. Повышение износостойкости электропривода В3. Повышение стоимости конкурентных систем</p>	<p>Быстрое продвижение проекта возможно за счет улучшенной износостойкости электропривода</p>	<p>Отсутствие квалификационных кадров и потенциальных потребителей может усложнить процесс эксплуатации.</p>
<p>Угрозы: У1. Развитая конкуренция У2. Риск несвоевременной поставки оборудования У3. Введения дополнительных государственных требований к стандартизации и сертификации продукции У4. Отсутствие финансового обеспечения со стороны государства</p>	<p>Создание конкурентоспособного проекта.</p>	<p>Экономическая ситуация оказывает сильный эффект на процесс внедрения проекта.</p>

4.1.5 Оценка готовности проекта к коммерциализации

На какой бы стадии жизненного цикла не находилась научная разработка полезно оценить степень ее готовности к коммерциализации и выяснить уровень собственных знаний для ее проведения (или завершения).

Для этого заполнена специальную форму, содержащая показатели о степени проработанности проекта с позиции коммерциализации и компетенциям разработчика научного проекта (таблица 11).

При проведении анализа по таблице, по каждому показателю ставится оценка по пятибалльной шкале. При оценке степени проработанности научного проекта 1 балл означает не проработанность проекта, 2 балла – слабую проработанность, 3 балла – выполнено, но в качестве не уверен, 4 балла – выполнено качественно, 5 баллов – имеется положительное заключение независимого эксперта. Для оценки уровня имеющихся знаний у разработчика система баллов принимает следующий вид: 1 означает не знаком или мало знаю, 2 – в объеме теоретических знаний, 3 – знаю теорию и практические примеры применения, 4 – знаю теорию и самостоятельно выполняю, 5 – знаю теорию, выполняю и могу консультировать.

Таблица 11 – Оценка степени готовности проекта к коммерциализации

№ п/п	Наименование	Степень проработанности научного проекта	Уровень имеющихся знаний у разработчика
1	Определен имеющийся научно-технический задел	5	5
2	Определены перспективные направления коммерциализации научно-технического задела	3	3
3	Определены отрасли и технологии (товары, услуги) для предложения на рынке	2	3
4	Определена товарная форма научно-технического задела для представления на рынок	4	4
5	Определены авторы и осуществлена охрана их прав	5	5
67	Проведена оценка стоимости интеллектуальной собственности	5	5
8	Проведены маркетинговые исследования рынков сбыта	3	3

9	Разработан бизнес-план коммерциализации научной разработки	2	2
10	Определены пути продвижения научной разработки на рынок	2	2
11	Разработана стратегия (форма) реализации научной разработки	5	5
12	Проработаны вопросы международного сотрудничества и выхода на зарубежный рынок	2	2
13	Проработаны вопросы использования услуг инфраструктуры поддержки, получения льгот	4	4
14	Проработаны вопросы финансирования коммерциализации научной разработки	3	3
15	Имеется команда для коммерциализации научной разработки	5	5
16	Проработан механизм реализации научного проекта	5	5
	ИТОГО БАЛЛОВ	57	56

Оценка готовности научного проекта к коммерциализации (или уровень имеющихся знаний у разработчика) определяется по формуле:

$$B_{\text{сум}} = \sum B_i$$

где: $B_{\text{сум}}$ – суммарное количество баллов по каждому направлению;

B_i – балл по i -му показателю

Значение $B_{\text{сум}}$ позволяет оценить готовность научной разработки и ее разработчика к коммерциализации. В итоге получилось, что разработка является перспективной, а уровень имеющихся знаний у разработчика выше среднего.

Выявлены слабые стороны исследования, дальнейшего улучшения необходимо провести маркетинговые исследования рынков сбыта, разработать бизнес-план коммерциализации научной разработки и проработать вопросы международного сотрудничества и выхода на зарубежный рынок.

4.1.6 Методы коммерциализации результатов научнотехнического исследования

Для коммерциализации результатов, проведенного исследования будут использоваться следующие методы: инжиниринг и передача интеллектуальной собственности.

Инжиниринг будет предполагать предоставление на основе договора инжиниринга одной стороной, именуемой консультантом, другой стороне, именуемой заказчиком, комплекса или отдельных видов инженерно-технических услуг, связанных с проектированием, строительством и вводом объекта в эксплуатацию, с разработкой новых технологических процессов на предприятии заказчика.

Передача интеллектуальной собственности будет производиться в уставной капитал предприятия или государства.

Данные методы коммерциализации будут наиболее продуктивными в отношении данного проекта.

4.2 Инициация проекта

Группа процессов инициации состоит из процессов, которые выполняются для определения нового проекта или новой фазы существующего. В рамках процессов инициации определяются изначальные цели и содержание и фиксируются изначальные финансовые ресурсы. Определяются внутренние и внешние заинтересованные стороны проекта, которые будут взаимодействовать и влиять на общий результат научного проекта. Данная информация закрепляется в Уставе проекта (таблица 12).

Таблица 12 – Заинтересованные стороны проекта

Заинтересованные стороны проекта	Ожидания заинтересованных сторон
НИ ТПУ	Выпуск высококвалифицированных специалистов
АО «Сибкабель»	Имитационная модель электропривода литцекрытальной машины

В таблице 13 представлена иерархия целей проекта и критерии достижения целей.

Таблица 13 – Цели и результат проекта

Цели проекта:	Разработка электропривода литцекрытальной машины непрерывного действия, предназначенного для скрутки литцендрата
Ожидаемые результаты проекта:	Разработана система электропривода, выбраны подходящие элементы системы и полученные статические и динамические характеристики соответствуют необходимым
Критерии приемки результата проекта:	<p>Электропривод, соответствующий требованиям ТЗ:</p> <ul style="list-style-type: none"> • нормальная работа от промышленной сети частотой 50 Гц и переменным напряжением 380 В. Максимальное отклонение напряжения питающей сети +10% -15%; • работа электродвигателя в первом квадранте, • диапазон регулирования скорости не менее 1:10; • время разгона до рабочей скорости не менее 5с; • погрешность скорости при изменении нагрузки не более 2%;
Требования к результату проекта:	Определены основные электромагнитные соотношения для двигателя электропривода

	Полученные механические и электромеханические характеристики разомкнутой системы соответствуют ТЗ
	Проведено имитационное моделирование привода в среде MatlabSimulink
	Подобраны элементы системы и сняты статических и динамических характеристик полученной системы

В таблице 14 представлена организационная структура проекта (роль каждого участника, их функции, трудозатраты).

Таблица 14 – Рабочая группа проекта

№ п/п	ФИО, основное место работы, должность	Роль в проекте	Функции	Трудозатраты, дни.
1.	Шилин А.А. НИ ТПУ, профессор ИШЭ	Руководитель проекта	Консультирование, координация деятельности, определение задач, контроль выполнения.	9
2.	Анохин А.С, магистрант ИШЭ	Исполнитель по проекту	Анализ литературных источников, проведение расчета, моделирования, анализ лабораторных данных, написание работы	100
Итого				109

Ограничения проекта – это все факторы, которые могут послужить ограничением степени свободы участников команды проекта, а также «границы проекта» – параметры проекта или его продукта, которые не будут реализованных в рамках данного проекта (таблица 14).

Таблица 15 – Ограничения проекта

фактор	Ограничения/ допущения
--------	------------------------

Бюджет проекта	1471650
Источник финансирования	НИ ТПУ
Сроки проекта:	01.09.2022-31.05.2023
Дата утверждения плана управления проектом	15.09.2022
Дата завершения проекта	12.06.2023

4.3 Планирование управления научно-техническим проектом

Группа процессов планирования состоит из процессов, осуществляемых для определения общего содержания работ, уточнения целей и разработки последовательности действий, требуемых для достижения данных целей.

План управления научным проектом должен включать в себя следующие элементы:

- иерархическая структура работ проекта;
- контрольные события проекта;
- план проекта;
- бюджет научного исследования.

Иерархическая структура работ проекта

Иерархическая структура работ (ИСР) – детализация укрупненной структуры работ. В процессе создания ИСР структурируется и определяется содержание всего проекта (рисунок 2).

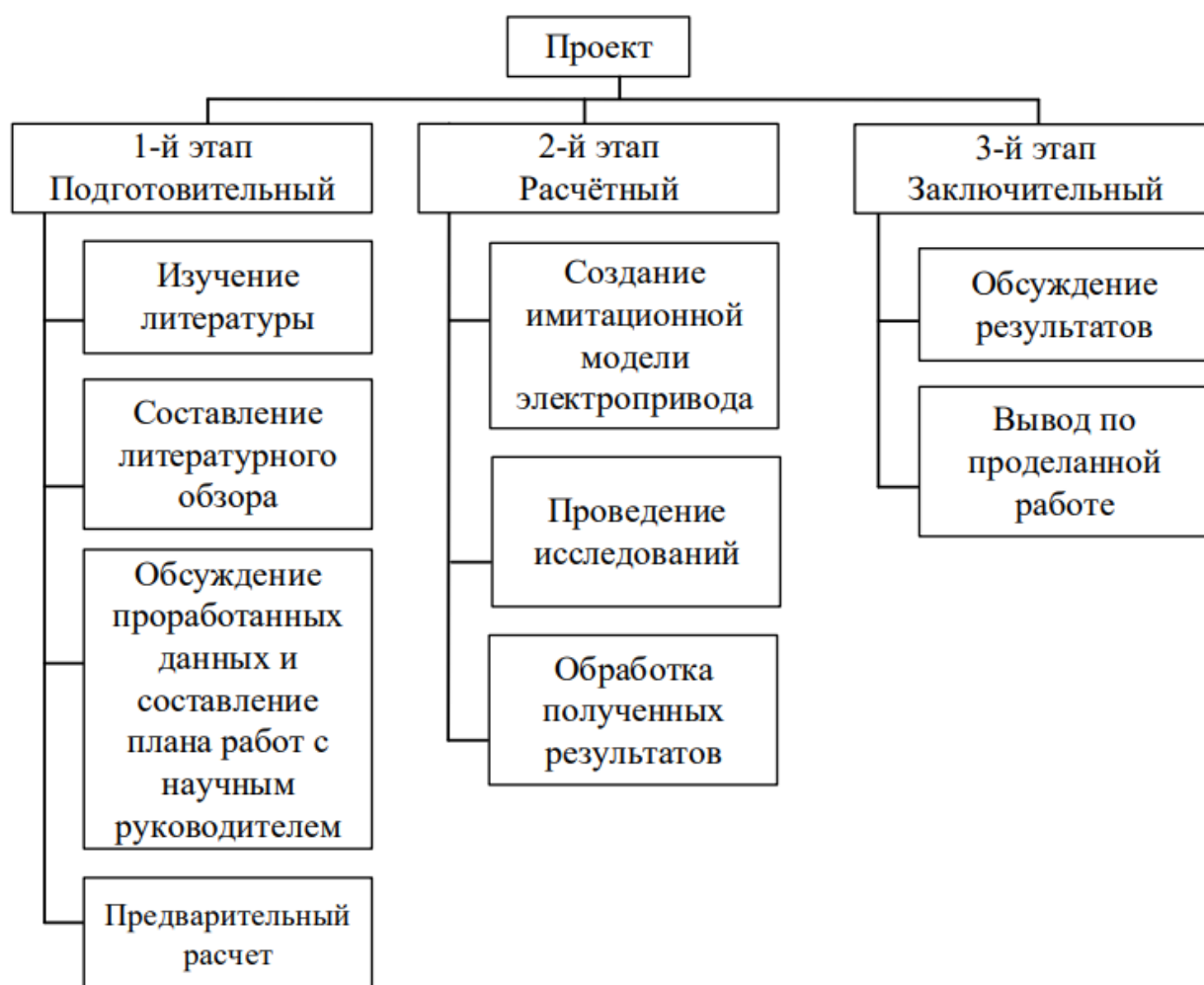


Рисунок 90 – Иерархическая структура работ

4.3.1 План проект

Планирование комплекса предполагаемых работ осуществляется в следующем порядке:

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

Для выполнения проектирования формируется рабочая группа, в состав которой входят научный руководитель и инженер. На каждый вид запланированных работ установлена соответствующая должность исполнителя.

Номерам этапов соответствуют следующие виды выполняемых работ, представленных в таблице 16.

Таблица 16 – Календарный план проекта

Код работ (из ИСР)	Название	Длительность, дни	Дата начала работ	Дата окончания работ	Состав участников (ФИО ответственных исполнителей)
1	Составление и утверждение технического задания	2	16.01.23	17.01.23	Шилин А.А, Анохин А.С.
2	Разработка календарного плана	2	18.02.23	18.02.23	Шилин А.А, Анохин А.С..
3	Изучение литературных и патентных источников	15	20.01.23	03.02.23	Анохин А.С.
4	Постановка задач исследования	2	04.02.23	05.02.23	Шилин А.А.
5	Информационный или литературный обзор	10	06.02.23	15.02.23	Анохин А.С.
6	Технический расчет	8	16.02.23	23.02.23	Анохин А.С.
7	Построение основных характеристик	2	24.02.23	25.02.23	Анохин А.С.
8	Выбор оборудования	3	27.02.23	01.03.23	Шилин А.А, Анохин А.С..
9	Имитационное моделирование системы в среде MatLab Simulink	20	02.03.23	21.03.23	Анохин А.С.

10	Снятие переходных процессов	5	22.03.23	26.03.23	Анохин А.С.
11	Разработка технической документации	10	01.04.23	10.04.23	Анохин А.С.
12	Оценка экономической эффективности исследуемой технологии	10	11.04.23	20.04.23	Анохин А.С.
13	Рассмотрение вопросов социальной ответственности	6	22.04.23	27.04.23	Анохин А.С.
14	Оформление пояснительной записки	7	10.05.23	16.05.23	Анохин А.С.

Продолжительность выполнения проекта составит 100 рабочих дней.

Из них:

9 дней – продолжительность выполнения работ руководителем;

100 дней – продолжительность выполнения работ инженером.

Наиболее удобным и наглядным в данном случае является построение ленточного графика проведения технических работ в форме диаграммы Ганта.

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

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

Таблица 17 – Календарный план график проведения НИОКР по теме

Код работы (из ИСР)	Вид работ	Исполнители	Тк, кален. дни	Продолжительность выполнения работ														
				Январь			Февраль			Март			Апрель			Май		
				1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель, Инженер	2 2		■													
2	Разработка календарного плана	Руководитель, Инженер	2 2		■													
3	Изучение литературных и патентных источников	Инженер	15			■												
4	Постановка задач исследования	Руководитель	2				■											
5	Информационный и литературный обзор	Инженер	10				■	■										
6	Технический расчет	Инженер	8					■	■									
7	Построение основных характеристик	Инженер	2															
8	Выбор оборудования	Руководитель, Инженер	3 3															
9	Имитационное моделирование системы в среде MATLAB Simulink	Инженер	20															
10	Снятие переходных процессов	Инженер	5															
11	Разработка технической документации	Инженер	10															
12	Оценка экономической эффективности исследуемой технологии	Инженер	10															
13	Рассмотрение вопросов социальной ответственности	Инженер	6															
14	Оформление пояснительной записки	Инженер	7															

4.4 Бюджет научного исследования

При планировании бюджета научного исследования должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов планируемых расходов, необходимых для его выполнения. Смета затрат включает в себя следующие статьи:

- Специальное оборудование
- Заработную плату исполнителей технического проекта
- Отчисления во внебюджетные фонды
- Накладные расходы

В настоящую смету включается основная и дополнительная заработные платы научных и инженерно-технических работников, отчисления во внебюджетные фонды, материальные и накладные расходы.

Специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ. В данную статью включены все затраты, связанные с приобретением специального оборудования, необходимого для проведения работ по теме НИР (таблица 18).

Таблица 18 – Расчет затрат по статье «Спецоборудование для научных работ»

№ п/п	Наименование оборудования	Кол-во единиц оборудования	Цена единицы оборудования, руб.	Общая стоимость оборудования, руб.
1	Компьютер (MSI)	1	43 000,0	43 000,0
2	Программное обеспечение MicrosoftOffice	1	5 990,0	5 990,0
3	MathCad	1	7818	7818
4	Matlab Simulink (student version)	1	0	0
Итого, руб.:				56808

4.4.1 Основная заработная плата

Величина расходов по заработной плате определяется исходя из трудоемкости выполняемых работ и действующей системы окладов и тарифных ставок. В состав основной заработной платы включается премия, выплачиваемая ежемесячно из фонда заработной платы в размере 20 –30 % от тарифа или оклада. Расчет основной заработной платы сводится в таблице 27.

Статья включает основную заработную плату работников, непосредственно занятых выполнением НТИ, (включая премии, доплаты) и дополнительную заработную плату: $Z_{зн} = Z_{осн} + Z_{доп}$

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

$Z_{доп}$ – дополнительная заработная плата (12-15 % от $Z_{осн}$).

Величина расходов по основной заработной плате определяется исходя из трудоемкости выполняемых работ и действующей системы окладов и тарифных ставок: $Z_{осн} = Z_{он} + T_p$

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{он} = \frac{Z_m + Z_d + Z_{рк}}{F_d}$$

где Z_m – месячный должностной оклад работника, руб.;

Z_d – доплата за руководство расчетнопроектирования;

$Z_{рк}$ – доплата с учетом районного коэффициента Крк;

Крк равный 1,3 (для Томска).

F_d – фонд рабочего времени персонала, раб.дн.

Таблица 19 – Расчёт основной и дополнительной заработной платы

Исполнители	Зт, руб	Здоп, руб	Зрк, руб	Зм, руб	Здн, руб	Тр, дн	Зосн, руб	Здоп, руб
Руководитель	35540	710,8	10875,24 4	47126,04	2489,5	212	527771,8	79165,8
Исполнитель	14560		4368	18928	999,9	212	211977,6	31796,6

4.4.2 Отчисления во внебюджетные фонды

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

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы: $Z_{внеб} = k_{внеб} \cdot (Z_{осн} + Z_{доп})$

где $k_{внеб}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды – 30,2%.

$$Z_{внеб} = 0,302 \cdot 606937,6 = 183295,2 \text{ руб.}$$

4.4.3 Накладные расходы

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

$$C_{накл} = k_{накл} \cdot (Z_{осн} + Z_{доп}) = 0,1 \cdot (739749,4 + 110962) = 85071,18$$

где – $k_{накл}$ коэффициент накладных расходов принят 0,1.

4.4.4. Формирование бюджета затрат научноисследовательского проекта

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

Определение бюджета затрат на научно-исследовательский проект по каждому варианту исполнения приведен в таблице 20.

Таблица 20 – Расчет бюджета затрат НИИ

Наименование статьи	Сумма, руб.	Структура затрат, %
Специальное оборудование	56808	4,83
Основная заработная плата	739749,4	62,91
Дополнительная заработная плата	110962,41	9,44
Отчисления во внебюджетные фонды	183295,15	15,59
Накладные расходы	85071,18	7,23
Бюджет затрат НИИ	1175886,17	100

Исходя из представленной выше таблицы, можно сделать вывод, что общие затраты на реализацию технического проекта составят 1175886,17 рублей, из которых большую часть (62,91%) составят затраты по заработной плате исполнителей проекта и накладные расходы (15,59%).

4.5 Организационная структура проекта

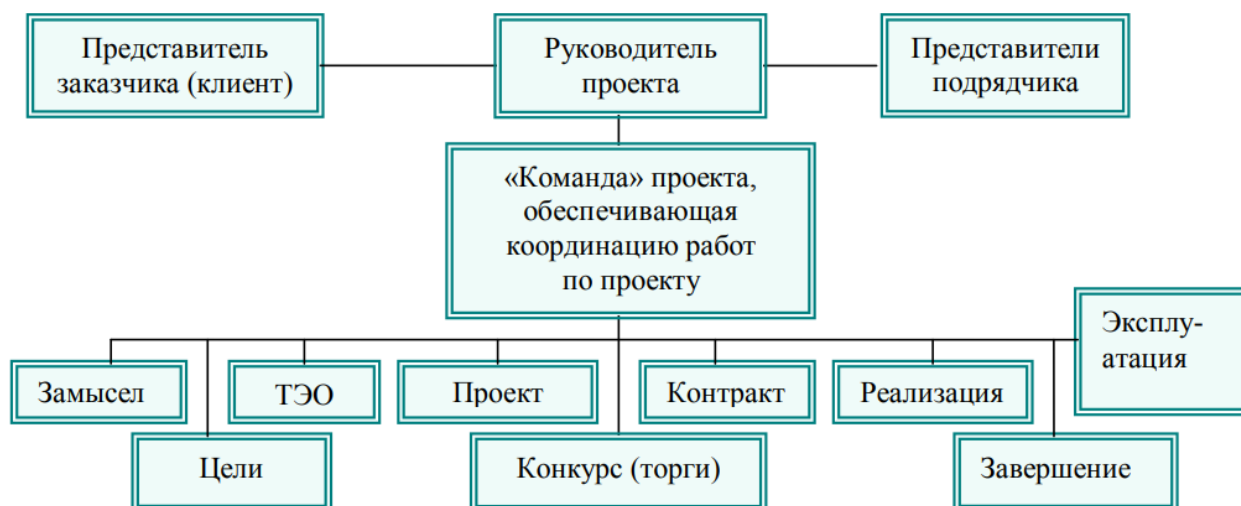


Рисунок 91 – Проектная организационная структура проекта

4.5.1 План управления коммуникациями проекта

План управления коммуникациями отражает требования к коммуникациям со стороны участников проекта (таблица 21).

Таблица 21 – План управления коммуникациями

Какая информация передается	Кто передает информацию	Кому передается информация	Когда передается информацию
Статус проекта	Исполнитель	Руководителю	Еженедельно (понедельник)
Обмен информацией о текущем состоянии проекта	Исполнитель	Руководителю	Ежемесячно (конец месяца)
Документы и информация по проекту	Исполнитель	Руководителю	Не позже сроков графиков и к. точек
О выполнении контрольной точки	Исполнитель	Руководителю	Не позже дня контрольного события по плану управления

5.5.2 Реестр рисков проекта

Идентифицированные риски проекта включают в себя возможные неопределенные события, которые могут возникнуть в проекте и вызвать последствия, которые повлекут за собой нежелательные эффекты.

Информация по возможным рискам сведена в таблицу 22

Таблица 22 – Реестр рисков

№	Риск	Вероятность наступления	Влияние риска	Уровень риска	Способы смягчения риска	Условия наступления
1	Неточность метода анализа	2	5	Низкий	Внешний и внутренние анализы	Низкая точность метода анализа
2	Погрешность расчетов	3	5	Средний	Пересчет, проверка	Невнимательность
3	Отсутствие интереса к результатам исследования	2	5	Низкий	Привлечение предприятий, публикация результатов	Отсутствие результатов исследования

4.6 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности

4.6.1 Оценка абсолютной эффективности исследования

- чистая текущая стоимость (NPV);
- индекс доходности (PI);
- внутренняя ставка доходности (IRR);
- срок окупаемости (DPP).

Чистая текущая стоимость (NPV) – это показатель экономической эффективности инвестиционного проекта, который рассчитывается путём дисконтирования (приведения к текущей стоимости, т.е. на момент

инвестирования) ожидаемых денежных потоков (как доходов, так и расходов).

Расчёт NPV осуществляется по следующей формуле:

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{ЧДП_{on_t}}{(1+i)^t} - I_0$$

где: $ЧДП_{on_t}$ – чистые денежные поступления от операционной деятельности;

I_0 – разовые инвестиции, осуществляемые в нулевом году;

t – номер шага расчета ($t= 0, 1, 2 \dots n$)

n – горизонт расчета;

i – ставка дисконтирования (желаемый уровень доходности инвестируемых средств).

Расчёт NPV позволяет судить о целесообразности инвестирования денежных средств. Если $NPV > 0$, то проект оказывается эффективным.

Расчет чистой текущей стоимости представлен в таблице 23. При расчете рентабельность проекта составляла 20-25 %, норма амортизации- 10 %.

Таблица 23 – Расчет чистой текущей стоимости по проекту в целом

№	Наименование показателей	Шаг расчета				
		0	1	2	3	4
1	Выручка от реализации, руб.	0	1446340,0	1446340,0	1446340,0	1446340,0
2	Итого приток, руб.	0	1446340,0	1446340,0	1446340,0	1446340,0
3	Инвестиционные издержки, руб.	1175886	0	0	0	0
4	Операционные затраты, руб. (35% от бюджета)	0	352765,8	352765,8	352765,8	352765,8
5	Налогооблагаемая прибыль(1-4)	0	1093574,1	1093574,1	1093574,1	1093574,1
6	Налоги 20 %, руб.(5*20%)	0	218714,8	218714,8	218714,8	218714,8

7	Чистая прибыль, руб.(5- 6)	0	874859,3	874859,3	874859,3	874859,3
8	Чистый денежный поток (ЧДП), руб.(чистая прибыль + амортизация)	-1175886	992447,9	992447,9	992447,9	992447,9
9	Коэффициент дисконтирования при $i=23\%$ (КД)	1	0,813	0,661	0,537	0,437
10	Чистый дисконтированный денежный поток (ЧДД), руб.(9*10)	-1175886	806868,2	655990,4	533325,6	433598,0
11	$\sum ЧДД$	2429782,2 руб.				
12	Итого NPV, руб.	1253896,1 руб				

Таким образом, чистая текущая стоимость по проекту в целом составляет 1253896,1 рублей, что позволяет судить об его эффективности.

Индекс доходности(PI) – показатель эффективности инвестиции, представляющий собой отношение дисконтированных доходов к размеру инвестиционного капитала. Данный показатель позволяет определить инвестиционную эффективность вложений в данный проект. Индекс доходности рассчитывается по формуле:

$$PI = \sum_{t=1}^n \frac{ЧДП_t}{(1+i)^t} / I_0 = 2 > 1$$

где: ЧДД - чистый денежный поток, руб.;

I_0 – начальный инвестиционный капитал, руб.

Таким образом, проект является эффективным.

Внутренняя ставка доходности (IRR). Значение ставки, при которой обращается в нуль, носит название «внутренней ставки доходности» или IRR. Формальное определение «внутренней ставки доходности» заключается в том, что это та ставка дисконтирования, при которой суммы дисконтированных

притоков денежных средств равны сумме дисконтированных оттоков или $=0$. По разности между IRR и ставкой дисконтирования i можно судить о запасе экономической прочности инвестиционного проекта. Чем ближе IRR к ставке дисконтирования i , тем больше риск от инвестирования в данный проект.

Между чистой текущей стоимостью (NPV) и ставкой дисконтирования (i) существует обратная зависимость. Эта зависимость представлена в таблице 24 и на рисунке 92.

Таблица 24 – Зависимость NPV от ставки дисконтирования

№	Наименование показателя	0	1	2	3	4	NPV, руб.
1	Чистые денежные потоки, руб.	- 1175886	992447,9	992447,92	992447,92	992447,92	
2	Коэффициент дисконтирования						
	0,1	1	0,909	0,826	0,751	0,683	
	0,2	1	0,833	0,694	0,578	0,482	
	0,3	1	0,769	0,592	0,455	0,350	
	0,4	1	0,714	0,510	0,364	0,260	
	0,5	1	0,667	0,444	0,295	0,198	
	0,6	1	0,625	0,390	0,244	0,153	
	0,7	1	0,588	0,335	0,203	0,112	
	0,8	1	0,556	0,309	0,171	0,095	
	0,9	1	0,526	0,277	0,146	0,077	
	1	1	0,500	0,250	0,125	0,062	
3	Дисконтированный денежный поток, руб.						
	0,1	248112,0	248112,0	248112,0	745328,4	677841,9	1969181,3
	0,2	248112,0	248112,0	248112,0	573634,9	478359,9	1391576,6
	0,3	248112,0	248112,0	248112,0	451563,8	347356,8	973756,0
	0,4	248112,0	248112,0	248112,0	361251,0	258036,5	658157,6
	0,5	248112,0	248112,0	248112,0	292772,1	196504,7	416000,3
	0,6	248112,0	248112,0	248112,0	242157,3	151844,5	225450,3

0,7	248112,0	248112,0	248112,0	201466,9	111154,2	52764,4
0,8	248112,0	248112,0	248112,0	169708,6	94282,6	-53427,6
0,9	248112,0	248112,0	248112,0	144897,4	76418,5	-157634,6
1	248112,0	248112,0	248112,0	124056,0	61531,8	-245962,5

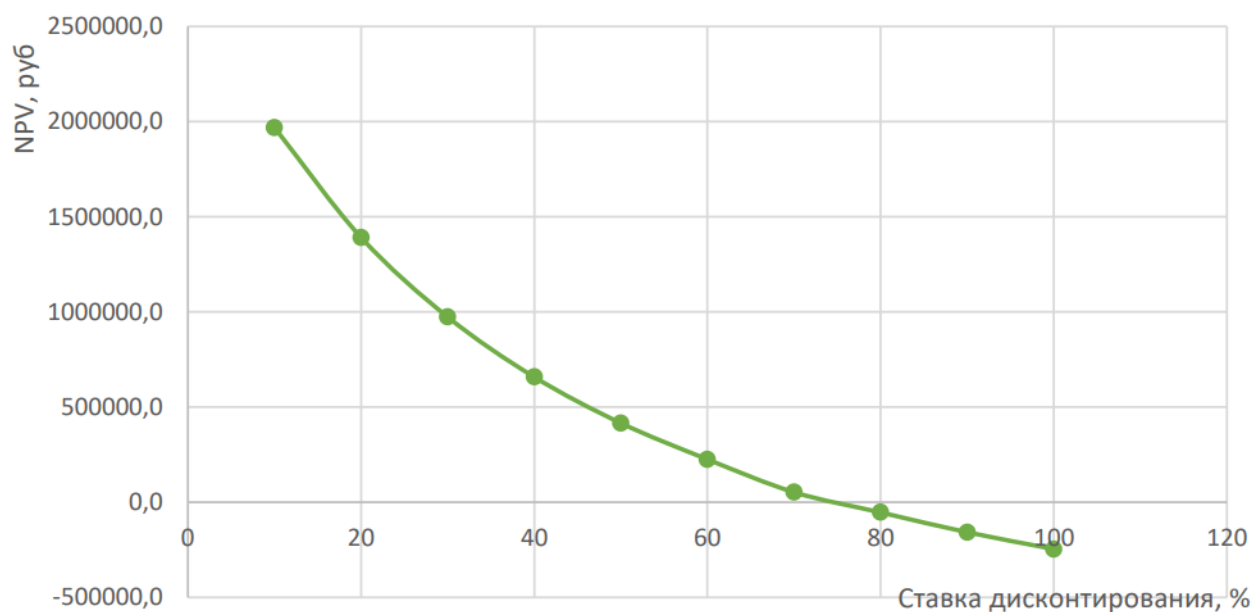


Рисунок 92 – Зависимость NPV от ставки дисконтирования

Из таблицы и графика следует, что по мере роста ставки дисконтирования чистая текущая стоимость уменьшается, становясь отрицательной. Значение ставки, при которой NPV обращается в нуль, носит название «внутренней ставки доходности» или «внутренней нормы прибыли». Из графика получаем, что IRR составляет 0,74.

$IRR > i$, проект эффективен.

Запас экономической прочности проекта: $74\% - 23\% = 51\%$

Дисконтированный срок окупаемости. Как отмечалось ранее, одним из недостатков показателя простого срока окупаемости является игнорирование в процессе его расчета разной ценности денег во времени. Этот недостаток

устраняется путем определения дисконтированного срока окупаемости. То есть это время, за которое денежные средства должны совершить оборот.

Наиболее приемлемым методом установления дисконтированного срока окупаемости является расчет кумулятивного (нарастающим итогом) денежного потока (таблица 25).

Таблица 25 – Дисконтированный срок окупаемости

№	Наименование показателя	Шаг расчета				
		0	1	2	3	4
1	Дисконтированный чистый денежный поток ($i=0,23$), руб.	- 1175886	806868,2	655990,4	533325,6	433598,0
2	То же нарастающим итогом, руб.	- 1175886	- 369017,9	286972,5	820298,1	1253896,1
3	Дисконтированный срок окупаемости	$DPP_{ДСК} = 1 + (369017,9 / 655990,4) = 1,56 \text{ года}$				

Социальная эффективность научного проекта учитывает социальноэкономические последствия осуществления научного проекта для общества в целом или отдельных категорий населения или групп лиц, в том числе как непосредственные результаты проекта, так и «внешние» результаты в смежных секторах экономики: социальные, экологические и иные внеэкономические эффекты (таблица 26).

Таблица 26 – Критерии социальной эффективности

ДО	ПОСЛЕ
Отсутствие имитационной модели электропривода	Создана имитационная модель, позволяющая получить необходимые переходные процессы и оценить их параметры: время переходного процесса, перерегулирование.

<p>Управление существующей схемой организовано на скалярном законе управления без компенсации момента и без компенсации скольжения</p>	<p>Управление существующей схемой организовано на скалярном законе управления с компенсацией момента и скольжения для повышения качества динамических характеристик асинхронного двигателя</p>
--	--

4.6.2 Оценка сравнительной эффективности исследования

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

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

Интегральный финансовый показатель разработки определяется по следующей формуле:

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

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

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

Φ_{max} – максимальная стоимость исполнения научноисследовательского проекта (в т.ч. аналоги). Полученная величина интегрального финансового показателя разработки отражает соответствующее численное увеличение

бюджета затрат разработки в размах (значение больше единицы), либо соответствующее численное удешевление стоимости разработки в размах (значение меньше единицы, но больше нуля).

Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов исполнения объекта исследования можно определить по следующей формуле:

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

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

a_i – весовой коэффициент i -го варианта исполнения разработки;

b_i – балльная оценка i -го варианта исполнения разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания.

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности приведен в форме таблицы (таблице 27).

Таблица 27 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

По критерии	Весовой коэффициент параметра	Текущий проект	Аналог 1	Аналог 2
Выход продукта	0,1	5	3	4
Удобство в эксплуатации	0,15	5	4	4
Надежность	0,15	5	3	4
Безопасность	0,2	4	4	4
Повышение производительности	0,25	5	3	4
Энергоэффективность	0,15	4	5	5
Итого	1	28	22	25

$$I_m^p = 5 \cdot 0,1 + 5 \cdot 0,15 + 5 \cdot 0,15 + 4 \cdot 0,2 + 5 \cdot 0,25 + 4 \cdot 0,15 = 4,65$$

$$I_1^A = 3 \cdot 0,1 + 4 \cdot 0,15 + 3 \cdot 0,15 + 4 \cdot 0,2 + 3 \cdot 0,25 + 4 \cdot 0,15 = 3,65$$

$$I_2^A = 4 \cdot 0,1 + 4 \cdot 0,15 + 4 \cdot 0,15 + 4 \cdot 0,2 + 5 \cdot 0,25 + 5 \cdot 0,15 = 4,15$$

Интегральный показатель эффективности разработки $I_{финр}^p$ и аналога $I_{финр}^a$ определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

$$I_{финр}^p = \frac{I_m^p}{I_\phi^p}; I_{финр}^a = \frac{I_m^a}{I_\phi^a}$$

Сравнение интегрального показателя эффективности текущего проекта и аналогов позволит определить сравнительную эффективность проекта. Сравнительная эффективность проекта определяется по формуле:

$$\mathcal{E}_{cp} = \frac{I_{финр}^p}{I_{финр}^a}$$

где: \mathcal{E}_{cp} – сравнительная эффективность проекта;

$I_{финр}^p$ – интегральный показатель разработки;

$I_{финр}^a$ – интегральный технико-экономический показатель аналога.

Сравнительная эффективность разработки по сравнению с аналогами представлена в таблице 28.

Таблица 28 – Сравнительная эффективность разработки

№ п/п	Показатели	Разработк а	Аналог 1	Аналог 2
1	Интегральный финансовый показатель разработки	0,16	0,2	0,14
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4,65	4,35	3,80
3	Интегральный показатель эффективности	29,06	21,75	27,14
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1,00	0,80	1,14

Выводы: Сравнение значений интегральных показателей эффективности позволяет понять, что разработанный вариант проведения проекта является наиболее эффективным при решении поставленной в магистерской диссертации технической задачи с позиции финансовой и ресурсной эффективности.

В ходе выполнения раздела финансового менеджмента определена чистая текущая стоимость, (NPV), равная 1253896 руб; индекс доходности $PI=2$, внутренняя ставка доходности $IRR=74\%$, срок окупаемости $PP_{дск} = 1,56$ года.

Таким образом, в работе представлен ресурсоэффективный проект с высоким запасом финансовой прочности и достаточно коротким сроком окупаемости.

5 СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ

Введение

Данный раздел ВКР посвящён характеристике проектных решений, производственных процессов и оборудования, анализу опасных и вредных факторов при данном виде производственной деятельности и решению вопросов безопасности на основе требований действующих нормативно технических документов.

Объектом исследования является литцекрытильная машина. Предметом исследования является проектирование электропривода литцекрытильной машины. Целью работы является разработка электропривода, предназначенного для скрутки литцендрата согласно требованию технического задания, математическое моделирование и исследование при помощи различных программных средств. Областью применения являются Предприятия кабельной промышленности. Потенциальным пользователем разрабатываемого решения является предприятие АО Сибкабель город Томск. Актуальность работы заключается в отказе от использования устаревших методов управления асинхронным двигателем литцекрытильной машины.

Эксплуатация привода литцекрытильной машины производится в производственном помещении 54x24 м, поэтому целесообразно рассмотреть безопасность труда при работе стоя. Рабочими процессами, связанными с объектом исследования, осуществляющимися в рабочей зоне, являются запуск электродвигателя, настройка электропривода в соответствии с необходимыми параметрами работы литцекрытильной машины. Количество и наименование оборудования рабочей зоны: Литцекрытильная машина, ПК, отдающее устройство, приемное устройство

5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

Согласно ТК РФ, Статья 219 [13] право работника на труд в условиях, отвечающих требованиям охраны труда – каждый работник имеет право на:

рабочее место, соответствующее требованиям охраны труда;

обязательное социальное страхование от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний в соответствии с федеральным законом;

– отказ от выполнения работ в случае возникновения опасности для его жизни и здоровья вследствие нарушения требований охраны труда, за исключением случаев, предусмотренных федеральными законами, до устранения такой опасности;

– обеспечение средствами индивидуальной и коллективной защиты в соответствии с требованиями охраны труда за счет средств работодателя;

– обучение безопасным методам и приемам труда за счет средств работодателя;

– гарантии и компенсации, установленные в соответствии с настоящим Кодексом, коллективным договором, соглашением, локальным нормативным актом, трудовым договором, если он занят на работах с вредными и (или) опасными условиями труда.

Трудовые и экономические отношения между работником (слесарь-механик, обслуживающий работу привода) и организацией регулируются в Трудовом кодексе Российской Федерации. [13] Режим рабочего времени регулируется согласно ст. 91 ТК РФ и не должен превышать 40 ч в рабочую неделю. Согласно ст. 115 ТК РФ каждый работник имеет право на ежегодный оплачиваемый отпуск продолжительностью 28 календарных дней. Порядок начисления и определения заработной платы регламентируется ст. 130 ТК РФ. Размер заработной платы не должен быть ниже минимального размера оплаты труда для Томской области. Обязательное социальное страхование от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний в

соответствии с федеральным законом. Обеспечение средствами индивидуальной и коллективной защиты в соответствии с требованиями охраны труда за счет средств работодателя.

Работа с электроприводом предполагается стоя, что подразумевает возможное наличие угроз жизни и здоровья, следует обеспечить комфортную и безопасную среду для работника согласно ГОСТ 12.2.033–78 «Система стандартов безопасности труда. Рабочее место при выполнении работ стоя» 125 [14], а также организовать режим труда и отдыха согласно методическим рекомендациям [15] и [16]. Согласно ТИ-093-2002 [17], администрация предприятия должна обеспечивать оператора крутильного оборудования средствами индивидуальной защиты в соответствии с действующими отраслевыми нормами бесплатной выдачи специальной одежды, специальной обуви и других средств индивидуальной защиты.

Поверхность пола в рабочем помещении должна быть ровной, без выбоин, нескользкой, удобной для очистки и влажной уборки, обладать антистатическими свойствами. В помещении должны находиться аптечка первой медицинской помощи.

5.2 Производственная безопасность

5.2.1 Анализ опасных и вредных факторов на рабочем месте

Обеспечение безопасности труда обязательно на любом предприятии, важно создать такие условия труда для работников, при которых риски вреда здоровью и будут сведены к минимуму. Проведем анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть при работе в цеху (таблица 29). Воспользуемся ГОСТ 12.0.003–2015 «Опасные и вредные производственные факторы. Классификация» [18] для идентификации потенциальных факторов.

Таблица 29 - Возможные опасные и вредные производственные факторы на рабочем месте оператора крутильной машины

Факторы (ГОСТ 12.0.003–2015)	Нормативные документы
Неудовлетворительный микроклимат	СанПиН 1.2.3685–21 Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания [19]
Повышенный уровень шума	
Повышенный уровень вибрации	
Недостаток искусственного света	ГОСТ Р 55710–2013 Освещение рабочих мест внутри зданий. Нормы и методы измерений [20]
Повышенный уровень производственной пыли	Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 28.01.2021 № 2 [21]
Электрический ток	Правила устройства электроустановки (ПУЭ) [22]

5.2.2 Неудовлетворительный микроклимат

Под микроклиматом производственных помещений понимается состояние внутренней среды помещения, которая оказывает воздействие на человека. Микроклимат определяется воздействием на человека температуры воздуха и окружающих поверхностей, насыщенность воздуха механическими частицами (пылью), освещенностью, уровнем шума, биологическими и химическими загрязнениями воздуха.

Работа при пониженных температурах провоцирует сердечно-сосудистые, простудные заболевания, оказывает пагубное влияние на позвоночник и суставы. Повышенные температуры ухудшают работоспособность, может вызывать головные боли, слабость, интенсивное

потоотделение, повышение артериального давления, тепловые удары. Влажность воздуха оказывает влияние на терморегуляцию организма.

Допустимые величины параметров микроклимата на рабочих местах в помещениях представлены в таблице 30 [19]. Работа в производственном цеху относится к средней тяжести – Па.

Таблица 30 – Допустимые величины параметров микроклимата на рабочих местах в помещениях

Пе риод года	Ка тегория работ по уровню энергозат рат	Тем пература воздуха, °С	Тем пература поверхност ей, °С	Отно сительная влажность воздуха, %	С корость движени я воздуха, м/с
Хо лодный	Па	17- 23	16- 24	15-75	0, 1
Те плый	Па	18- 27	17- 28	15-75	0, 1

Для достижения оптимальных параметров микроклимата в производственных помещениях используются системы кондиционирования воздуха, для допустимых параметров – обычные системы вентиляции и отопления.

5.2.3 Повышенный уровень шума

Превышение уровня шума так же относится к вредным факторам производства. Шумом могут являться различные виды звуков вызывающие неприятные ощущения и отвлекающие от нормальной деятельности человека.

Длительное воздействие уровня шума >85 дБ может повысить уровень систолического и диастолического артериального давления, развитие

заболеваний сердечно-сосудистой системы, изменения со стороны эндокринной системы.

Источниками шума при эксплуатации электропривода литцекрытальной машины могут являться: работающие механизмы и аппараты, трансформатор, система вентилирования и кондиционирования воздуха, соударение металлических деталей при установке, шум вращающихся элементов. Предельно допустимые эквивалентные уровни звука представлены в СанПиН 1.2.3685–21 [19, п. 35]

Меры по борьбе с шумами:

- правильная организация труда и отдыха;
- снижение и ослабление шума;
- применение звукопоглощающих преград;
- применение глушителей шума;
- применение средств индивидуальной защиты от шума (наушники, беруши, противозумные каски, одежда).

5.2.4 Повышенный уровень вибрации

Повышенный уровень вибрации оказывает разрушающее воздействие не только на состояние машин и механизмов, но и организм человека: ухудшение состояния нервной и костно-суставной системы, повышение артериального давления, повышение энергетических затрат организма. Нормы показателей по вибрации представлены в СанПиН 1.2.3685–21 [19, табл. 5.4]

Источниками вибрации при эксплуатации электропривода литцекрытальной машины могут являться: работающие механизмы и аппараты.

Для уменьшения степени воздействия вибрации на организм человека применяют средства индивидуальной и коллективной защиты.

Средства индивидуальной защиты: виброзащитная обувь, перчатки со специальными упругодемпфирующими элементами.

Коллективные средства защиты: оградительные устройства, виброизолирующие, виброгасящие и вибропоглощающие устройства, устройства дистанционного управления.

5.2.5 Недостаток искусственного света

Человек с помощью зрения получает около 90% всей информации, качество поступления которой зависит от освещения. В условиях неудовлетворительного освещения человеку приходится напрягать зрительный аппарат, что приводит к утомлению зрения и организма в целом, а также со временем вызывает потерю ориентации среди оборудования, что может привести к получению травмы.

В зависимости от источника света освещение может быть:

естественным (создается солнечным диском диффузионным светом небосвода);

искусственным (создается электролампами);

совмещенным (естественное + искусственное).

Выбор системы освещения. Для производственных помещений всех назначений применяются системы общего (равномерного или локализованного) и комбинированного (общего и местного) освещения. Система комбинированного освещения применяется для производственных помещений, в которых выполняются точные зрительные работы. Для данной рабочей зоны рассчитывается общее равномерное освещение.

Выбор источников света. Источники света, применяемые для искусственного освещения, делят на две группы – газоразрядные лампы и лампы накаливания. Для общего освещения, как правило, применяются газоразрядные лампы как энергетически более экономичные и обладающие большим сроком службы. Наиболее распространёнными являются люминесцентные лампы. Несмотря на большую стоимость, необходимость в обслуживании и пусковой аппаратуре, они обладают хорошей светоотдачей,

имеют длительный срок службы, хорошую цветопередачу и низкую температуру.

Выбор светильников и их размещение. Светильник – прибор, перераспределяющий свет ламп внутри больших телесных углов и 130 обеспечивающий угловую концентрацию светового потока. При выборе типа светильников следует учитывать светотехнические требования, экономические показатели, условия среды.

При выборе необходимого количества ламп необходимо руководствоваться целью создания требуемой освещенности. Выбор необходимой освещенности осуществляется по наименьшей освещенности рабочей поверхности E . Для помещений, где проводятся общие работы с машинами, выбираем $E = 300$ лк [23, табл. 4.1].

Дано помещение с размерами:

длина $A = 54$ м,

ширина $B = 24$ м,

высота $H = 6$ м,

высота рабочей поверхности $h_p = 0,8$ м.

Требуется создать освещенность $E = 300$ Лк.

Коэффициент отражения стен $R_c = 30\%$,

потолка $R_n = 50\%$.

Коэффициент запаса $k = 1,5$,

Коэффициент неравномерности $Z = 1,1$.

Рассчитываем систему общего люминесцентного освещения.

Выбираем светильники типа ОД, $\lambda = 1,4$ с длиной 1,23 м.

Высота рабочей поверхности $h_c = 0,5$ м.

$h = H - h_c - h_p = 6 - 0,5 - 0,8 = 4,7$ м;

Расстояние между рядами светильников:

$$L = \lambda \cdot h = 1,4 \cdot 4,7 = 7,98 \text{ м};$$

Расстояние от стен помещения до торца светильников:

$$\frac{L}{3} = \frac{7,98}{3} = 2,7 \text{ м};$$

Количество рядов светильников

$$n_{\text{ряд}} = \frac{(B - \frac{2}{3}L)}{L} + 1 = \frac{(24 - \frac{2}{3}7,98)}{7,98} = 3,34$$

Количество светильников

$$n_{\text{св}} = \frac{A - \frac{2}{3}L}{l_{\text{св}} + 0,5} = \frac{54 - \frac{2}{3}7,98}{1,23 + 0,5} = 28,13$$

Общее количество светильников:

$$N = n_{\text{ряд}} \cdot n_{\text{св}} = 3,34 \cdot 28,13 = 93,95$$

Учитывая, что в каждом светильнике установлено две лампы, общее число ламп в помещении $n = 186$.

Находим индекс помещения:

$$i = \frac{S}{h \cdot (A + B)} = \frac{1296}{4,7 \cdot (54 + 24)} = 3,5;$$

Рассчитаем световой поток:

$$\eta = 0,67.$$

$$\Phi = \frac{E_H \cdot S \cdot K_3 \cdot Z}{n \cdot \eta} = \frac{300 \cdot 1296 \cdot 1,5 \cdot 1,1}{186 \cdot 0,67} = 5148 \text{ Лм};$$

Определяем потребный световой поток ламп в каждом из рядов:

По табл. 1 выбираем ближайшую стандартную лампу – ЛБ 80 Вт с потоком 5200 Лм. Делаем проверку выполнения условия

$$-10\% \leq \frac{\Phi_{\text{л.станд}} - \Phi_{\text{л.расч}}}{\Phi_{\text{л.станд}}} \cdot 100\% \leq +20\%$$

Получаем

$$-10\% \leq 4,6\% \leq +20\%$$

Определяем электрическую мощность осветительной установки

$$P = 186 \cdot 80 = 14880, \text{ Вт};$$

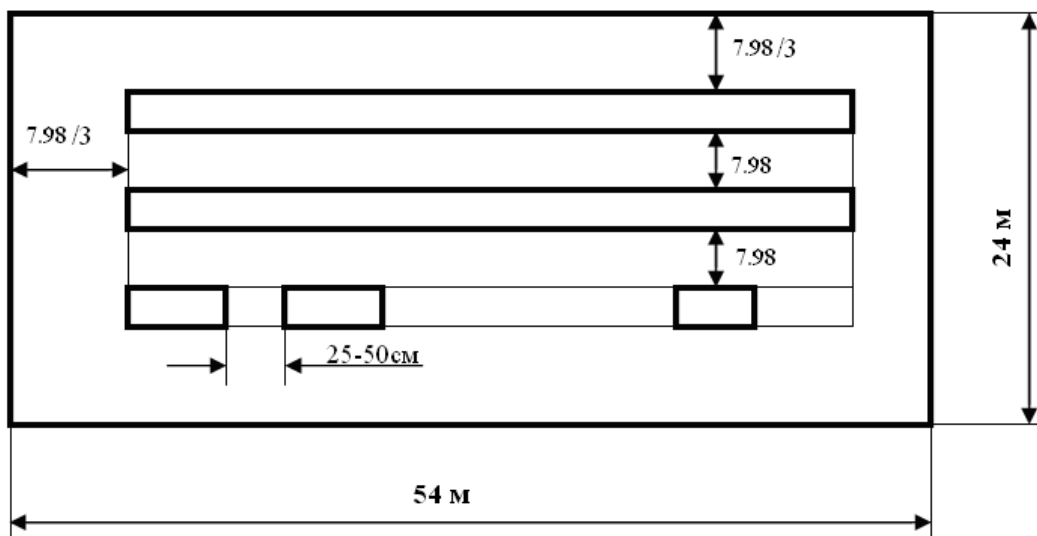


Рисунок 93 – План помещения и размещения светильников с люминесцентными лампами

5.2.6 Электрический ток

Поражение электрическим током возникает при непосредственном соприкосновении человека с электрической цепью, в которой присутствует источник напряжения или тока, способный вызвать протекание тока по попавшей под напряжение части тела.

Сила поражения электрическим током различна и поэтому последствия поражения электрическим током, тоже различны. Сила поражения электрическим током зависит от нескольких факторов: класса напряжения, времени воздействия, от характера тока, индивидуальных особенностей организма, от пути прохождения тока по организму и от места соприкосновения человека с оборудованием. Проходя через организм, электрический ток производит термическое, электролитическое, механическое и биологическое 134 воздействия. Говоря о последствиях, нужно отметить, что из-за нагрева человеческих тканей, поражение электрическим током вызывает ожоги, иногда эти ожоги не совместимы с

жизнью. Так же во время удара происходит разложение органических жидкостей, таких как кровь, внутри организма. Удары током могут вызвать сбои в работе сердечной мышцы и нервной системы. При поражении головы электрическим током возможна потеря сознания. Удары электрическим током приводят к нарушениям биологических процессов.

Для снижения вероятности поражения электрическим током необходимо проводить инструктаж персонала, экзамены на предмет проверки знания правил техники безопасности, правил технической эксплуатации, межотраслевых правил при работе с электроустановками, а также правил оказания первой помощи пострадавшему. Проверка знаний по данным вопросам проводится специальной комиссией, которая утверждена соответствующими контролирующими органами.

В данном помещении присутствуют только электроустановки напряжением до 1кВ. По электробезопасности помещение относится ко второму классу – помещения с повышенной опасностью (сырые помещения. влажность более 75%, в воздухе возможно наличие токопроводящей пыли, цеха с высоким содержанием в воздухе химических соединений, полы выполнены из материалов способных, проводить электричество, наличие возможности возникновения одновременного прикосновения к станку или другому оборудованию с одной стороны и металлическим частям (корпусам) электрооборудования или открытым проводящим частям с другой.).

В соответствии с «Правилами устройства электроустановок» [22] в лаборатории предусмотрены следующие технические способы защиты от воздействия электрического тока:

- защитное заземление;
- зануление;
- устройства защиты оборудования (УЗО), отключающие электропитание от устройств, у которых нетоковедущие части оказались под напряжением;

- знаки безопасности в виде предупредительных плакатов «Высокое напряжение!».

Персонал постоянно проходит инструктаж по технике безопасности (1 раз в 3 месяца), ведется журнал. Большинство сотрудников имеют группу допуска 3 и выше.

5.3 Экологическая безопасность

Работа исследуемого объекта сопровождается негативным воздействием на окружающую среду в виде: -выбросы в атмосферный воздух загрязняющих веществ и иных веществ; -загрязнение недр, почв; -сбросы загрязняющих веществ, в поверхностные водные объекты и на водосборные площади. воздействий на атмосферный воздух и их источников.

Воздействие на селитебную зону. Повышение уровня шума оказывает вредное воздействие на организм человека. В результате длительного воздействия шума нарушается нормальная деятельность сердечно-сосудистой и нервной систем. Так как кабельное производство находится в удаленных от селитебной зоны местах, устройства крутильного оборудования не оказывают воздействие на селитебную зону.

Воздействие на атмосферу. При эксплуатации происходит выделение вредных веществ в воздух, влияющих на дыхательные пути живых организмов. Во время обработки медного литцендрата, в атмосферу попадают оксиды меди, предельная среднесуточная концентрация которого $0,002 \text{ мг} / \text{м}^3$ [21], что приводит к истощению запаса кислорода; разрушению озонового слоя. Способ борьбы с газообразными отходами: согласно ГОСТ Р ЕН 779–2014 [30], перед выбросом в атмосферу, воздух помещений подвергается очистке в фильтровентиляционных системах, что предотвращает атмосферу от загрязнения.

Воздействие на гидросферу. В процессе производства появляется большое количество отходов, таких как обрезки кабеля, изолированного эмалью. Утилизации таких отходов должна быть осуществлена только в

специально предназначенные для этого места, не допускается сброс отходов в водные источники, во избежание загрязнений водного ресурса. Для того, чтобы воздействие при работе устройства было минимальным необходимо проводить следующие мероприятия: промышленные и бытовые отходы должны быть утилизированы в отведенные для этого места.

Воздействие на литосферу Воздействие на литосферу характеризуется загрязнением вредными химическими веществами, применяемыми в процессе скрутки литцендрата, а именно, обрезки кабеля, изолированного эмалью. Основными методами сохранения земельных ресурсов являются:

- исправление ландшафта, изменённого во время работ;
- создание мелиоративных и гидротехнических сооружений;
- обработка почвы, путем внесения удобрений.

5.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

При эксплуатации устройства возможны различные чрезвычайные ситуации техногенного характера, в данном случае возможные чрезвычайные ситуации: пожар (возгорание); взрыв; разрушение конструкции цеха, склада; землетрясение, а типичная – возгорание.

Пожаром называется неконтролируемое горение, причиняющее материальный ущерб, вред жизни и здоровью людей, интересам общества, государства. В области пожарной безопасности основополагающими документами являются законодательные акты, такие как – федеральный закон [25] Здания участков, цехов, заводов промышленных предприятий; производственные помещения по техническому регламенту о требованиях пожарной безопасности, согласно федеральному закону [26] по степени огнестойкости, конструктивной и функциональной пожарной опасности относятся к классу Ф5.1. Так как в помещении находятся горючие и трудногорючие жидкости, твердые горючие и трудногорючие вещества и материалы, то по пожарной опасности данное помещение можно отнести к категории В4 [26 ст. 27]. Пожар может возникнуть по нескольким причинам:

при нарушении исправности электропроводки, при эксплуатации неисправного оборудования, при несоблюдении техники пожарной безопасности. Поэтому необходимо принимать меры, которые будут направлены на повышение пожаробезопасности.

Для предотвращения пожаров необходимо применять следующие меры:

- соблюдать все стандарты по проектированию и строительству зданий и сооружений;
- своевременно проводить проверку и ремонт электрооборудования;
- соблюдать правила пожарной безопасности.

Согласно постановлению правительства [27], помещение должно быть оборудовано первичными средствами пожаротушения. Для персонала должны проводиться инструктажи по правилам действия при пожаре. Персонал должен проходить ежегодную переподготовку по правилам пожарной безопасности.

Техническими средствами для предотвращения возникновения чрезвычайной ситуации в помещении лаборатории служат:

- пожарная сигнализация со звуковым оповещением;
- первичное средство пожаротушения в виде порошкового огнетушителя типа 4(А) - АВСЕ, находящегося в свободном доступе.

К дополнению к этому для тушения пожаров в должны быть предусмотрены пожарные краны.

При возникновении пожара в соответствии с постановлением правительства [27] персонал, который не участвует в подавлении очага возгорания должен в спешном порядке покинуть помещение. О возникновении чрезвычайной ситуации необходимо сообщить в пожарную часть по телефону 01 (112). Также необходимо поставить в известность заведующего кафедрой, в подчинении которого находится данная

лаборатория. По возможности необходимо оказать помощь при эвакуации людей.

В соответствии с постановлением правительства [27], на случай чрезвычайной ситуации разрабатывается план эвакуации, который несет следующие функции:

- обозначает пути эвакуации, эвакуационные выходы, обеспечивая тем самым безопасность процесса организованного самостоятельного движения людей из помещений;
- в нем указывается расположение пожарного оборудования и средств оповещения;
- несет упоминания о первоочередных действиях при пожаре.

Производство литцендрата сопряжено с эксплуатацией ряда электроустановок, на основании этого возможный пожар можно отнести к классу D [26, ст. 8]. Согласно [26, ст. 60] Здания и сооружения должны быть обеспечены первичными средствами пожаротушения лицами, уполномоченными владеть, пользоваться или распоряжаться зданиями и сооружениями. Номенклатура, количество и места размещения первичных средств пожаротушения устанавливаются в зависимости от вида горючего материала, объемно-планировочных решений здания, сооружения, параметров окружающей среды и мест размещения обслуживающего персонала.

Вывод по разделу

В разделе социальной ответственности был проведён анализ основных правовых и организационных вопросов обеспечения безопасности на предприятии, опасных и вредных факторов, экологической безопасности данного производства и меры предупреждения чрезвычайных ситуаций.

Анализ вредных и опасных факторов и мер по уменьшению их влияния на работников, позволит создать более и безопасную обстановку. Согласно

расчету системы искусственного освещения, были выбраны люминесцентные лампы ЛХБ мощностью 80 Вт и значением светового потока равным 5400 лм.

Согласно выявленным факторам, выбранное помещение относится к категории «помещения с повышенной опасностью» [21, п. 1.1.13]. Персоналу, работающему в данном помещении, достаточно обладать III группой по электробезопасности [Правил по охране труда при эксплуатации электроустановок]. Тяжесть труда, выполняемого при эксплуатации электропривода литцекрытильной машины, соответствует IIa категории [19].

Выявление и применение мер по предупреждению чрезвычайных ситуаций, а также планирования мер по их ликвидации с минимальными последствиями позволяет свести к минимуму риски возникновения чрезвычайных ситуаций, количество жертв и ущерб, нанесённый предприятию. Производственные помещения по техническому регламенту о требованиях пожарной безопасности [25] по степени огнестойкости относятся к классу Ф5.1. Так как в помещении находятся горючие и трудногорючие жидкости, твердые горючие и трудногорючие вещества и материалы, то по пожарной опасности данное помещение можно отнести к категории В4 [26 ст. 27].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом в дипломной работе задании была рассчитана Т-образная схема замещения 3-фазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором RA200LB6. В среде Mathcad были определены параметры схемы замещения. Также построены статические характеристики асинхронного электродвигателя и проведен их анализ. Значения контрольных точек, полученных в ходе расчета в большей части несущественно отличаются от тех, которые предоставлены заводом изготовителем. Как правило это наблюдается в линейной области электромеханических и механических характеристик. Значительно отличающимся результатом является значение пускового момента и тока. Но так или иначе в рабочих областях характеристики расчетные параметры схемы замещения получены адекватные, что и было показано. А это позволило использовать их в задаче управления этим двигателем

Также, в ходе работы были построены электромеханические и механические характеристики при законе $U_{1j}/f_{1j} = \text{const}$. Было показано, что при ряде значений частот искусственные характеристики не обеспечивают уверенной работы электродвигателя в нелинейной части характеристик. Этого можно избежать корректировкой вольт-частотной характеристики. За счёт локального увеличения напряжения можно добиться удовлетворительных значений пусковых и критических моментов, что в свою очередь позволило бы добиться адекватной работы электропривода при пусковых режимах. Помимо этого, было показано, что небольшая вольтдобавка несущественно сказывается на значениях пусковых токов. Причем распределение этих значений неравномерное вследствие того, что при снижении частоты питающего напряжения влечет за собой уменьшение индуктивного сопротивления по сравнению с активной частью и большая доля падения напряжения приходится на последнюю. Также нельзя не отметить несущественное изменение тока намагничивания при варьировании частоты питания. Это является следствием пропорционального изменения амплитуды

питающего напряжения и частоты. Однако, если ВЧХ становится нелинейной различие будет более чем существенным. Также из электромеханических характеристик, построенных с помощью IR – компенсации видно, что при увеличении коэффициента компенсации момента $K_{км}$ пусковые токи тоже растут, по аналогии с корректировкой ВЧХ, потому что по сути своей компенсация ей и является. Механические характеристики при увеличении коэффициента компенсации становятся более жесткими, что и требуется, так как при резкой смене величины нагрузки корректирующий сигнал положительной обратной связи позволит увеличить управляющий сигнал, а вместе с ним и критический момент, растягивающий линейную часть характеристики.

В ходе моделирования двигателя в среде Simulink с рассчитанными ранее параметрами схемы замещения были получены кривые переходных процессов угловой скорости, электромагнитного момента, токов и потокосцепления. Установлена высокая сходимость установившихся значений динамической механической характеристики и статической, полученной ранее. Так, например значения номинальных скоростей различаются менее чем на 0,5% а ударный момент в $m = 4,18$ раз больше чем номинальный, что укладывается в данные завода-изготовителя. То же самое было произведено в отношении фазных токов статора. В итоге можно заключить то, что рассчитанные параметры позволяют производить адекватное имитационное моделирование в рамках некоторых допущений, присущих самой математической модели асинхронного двигателя.

С помощью построенной модели двигателя было произведено моделирование и сопутствующее исследование двух схожих, но разных систем управления асинхронным двигателем. Одна из них содержит лишь одну положительную обратную связь, которая в свою очередь повышает при увеличении внешнего возмущения амплитуду питающего напряжения, а соответственно и критического момента двигателя. Но подобное решение не лишено недостатков. Например, таких как колебания момента, что требует

тщательного подбора коэффициента k_m , что в общем случае проще, так как система однопараметрическая. Во втором же случае предложено использование системы с компенсацией скольжения, которая включает вторую положительную обратную связь. Такое решение позволяет добиться более «правильных» переходных процессов в более широком диапазоне. И также, как показало моделирование – уменьшенные пусковые нагрузки на исполнительный механизм будут уменьшены по сравнению с обычной ИР – компенсацией. В работе представлены обобщающие сведения о тенденции изменения качества переходных процессов при варьировании коэффициентов k_m и k_c . Вопрос оптимальности их подбора остается за ее рамками. Но так или иначе существует лучший набор значений, обеспечивающий наиболее подходящие показатели качества регулирования, но их следует искать экспериментально, так как общей методики поиска их значений нет.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ковригин Л.А. Основы кабельной техники. учебное пособие. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2006. – 94 с.
2. Балашов, А.И. Кабели и провода. Основы кабельной техники/ А.И. Балашов, М.А. Боев, А.С. Воронцов и др. Под редакцией И.Б. Пешкова. – М.: Энергоатомиздат, 2009. – 467 с.: ил.
3. Бабицкий О.Ш., Лехтман Л.Я. Технология скрутки кабелей: Крутильное оборудование кабельного производства. М.: Энергия, 1978. 135 с.
4. Белов М. П., Новиков В. А., Рассудов Л. Н. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов. М: Издательский центр «Академия», 2004. – 576 с
5. Л. Б. Литвак. Построение рабочих характеристик асинхронных двигателей по каталожным данным. Промышленная энергетика, 1959, № 4
6. Чернышев А. Ю. Электропривод переменного тока: учебное пособие / А. Ю. Чернышев, Ю.Н. Дементьев, И. А. Чернышев ; Томский политехнический университет – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 213 с.
7. Поздеев А.В. Электромагнитные и электромеханические процессы в частотно-регулируемых асинхронных электроприводах. – Чебоксары: Изд-во ЧВГУ, 1998. – 172 с.
8. Терёхин В.Б. Моделирование систем электропривода в Simulink (Matlab 7.0.1): учебное пособие / В.Б. Терёхин; Национальный исследовательский Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 292 с.

9. Сандлер, А. С. Электроприводы с полупроводниковым управлением. Преобразователи частоты для управления асинхронными двигателями / А. С. Сандлер, Р. С. Сарбатов ; Ред. М. Г. Чиликин . – М.-Л.: Энергия, 1966 . – 144 с.
10. Асинхронный частотно-регулируемый электропривод типовых производственных механизмов: учебное пособие / Ю. Н. Дементьев, В. М. Завьялов, Н. В. Кояин, Л. С. Удут. — Томск: ТПУ, 2017. — 404 с.
11. Чернышев А. Ю., Ланграф С. В., Чернышев И. А. Исследование систем скалярного частотного управления асинхронным двигателем: Методические указания. – Томск: Изд. ТПУ, 2003. – 23с.
12. Анучин А.С. Системы управления электроприводов: учебник для вузов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2015. — 373. с.
13. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 27.22.11.2021).
14. ГОСТ 12.2.033–78 «Система стандартов безопасности труда. Рабочее место при выполнении работ стоя»
15. МР 2.2.7.2129-06 «Режимы труда и отдыха работающих в холодное время года на открытой территории или в неотапливаемых помещениях»;
16. МР 2.2.8.0017–10 «Гигиена труда. Средства коллективной и индивидуальной защиты. Режимы труда и отдыха работающих в нагревающем микроклимате в производственном помещении и на открытой местности в теплый период года»
17. ТИ-093-2002 «ТИПОВАЯ ИНСТРУКЦИЯ ПО ОХРАНЕ ТРУДА ДЛЯ ОПЕРАТОРА КРУТИЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ»
18. ГОСТ 12.0.003–2015 «Опасные и вредные производственные факторы. Классификация».

19. СанПиН 1.2.3685–21 Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания.
20. ГОСТ Р 55710–2013 Освещение рабочих мест внутри зданий. Нормы и методы измерений.
21. Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 28.01.2021 № 2.
22. Правила устройств электроустановок. 6-е и 7-е изд. М.: Энергоатомиздат, 2003. – 640 с.
23. СП 52.13330.2016 «Естественное и искусственное освещение»
24. Решение Комиссии Таможенного союза от 28.05.2010 N 299 (ред. от 29.11.2021) "О применении санитарных мер в Евразийском экономическом союзе".
25. Федеральный закон от 21.12.1994 N 69-ФЗ (ред. от 12.03.2014) «О пожарной безопасности»
26. Федеральный закон от 22.07.2008 N 123-ФЗ (ред. от 02.07.2013) «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности».
27. Постановление Правительства РФ от 28.12.2020 N 2314 "Об утверждении Правил обращения с отходами производства и потребления в части осветительных устройств, электрических ламп, ненадлежащие сбор, накопление, использование, обезвреживание, транспортирование и размещение которых может повлечь причинение вреда жизни, здоровью граждан, вреда животным, растениям и окружающей среде".
28. СП 12.13130.2009 «Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности»
29. ГОСТ 12.1.005–88 ССБТ. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны.
30. ГОСТ Р ЕН 779–2014 «Фильтры очистки воздуха общего назначения»

- 31.ТИ-093-2002 «ТИПОВАЯ ИНСТРУКЦИЯ ПО ОХРАНЕ ТРУДА
ДЛЯ ОПЕРАТОРА КРУТИЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ»
- 32.ГОСТ 12.1.003–83 «СИСТЕМА СТАНДАРТОВ БЕЗОПАСНОСТИ
ТРУДА ШУМ ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ»
33. СанПиН 2.2.4.3359–16. «Санитарно-эпидемиологические
требования к физическим факторам на рабочих местах»

Приложение А

Asynchronous frequency-controlled electric drive of a litzwisting machine

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5AM16	Анохин Алексей Святославович		

Консультант школы ИШЭ отделения (НОЦ) ОЭЭ:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Шилин Александр Анатольевич	Доктор технических наук		

Консультант – лингвист отделения (НОЦ) ОИЯ школы ШБИП:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Егорова Юлия Ивановна	Кандидат технических наук		

Introduction

Litzendrate twisting machines play a vital role in the modern conductor and cable systems industry. Incorporating asynchronous electric drive-in die-twisting machines offers numerous advantages, including enhanced efficiency, flexibility, and production quality. These machines enable precise control over rotation speed, ensure energy efficiency, reliability, and seamless integration with control systems. As a result, the implementation of asynchronous electric drives optimizes the die-twisting process and enhances the competitiveness of cable industry enterprises.

Today, the cable industry faces increasing demands for productivity, product quality, and energy efficiency. To meet these requirements, various technological innovations, such as frequency converter - asynchronous motor systems, are employed. This system represents a contemporary solution in electric drives, enabling precise control over motor speed and torque. It consists of a static frequency converter that alters the supply voltage's frequency and an asynchronous motor that converts electrical energy into mechanical work.

The advantages of employing frequency converter - asynchronous motor systems in the cable industry are significant and encompass the following:

Speed control: The frequency converter system allows for accurate control of the asynchronous motor's rotation speed within a wide range. This feature proves crucial in cable product manufacturing, where speed adjustments during the die-twisting process or other operations are necessary based on the cable type or customer's order.

Energy efficiency: Asynchronous motors within the frequency converter system exhibit high energy efficiency. They automatically adjust power and electricity consumption according to the current process requirements, leading to reduced energy consumption and operating costs.

Precision control: The frequency converter system ensures precise motor control, facilitating stability and repeatability in the die-twisting process. It also enables control over other cable production parameters, such as twist pitch, strain tension, and other factors. This contributes to enhanced cable quality and uniformity.

This work aims to study the principles of speed regulation and explore the feasibility of utilizing frequency converter - asynchronous motor systems to develop a simulation model of a torsional bus for integration into a controlled electric drive system.

1. CABLE TWISTING TECHNOLOGY

In the early 19th century, the first twisting machines were introduced to twist steel ropes. Subsequently, between 1837 and 1840, pioneering twisting machines were developed for cable production, employing various twisting methods such as cage, planetary, and cigar twisting. Innovators like Wurm from Austria, Opderbeck from Germany, Olsson from Sweden, and Nawal from Scotland were among the early creators of torsion machines. Since then, cable production techniques and twisting machines have undergone continuous improvements.

Cable twisting involves the interconnection of multiple conductors through twisting, resulting in a stronger and more flexible cable. The twisted conductors are typically arranged as cores, which are then enclosed in a protective sheath, forming a complete cable. Depending on the twisting method employed, cables can exhibit varying degrees of stiffness, flexibility, and resistance to external factors. Wire twisting can be carried out manually or with specialized twisting machines. Given the focus of this paper on litzendrate production, it becomes necessary to provide a definition and description of this particular product [1].

Litzendrate, also referred to as litzendrate wire, is a type of wire composed of numerous thin copper wires, each individually insulated. These individual wires are then combined in a complex twisting arrangement. The primary purpose of creating litzendrate wire is to mitigate the skin effect observed in larger wires when

transmitting high-frequency currents. The skin effect results in the concentration of current in the wire's surface layer, increasing resistance and diminishing signal or energy transmission efficiency. The litzendrate design allows for even distribution of the current among the individual wires, thereby reducing resistance and mitigating the skin effect. This makes litzendrate wire particularly valuable for high-frequency signal or energy transmission, where precision and minimal losses are crucial. Litzendrate finds extensive applications in various fields, including the cable industry, radio communications, audio and video equipment, medical devices, and other domains requiring accurate and efficient signal or energy transmission.

The cable twisting process incorporates several essential mechanisms: the feeding device, the twisting machine, the traction device, and the receiving device with a clamshell. Let's delve deeper into these mechanisms and their respective functions.

The feeding device serves the following purposes:

Workpiece feeding: It ensures a continuous supply of the die into the machine, maintaining consistent movement and tension of the material during the twisting process.

Speed and tension control: The feeding device may include mechanisms for regulating the feed rate and material tension. This enables precise control over the speed and tension of the die, creating optimal conditions for the twisting process.

Uniform supply assurance: The feeding device is designed to ensure a uniform and stable supply of the die, which is crucial for achieving high-quality and homogeneous cable production.

The specific design and mechanisms of the feeding device (Fig A.1) may vary depending on the twisting machine and production process requirements. It can be implemented passively or with the incorporation of a tracking electric drive. The utilization of a tracking electric drive allows for maintaining a desired linear speed of the technological process. Reliability, precise and controlled workpiece feeding,

as well as ease of maintenance and configuration, are key considerations when selecting a feeding device.



Figure A.1 – feeding device

A twisting machine is a specialized equipment employed in the cable industry for the twisting of conductors or cores used in cable production. It assumes a critical role in shaping the cable structure, ensuring the necessary structural strength and electrical characteristics of the cable.

Typically, a twisting machine comprises various components, including working shafts, conductor feeding systems, rotational motion devices, and control systems for the twisting process. The machine's configuration and size may vary depending on the production requirements and the specific cable types being manufactured.

The twisting process within the machine entails the rotation of the working shafts on which the conductors or cores are positioned. These conductors or cores are fed into the machine from appropriate sources, such as wire drums or core coils. During the twisting process, the machine facilitates controlled rotation of the conductors around its axis, thus achieving the desired cable structure and geometry.

An essential characteristic of twisting machines is their capacity to regulate the rotation speed of the conductors. This feature allows for customization of the twisting process to suit different cable structure requirements. Some machines may even enable the alteration of the conductor's rotation direction, facilitating the creation of various types of twisting, such as symmetrical, asymmetrical, parametric, and others.

Twisting machines (Fig A.2) hold a pivotal role in the cable industry, ensuring high-quality and efficient cable production. They enable the attainment of requisite structural strength, flexibility, electrical characteristics, and other essential cable parameters. Through the utilization of twisting machines, the cable production process becomes increasingly automated.



Figure A.2 – Twisting machine

In the cable industry, particularly in the production of twisted ends, a traction device is specialized equipment utilized for feeding and tensioning conductors during the twisting process. Its primary function is to ensure the smooth movement of conductors along the twisting machine, creating the required tension and controlling the twisting process.

A typical traction device consists of various components, including wire feed mechanisms, supporting rollers or pulleys for guiding the conductors, and tension systems for applying the necessary force during twisting. It works in conjunction with the twisting machine and other devices on the production line to maintain continuous and controlled conductor movement.

The traction device plays a crucial role in ensuring a uniform and stable supply of conductors to the twisting machine. It regulates the feed rate while maintaining optimal tension, which is essential for achieving high-quality and consistent twisting of the die. Additionally, it ensures the equal distribution of conductors across the width and length of the cable, impacting its electrical characteristics and mechanical strength.

During the twisting process, the traction device ensures the smooth movement of conductors, preventing misalignment and tangling. It also controls and adjusts the tension to prevent stretching or breakage. Consequently, the traction device is instrumental in ensuring precise and high-quality twisting of the die.

Modern traction devices (Fig A.3) in the cable industry are equipped with automatic systems for monitoring and regulating the conductor's feed speed. This optimization allows for minimal deviations and achieves the desired die characteristics. These automatic control systems enable the monitoring of conductor supply uniformity, control of tension and movement speed, as well as prompt response to any potential failures or inconsistencies during twisting.

Traction devices in the production of twisted castings can vary in design and characteristics based on production requirements and specifications. They can be tailored to work with various conductor types, such as copper, aluminum, or multi-core wires. Moreover, they must be adaptable to the required speed and tension ranges to provide optimal conditions for twisting the die.

Safety is a crucial aspect of traction device operation. Protective mechanisms should be in place to prevent operator injuries and minimize equipment breakdowns

or damage. Regular maintenance and inspections are vital to ensure the reliability and durability of the traction devices.

The utilization of traction devices in the production of twisted castings enhances the efficiency, quality, and reliability of the cable manufacturing process. They facilitate precise and controlled conductor movement, achieve the necessary tension and number of twists, and minimize the occurrence of errors or defects during production.



Figure A.3 – Traction device

In the cable twisting process, the receiving device (Fig A.4) is a vital component of the twisting machine. It works in tandem with the clamshell and is responsible for receiving and winding the twisted cable.

The clamshell is responsible for uniformly distributing the finished product onto the drum of the receiving device after it passes through the torsion zone.

The receiving device is typically a purpose-built structure that enables precise and adjustable winding of the twisted cable. It performs several key functions:

Distribution: The receiving device ensures the even distribution of the twisted cable onto the drum or coil. This prevents distortions and uneven winding that could result in issues during subsequent processing or usage of the cable.

Winding: The receiving device facilitates controlled winding of the twisted cable onto the drum or coil. This can be achieved through the use of specialized mechanisms like adjustable rollers, guiding paws, or other devices that create the necessary tension and regulate the winding process.

Speed control: The receiving device allows for the adjustment of the winding speed onto the drum or coil. This is crucial for maintaining uniform winding and synchronizing the speed with the twisting process, while also preventing cable breakage or overstretching.

The receiving device interacts harmoniously with the folding machine and the twisting machine, ensuring a seamless and efficient cable twisting and winding process. It plays a pivotal role in guaranteeing high-quality production and minimizing cable losses or damages during processing.



Figure A.4 – Receiving device

2. Calculation of dynamic characteristics of an asynchronous motor

The final verification of the correctness of finding the parameters of the asynchronous motor replacement circuit requires dynamic modeling of the asynchronous electric drive. The simulation can be performed using the "Frequency converter - asynchronous motor" system in absolute units. This is possible thanks to modern software tools, such as MATLAB, which provide automatic scaling of the simulation regardless of engine power or its parameters. This approach makes it possible to check the correspondence of the simulation results to the real behavior of the asynchronous electric drive and make sure that the parameters of the measurement scheme found are correct, taking into account the error allowed [2].

We calculate the characteristics using the parameters of the substitution scheme from Table 1

Table A.1 – Engine Parameters

Inductive resistance of the magnetization circuit X_m, Ohm	11,562
Inductive resistance of the rotor circuit, brought to the primary winding $X'_{2\sigma}, \text{Ohm}$	0,444
Inductive resistance of the stator circuit $X_{1\sigma}, \text{Ohm}$	0,331
Inductance of the magnetization circuit L_m, mH	0,037
Inductance of the rotor circuit, brought to the primary winding $L'_{2\sigma}, \text{mH}$	1,413
Inductance of the stator circuit $L_{1\sigma}, \text{mH}$	1,053
Active resistance of the rotor circuit, brought to the primary winding R'_2, Ohm	0,142
Active resistance of the stator circuit R_1, Ohm	0,146

Simulation of an asynchronous motor is possible with the help of MATLAB Simulink software. The simulation model is shown in Fig. A.5 [3].

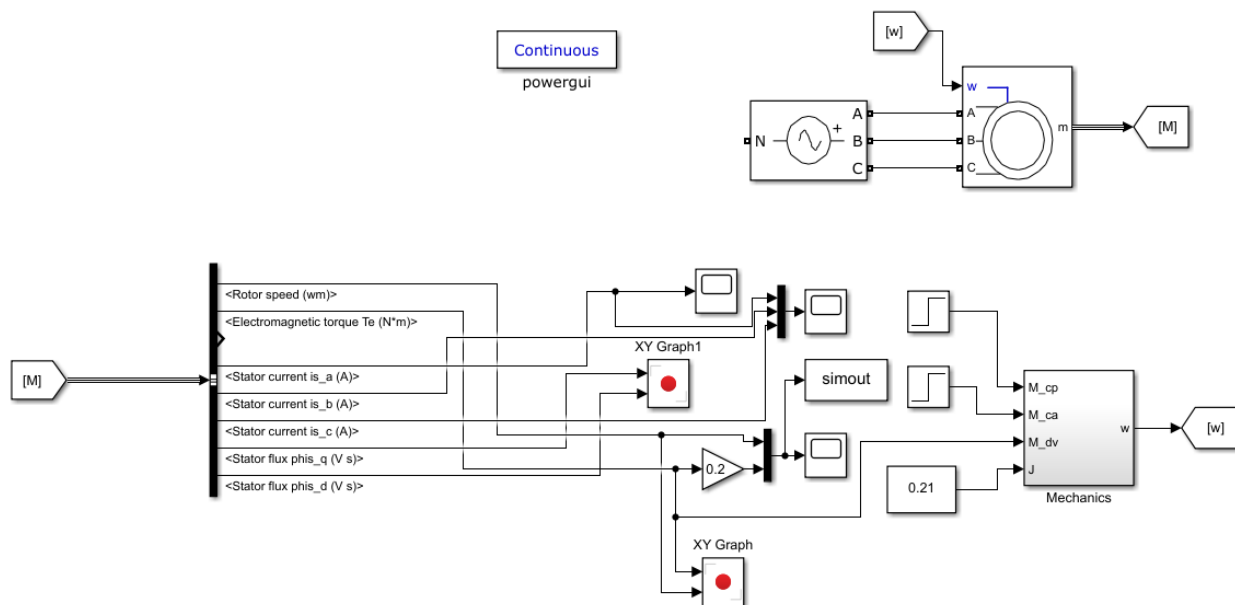


Figure A.5 – Simulation model of an asynchronous motor

With the help of this model, the transients of the angular velocity of the motor shaft and the electromagnetic moment are obtained (Fig.A.6).

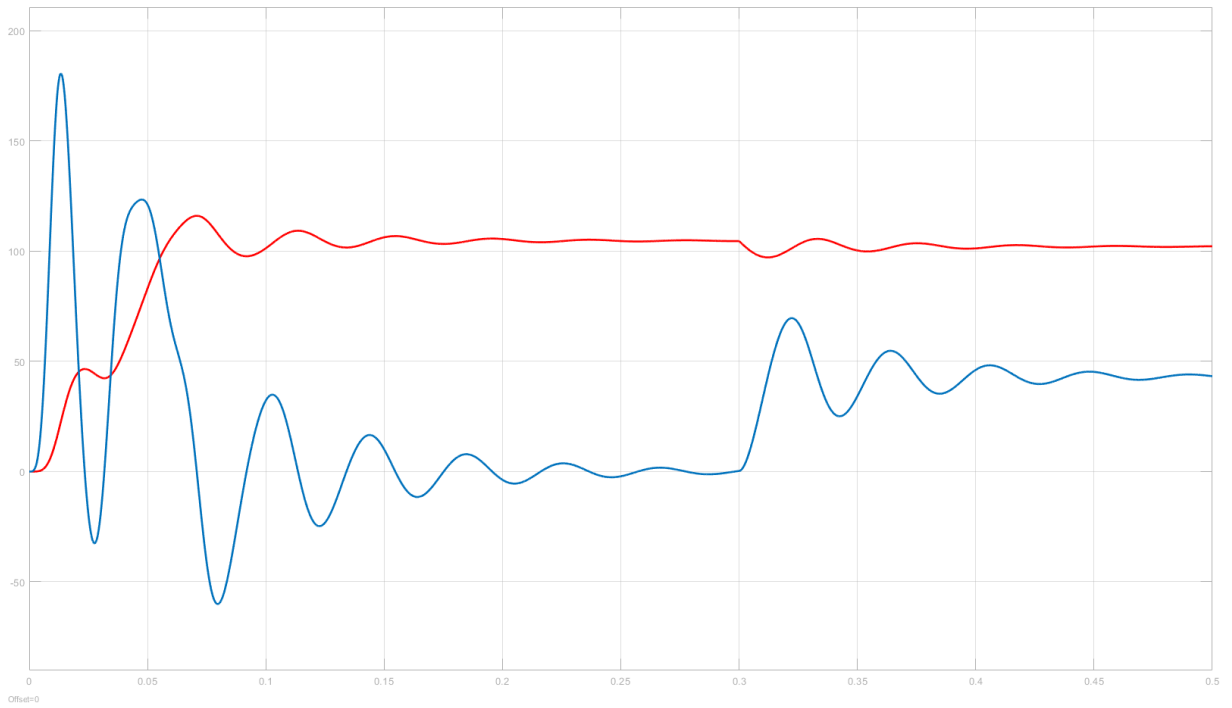


Figure A.6 – Transients of angular velocity and moment

These transients correspond to a certain phase portrait – a dynamic mechanical characteristic, presented in Figure A.7. Also in this figure is a curve of static mechanical characteristics for comparison with dynamic.

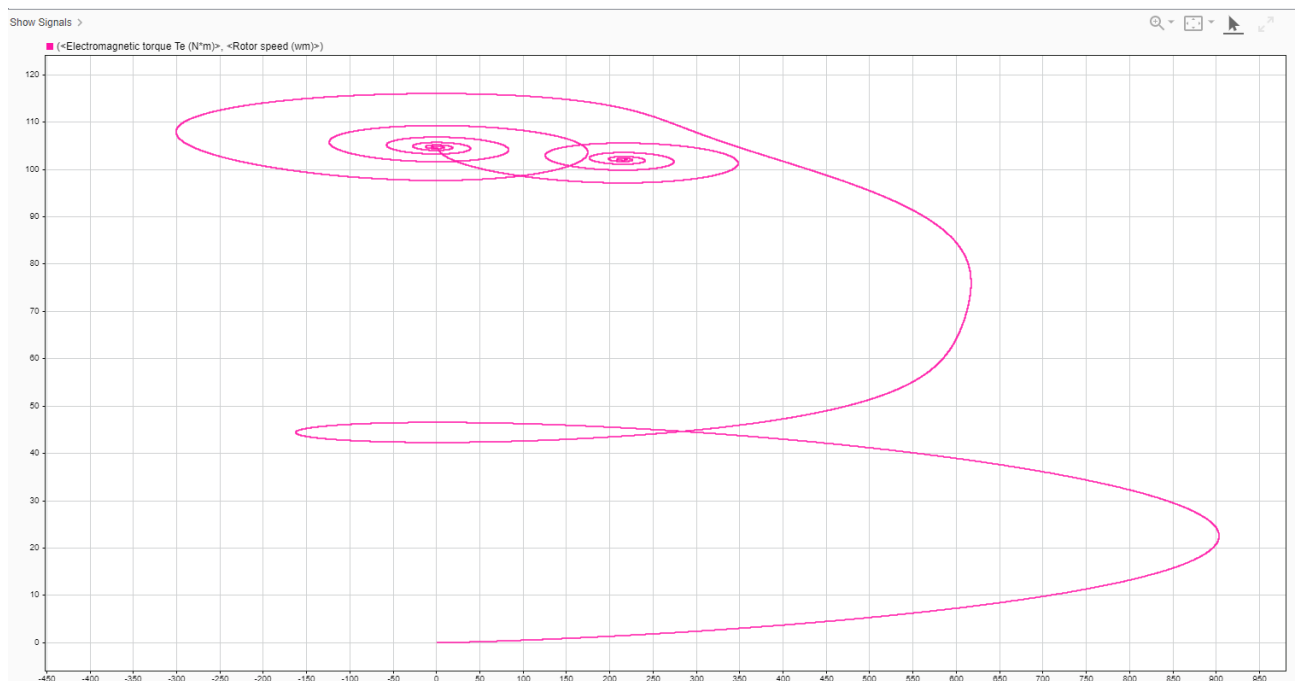


Figure A.7 – Transients of angular velocity and moment

As can be seen from the above figures, the foci of dynamic characteristics almost perfectly coincide with the static curve. First, the image point is set to the first focus with coordinates, after which, when the load is applied, the coordinates of the image point take values, which corresponds to the linear part of the curve of the mechanical characteristic. It is worth noting the fact that the nominal values differed slightly (no more than 0.5%) from the reference values calculated earlier. But this is primarily due to the rounding of the results of calculations of the parameters of the engine replacement circuit and the computational error of the method of calculating differential equations describing the dynamics of the object under consideration. In addition, the impact moments during start-up exceed the nominal one by a factor of three, which exceeds what is stated in the manufacturer's passport data). All of the above emphasizes the adequacy of the model. Transients of phase currents were also removed (Fig.A.8).

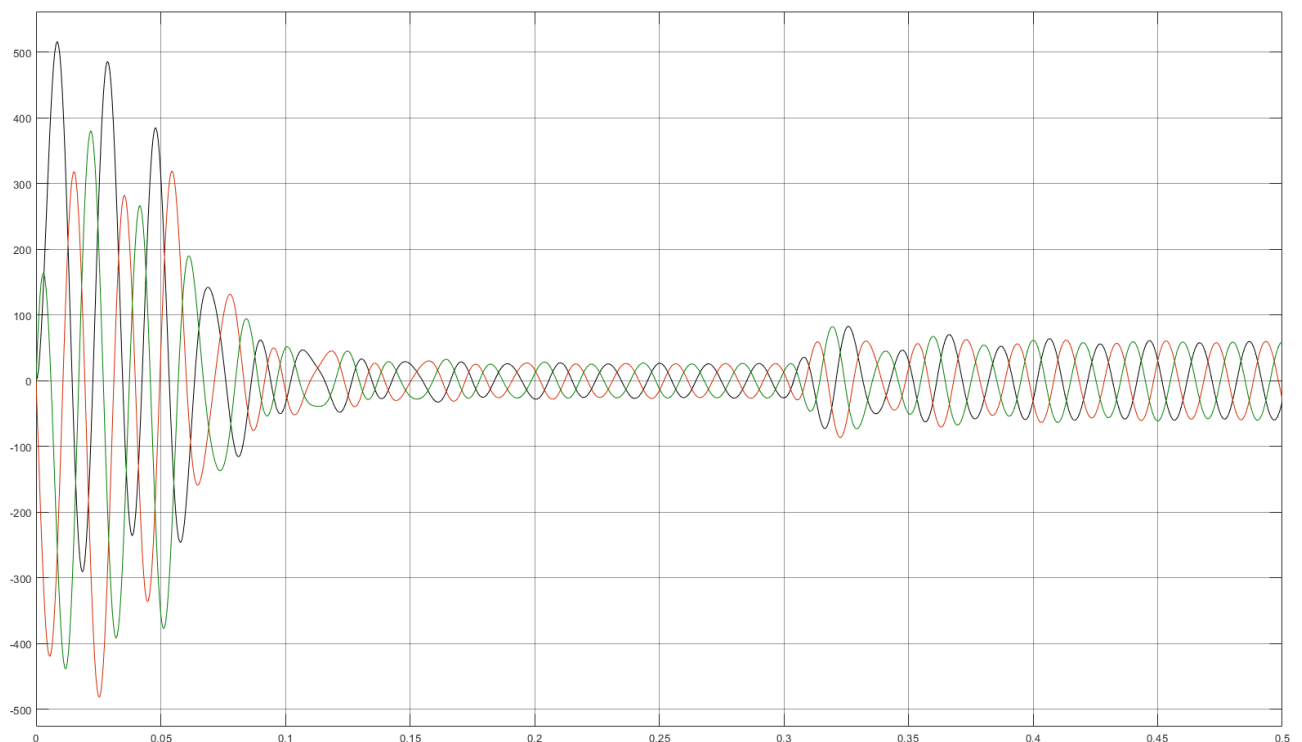


Figure A.8 – Transients of phase currents

To compare the values of currents in a particular mode with those calculated earlier, we will select a specific phase, for example A (Fig.A.9).

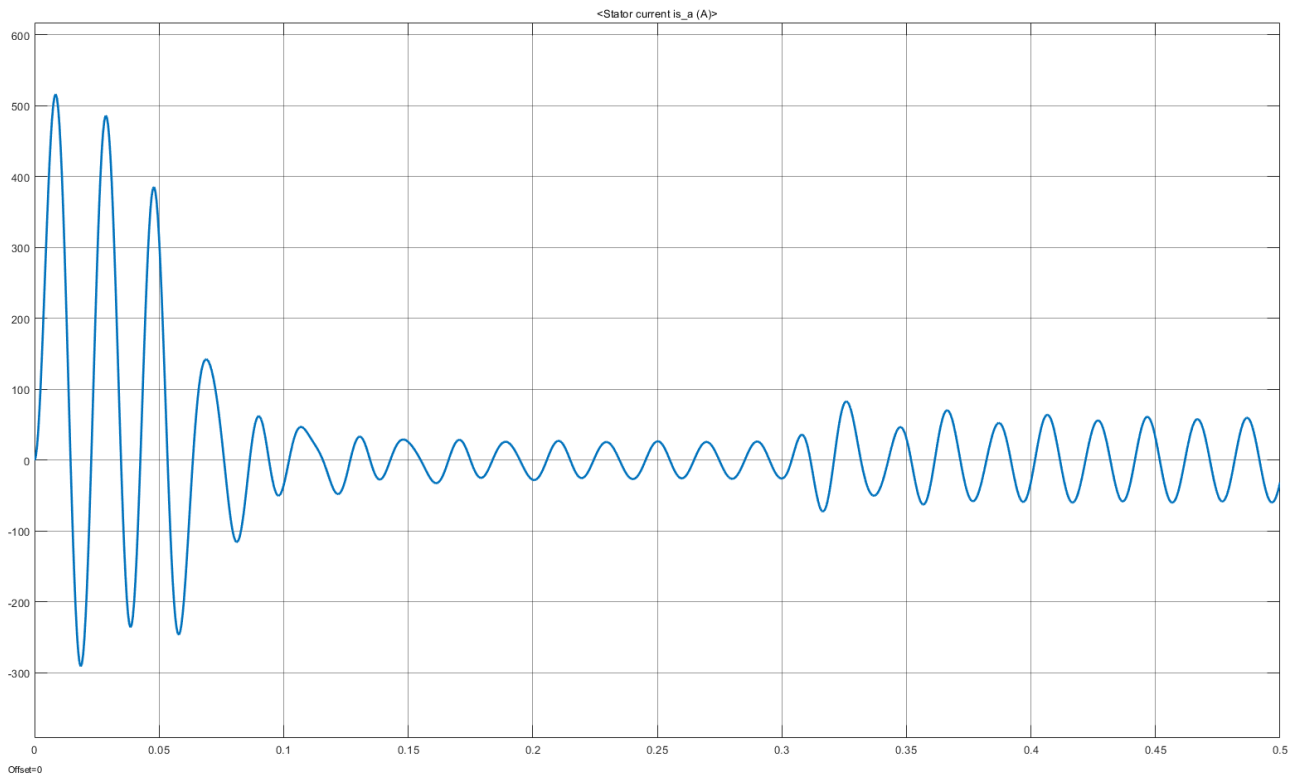


Figure A.9 - Current transients in phase A

We will write out the values of the current amplitudes in various modes:

$$i_p = 515,21 \text{ A} - \text{peak current amplitude};$$

$$i_0 = 26,62 \text{ A} - \text{the amplitude of the idle current};$$

$$i_n = 63,32 \text{ A} - \text{the amplitude of the rated current}.$$

In turn, the RMS values obtained earlier take the form of amplitude values according to a simple rule:

$$i_p = \sqrt{2} \cdot I_p = \sqrt{2} \cdot 308,644 = 436,488 \text{ A} - \text{peak current amplitude};$$

$$i_0 = \sqrt{2} \cdot I_0 = \sqrt{2} \cdot 18,8 = 25,3 \text{ A} - \text{the amplitude of the idle current};$$

$$i_n = \sqrt{2} \cdot I_n = \sqrt{2} \cdot 44,092 = 62,35 \text{ A} - \text{the amplitude of the rated current}.$$

As a result of numerical comparison, it can be understood that the error does not have critically large values and the model adequately describes the statics within

certain limits. So, for example, for the inrush current, the deviation in the percentage ratio is ; for the idle current; for the rated current.

We will also show the formation of a magnetic field, the phase portrait of which is shown in Fig A.10.

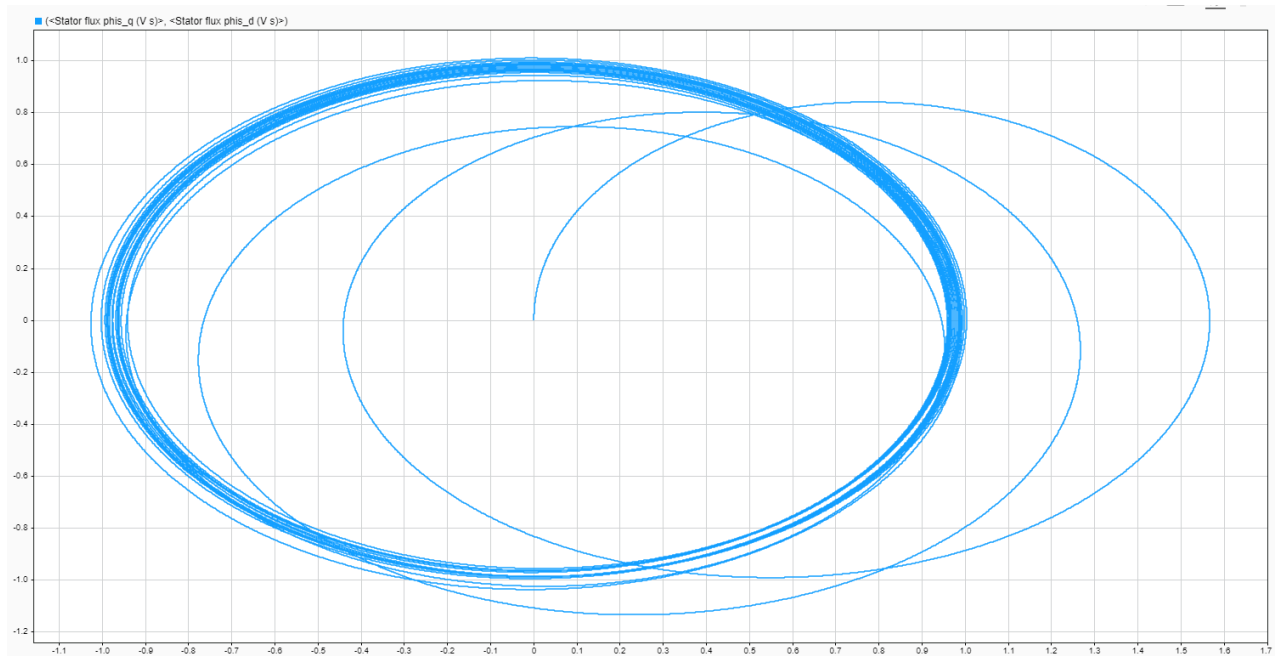


Figure A.10 – Phase portrait of the flow coupling vector of the stator

From the above figure, it can be seen that the flow coupling of the stator is set to a nominal value for some time, after which, in the time domain, the coordinates of the vector will change according to the harmonic law, and the phase portrait will degenerate into a circle and will have this shape until any change in the control / disturbing effects.

Conclusion

Thus, in the thesis, an asynchronous motor RA200LB6 was modeled, connected directly to the network at idle and under rated load. The curves of transients of angular velocity, electromagnetic moment, currents and flow coupling are obtained. The high convergence of the steady-state values of the dynamic mechanical characteristic and the static one calculated earlier is established. So, for example, the values of the nominal speeds differ by less than 0.5% and the impact moment is several times greater than the nominal one, which fits into the manufacturer's data, the same was done with respect to the phase currents of the stator. As a result, it can be concluded that the calculated parameters allow for adequate simulation within the framework of some assumptions inherent in the mathematical model of the asynchronous motor itself. And accordingly, with the help of them, you can create a simulation model of a frequency-controlled drive.

References

1. Fundamentals of cable technology: studies, for students. higher. studies, institutions /V.M. Leonov, [et al.]; edited by I.B. Peshkov. - M.: Publishing center "Academy",2006.-432 p.
2. Chernyshev, A. Yu. AC electric drive:a textbook for academic bachelor's degree / A. Yu. Chernyshev, Yu. N.Dementiev, I. A. Chernyshev. — Moscow: Yurayt Publishing House, 2019. — 215 p
3. Schreiner R. T. Mathematical modeling of AC electric drives with semiconductor frequency converters. – URO RAS, 2000