

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

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

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
<i>Асинхронный электропривод лебедки со скалярным управлением</i>

УДК 62-83-523:621.864

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
<i>3-5Г2Б1</i>	<i>Зырянов Илья Валерьевич</i>		

Руководитель

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

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

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

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
<i>Доцент кафедры ЭБЖ</i>	<i>Король Ирина Степановна</i>	<i>к.х.н., доцент</i>		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

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

Томск – 2017 г.

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

Институт Институт Электронного обучения (ИнЭО)
 Направление подготовки 140400 – Электроэнергетика и электротехника
 Кафедра Электропривод и электрооборудование (ЭПЭО)

УТВЕРЖДАЮ:
 И.о. зав. кафедрой
 _____ Дементьев Ю.Н.
 (Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

**ЗАДАНИЕ
 на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

дипломного проекта

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

Студенту:

Группа	ФИО
3-5Г2Б1	Зырянову Илье Валерьевичу

Тема работы:

Асинхронный электропривод лебедки со скалярным управлением

Утверждена приказом директора (дата, номер)	<u>ИнЭО от 17.04.2017г. №2687/с</u>
---	-------------------------------------

Срок сдачи студентом выполненной работы:	<u>14.06.2017 г.</u>
--	----------------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<p>Исходные данные к работе (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.).</p>	<p><i>Материалы преддипломной практики, техническая литература, техническая документации</i></p>
<p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов (аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</p>	<p><i>Введение; описание технологического процесса; обоснование и выбор системы электропривода; выбор элементов и расчет параметров силового канала регулируемого электропривода; расчет статических и динамических характеристик, Исследование имитационной модели асинхронного электропривода лебедки, социальная ответственность проекта; финансовый менеджмент; заключение.</i></p>
<p>Перечень графического материала</p>	<p><i>Схема электрическая принципиальная; Схема электрическая функциональная;</i></p>

		<i>Схема электрическая структурная; Имитационная модель ПЭД;</i>	
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы <i>(с указанием разделов)</i>			
Раздел		Консультант	
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение		<i>Доцент, к.э.н., Фигурко А.А.</i>	
Социальная ответственность		<i>Доцент, к.х.н., Король И.С.</i>	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	10.03.2017 г.
---	---------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
<i>Доцент</i>	<i>Чернышев А.Ю.</i>	<i>Кандидат технических наук</i>		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
<i>3-5Г2Б1</i>	<i>Зырянов И.В.</i>		

Реферат

Выпускная квалификационная работа содержит 79 страниц, 35 рисунков, 12 таблиц, 16 используемых источника.

Асинхронный частотно-регулируемый электропривод лебедки со скалярным управлением, имитационное моделирование.

Цель работы – разработать цифровой регулируемый электропривод лебедки, удовлетворяющий требованиям технического задания.

В ходе работы был разработан электропривод лебедки, отвечающий требованиям технического задания.

Работа выполнена в текстовом редакторе *Microsoft Word 2013*. Расчеты производились с помощью пакета прикладных программ *MathCAD 15*. Имитационное моделирование электропривода выполнено с помощью пакета программ *Matlab R2012a*.

Содержание

ВВЕДЕНИЕ.....	6
1 Общие вопросы проектирования.....	8
1.1 Принципы реализации систем управления частотно - регулируемых электроприводов	11
2 Основные разделы.....	13
2.1 Объект автоматизации	13
2.2 Обоснование выбора функциональной схемы электропривода переменного тока со скалярным управлением	14
2.3 Расчет параметров схемы замещения асинхронного двигателя	20
2.4 Расчет статических характеристик асинхронного двигателя.....	25
2.5 Структурная схема асинхронного двигателя	29
2.6 Расчет и моделирование переходных процессов пуска асинхронного двигателя прямым включением в сеть и при изменении нагрузки	30
2.7 Обоснование и выбор структурной схемы электропривода переменного тока со скалярным регулированием скорости и компенсацией момента ...	35
2.8 Расчет электромеханических и механических характеристик системы «Преобразователь частоты – асинхронный двигатель» с IR -компенсацией	37
2.9 Разработка схемы имитационной модели электропривода с компенсацией момента и законом регулирования частоты преобразователя	43
2.10 Имитационное моделирование переходных режимов электропривода при частотном скалярном управлении с компенсацией момента.....	45
3 Социальная ответственность	51
3.1 Производственная безопасность.....	53
3.2 Анализ вредных производственных факторов.....	54
3.3 Экологическая безопасность.....	58
3.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	58
3.5 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	59
4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение..	61
4.1 Инициализация проекта и его технико-экономическое обоснование.	63

4.2	Формирования плана и графика работ по проекту	69
4.3	Расчет сметы затрат на исследование.....	70
4.4	Определение экономической эффективности исследования	75
5	Заключение	77
	Список использованной рисунок литературы.....	78

ВВЕДЕНИЕ

В состав частотно-регулируемого электропривода переменного тока входит электродвигатель, управляемый электрический преобразователь и программируемый микроконтроллер. Структура такого привода для массового применения представляет собой следующее: сеть – неуправляемый выпрямитель – шины постоянного тока с конденсатором – инвертор напряжения на транзисторных модулях с широтно-импульсной модуляцией, управляемый процессором, – короткозамкнутый асинхронный электродвигатель (рис. 1). Малая масса преобразователя, совершенная защита, возможность полной диагностики состояния привода, управление от цифровых и аналоговых сигналов, простое и удобное программирование работы, синхронизация совместной работы электроприводов, взаимодействующих в технологическом процессе, и ряд других пользовательских качеств обеспечили частотно-регулируемому асинхронному электроприводу превосходство в классе массового регулируемого электропривода.

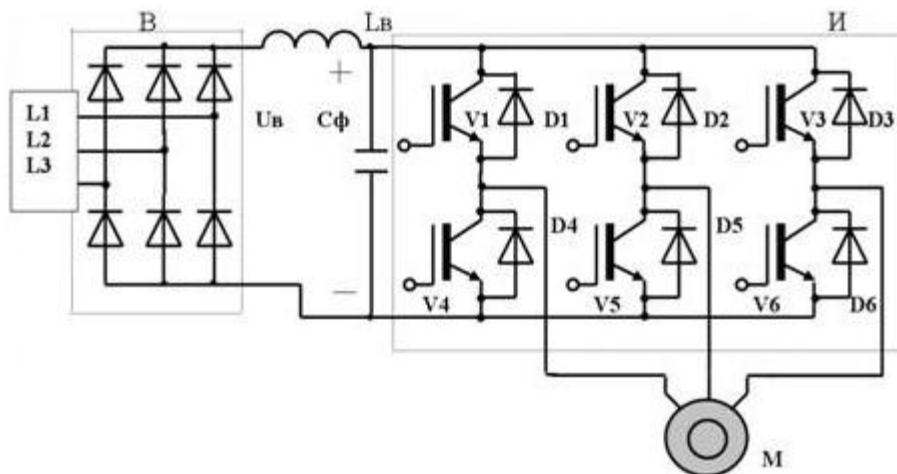


Рисунок 1 – Принципиальная схема частотно-регулируемого асинхронного электропривода

1 Общие вопросы проектирования

Наиболее эффективные способы регулирования скорости асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором связаны с изменением скорости вращения электромагнитного поля статора

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_1}{z_p}.$$

Из данного выражения следует два основных способа регулирования скорости вращения электромагнитного поля:

- изменением числа пар полюсов z_p ;
- изменением частоты f_1 напряжения статора двигателя.

Способы частотного регулирования скорости электроприводов переменного тока с короткозамкнутыми асинхронными двигателями находят все большее использование в различных отраслях техники. Преобразование переменного напряжения питающей сети в переменное напряжение с регулируемой частотой, напряжением и током осуществляют преобразователи частоты. В настоящее время преобразователи частоты выполняются на базе силовых полупроводниковых ключей. Быстрый рост преобразователей частоты стал возможен с появлением биполярных транзисторов с изолированным затвором, рассчитанных на токи до нескольких тысяч ампер, напряжения до нескольких киловольт и частоту коммутации 20 кГц и выше.

По типу связи с питающей сетью преобразователи частоты на полупроводниковых элементах делятся на два больших класса:

- преобразователи частоты с непосредственной связью;
- преобразователи частоты со звеном постоянного тока.

Преобразователи частоты со звеном постоянного тока, в свою очередь, подразделяются на:

- автономные инверторы тока (АИТ);

- автономные инверторы напряжения (АИН).

В своей структуре автономные инверторы содержат выпрямитель, силовой фильтр и инвертор, преобразующий постоянное напряжение (ток) в переменное напряжение (ток) заданной частоты.

В последние годы нашли применение автономные инверторы с ключами на силовых транзисторах типа *IGBT* и *MOSFET*. Асинхронный электропривод с автономным инвертором напряжения, выполненным на *IGBT*-транзисторах, приведен на рис. 2.

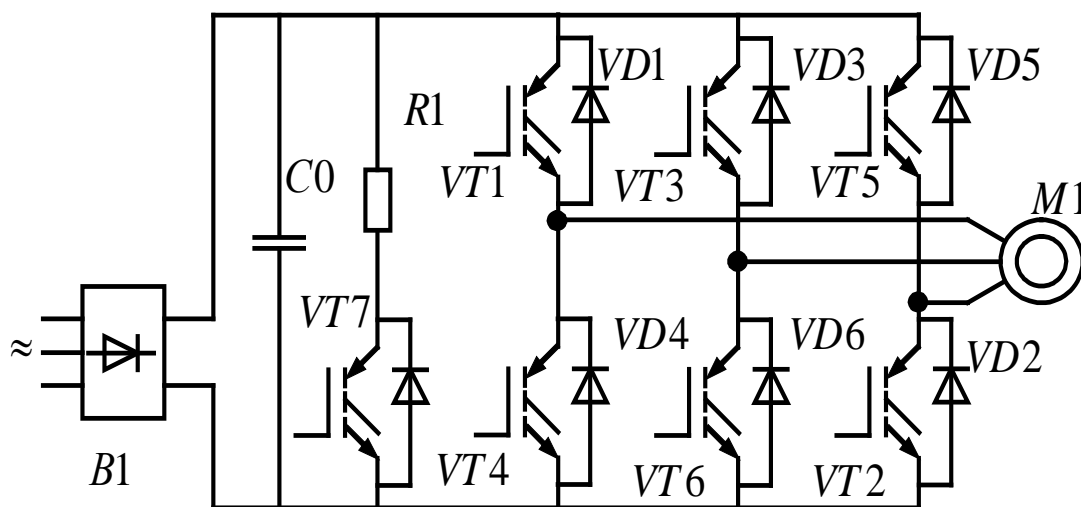


Рисунок 2 - Асинхронный электропривод с автономным инвертором напряжения, выполненным на *IGBT*-транзисторах

Индуктивный характер нагрузки учитывается подключением параллельно транзисторным ключам *VT1...VT6* диодов *VD1...VD6*, обеспечивающих непрерывность цепи протекания тока в обмотках статора при отключении их от источника питания и возврат запасенной электромагнитной энергии в конденсатор *C0* фильтра.

Так как *IGBT*-транзисторы могут переключаться при значительно больших частотах, чем тиристорные ключи, то и форма тока, протекающего через обмотки двигателя становится значительно ближе к синусоидальной. Очевидно, что чем выше несущая частота ШИМ, тем меньше амплитуда колебаний тока в обмотках статора двигателя. На рис.3 приведены

осциллограммы токов статора асинхронного двигателя при низкой и высокой несущей частоте опорного напряжения ШИМ модулятора.

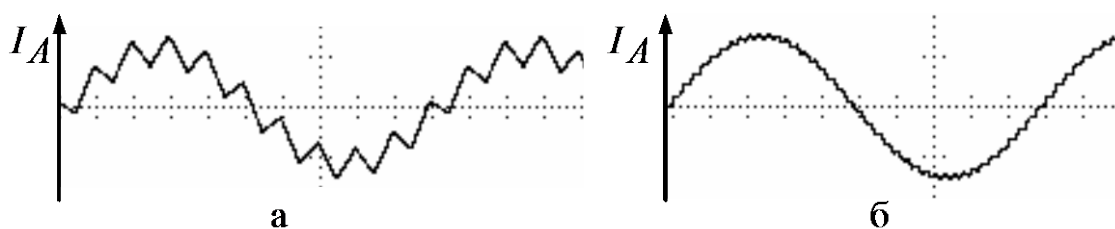


Рисунок 3 - Осциллограммы токов статора асинхронного двигателя при низкой (а) и высокой (б) несущей частоте опорного напряжения ШИМ модулятора

Однако чрезмерное увеличение несущей частоты может привести к перегреву двигателя и ключей инвертора. Чем выше частота коммутации ключей, тем выше потери энергии в них.

В электроприводах, имеющих в цикле работы участки рекуперации энергии, запасенной во вращающихся частях электропривода, или высокую интенсивность тормозных режимов для эффективного торможения приходится предусматривать специальный узел сброса энергии, состоящий из дополнительного ключа $VT7$ и резистора $R1$. Ключ $VT7$ открывается при превышении напряжения на емкости $C0$ сверхдопустимого значения, вследствие чего обеспечивается «сброс» энергии в резистор $R1$, рассеивающий эту энергию.

В структурах электроприводов с автономными инверторами напряжения, охваченными отрицательной обратной связью по току, инвертор приобретает свойства источника тока.

В электроприводах с автономными инверторами напряжения возможен режим векторного управления, что позволяет использовать их для процессов с повышенными требованиями к динамике и пусковому моменту. Кроме того, эти преобразователи совместно с асинхронными двигателями во многих случаях позволяют заменить более дорогой электропривод постоянного тока.

Применение автономных инверторов напряжения с индивидуальной коммутацией ключей позволяет регулировать выходное напряжение с помощью автономного инвертора, при постоянном неизменном напряжении на его входе. Если при этом частота переключения ключей существенно выше выходной частоты инвертора, то в спектре выходного напряжения кроме основной гармоники присутствуют лишь гармоники весьма высокого порядка, которые легко отфильтровываются индуктивностями двигателя.

Преимущества инверторов напряжения заключаются:

- в более жесткой выходной вольт-амперной характеристики
- в возможности достижения больших пределов регулирования частоты
- способность работать как с одним, так и с несколькими двигателями

Недостатки:

- большая емкость электролитического конденсатора C_0 фильтра
- мощности инверторов напряжения сравнительно небольшие 3-1500 кВА
- трудности обеспечения рекуперации электрической энергии в сеть в тормозных режимах

1.1 Принципы реализации систем управления частотно - регулируемых электроприводов

Под частотным управлением понимается управление электродвигателем переменного тока путем изменения амплитуды и частоты питающего напряжения. Частотное управление асинхронными электродвигателями осуществляется двумя основными способами (методами):

– скалярный (вольт–частотный) в соответствии с функциональной характеристикой, связывающей напряжение и частоту статора

электродвигателя $(\frac{U}{f} = const$ – линейный закон управления,

$\frac{U}{f^2} = const$ – квадратичный закон управления);

– векторный.

Современные частотно-регулируемые асинхронные электроприводы используют блочно-модульные принципы комплектования и реализуются по структурам скалярного и векторного частотного управления. Выбор структуры реализации и закона скалярного управления частотно-регулируемого асинхронного электропривода для конкретного производственного механизма определяется требованиями к статическим (в первую очередь к диапазону регулирования скорости) и динамическим характеристикам электропривода.

2. Основной раздел

2.1 Объект автоматизации

Лебёдка — механизм, тяговое усилие которого передается посредством каната, цепи, троса или иного гибкого элемента от приводного барабана. Привод лебёдки может быть ручным, электрическим, от двигателя внутреннего сгорания. Предназначается в основном для подъёма груза по вертикали, но иногда используется и для перемещения груза по горизонтали.

Обычная лебёдка с электроприводом состоит из электродвигателя, редуктора, барабана, рамы, тормозной системы. В случае необходимости некоторые лебёдки сочетают с полиспастом.

В зависимости от исполнения лебёдки можно подразделить: по типу тягового органа — на канатные и цепные; по типу установки — на неподвижные (закреплённые на полу, стене, потолке) и передвижные (на тележках, передвигающихся по полу или по подвесным путям); по числу барабанов — на одно-, двух- и многобарабанные лебёдки; по типу барабана — на нарезные, гладкие и фрикционные.

Как правило, тяговое усилие таких лебедок бывает от 3,2 до 125 кН, а скорость навивки каната на барабан от 0,5 до 0,1 метра в секунду.

Канатоемкость таких электрических лебедок находится в диапазоне от 80 до 800 метров. Впрочем, существует возможность заказать специальную лебедку с тяговым усилием от 100 до 320 кН и канатом 1000 - 1200 метров на барабане.

В том случае если проводятся работы по монтажу крупногабаритного и тяжелого оборудования рекомендуется применять тихоходные электрические лебедки со скоростью навивки каната на барабан не более 3 - 10 метров в минуту.

1 - электродвигатель; 2 - редуктор; 3 - барабан; 4 - станина

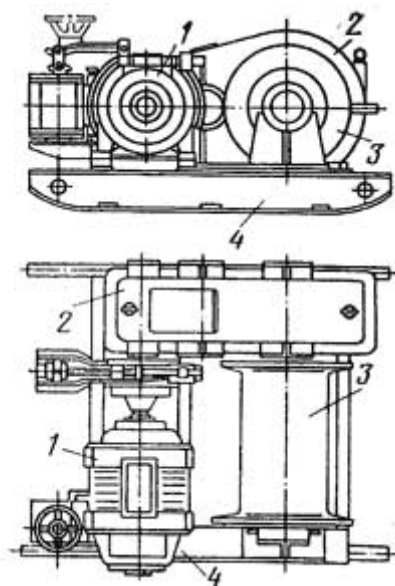


Рисунок 4 – Схема лебедки

2.2 Обоснование выбора функциональной схемы электропривода переменного тока со скалярным управлением

Обобщенная функциональная схема частотно-регулируемого асинхронного электропривода со скалярным управлением приведена на рис. 4. На схеме символом * обозначены сигналы задания и управления и приняты следующие обозначения:

$\Delta f_{1к}^*$, $\Delta U_{1к}^*$ – компенсационные сигналы управления соответственно в канале регулирования частоты и напряжения;

ω – фактическое значение угловой скорости вращения электродвигателя (ротора);

ЗИС – задатчик интенсивности скорости с линейной или S-образной характеристикой;

РС – регулятор скорости;

ФНУ1 – формирователь напряжений управления двухфазным асинхронным двигателем

$$U_{\alpha}^* = \sqrt{2} \cdot U_1 \cdot \sin 2\pi f_1, \quad U_{\beta}^* = \sqrt{2} \cdot U_1 \cdot \cos 2\pi f_1;$$

ФНУ2 – преобразователь напряжений управления двухфазным двигателем в напряжения управления трехфазным двигателем.

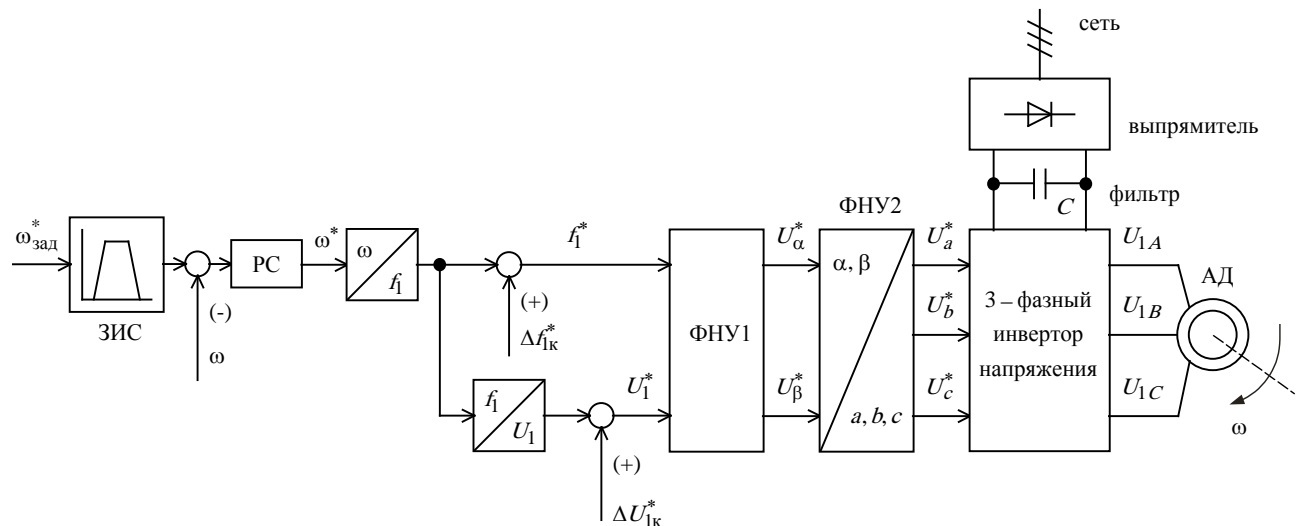


Рисунок 5 - Функциональная схема частотно-регулируемого асинхронного электропривода со скалярным управлением

На рис. 5 и 6 приведены функциональные схемы систем управления электроприводов со скалярным управлением фирмы *Siemens*.

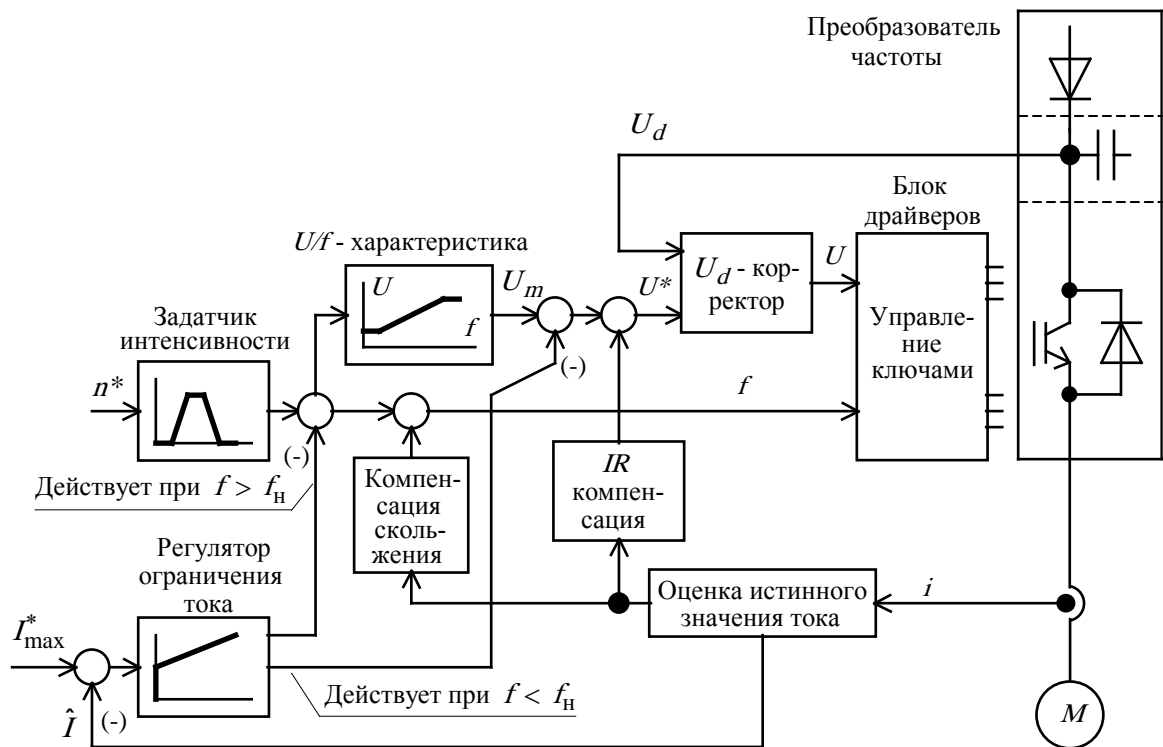


Рисунок 6 - Функциональная схема асинхронного электропривода со скалярным частотным управлением без датчика скорости

Закон частотного регулирования U/f при скалярном управлении выбирается в зависимости от характера нагрузки производственного механизма. Закон управления с линейной зависимостью между напряжением и частотой ($U_1/f_1 = const$) реализуется в преобразователях частоты для приводов производственных механизмов с постоянным моментом нагрузки. Поддержание постоянства отношения $U_1/f_1 = const$ обеспечивает постоянство потокосцепления и критического момента двигателя во всем диапазоне регулирования скорости изменением частоты. Однако это справедливо лишь при пренебрежимо малом активном сопротивлении обмотки статора, практически же при уменьшении частоты уменьшается и максимальный момент двигателя. В простейшем случае для повышения момента двигателя на малых скоростях вращения в преобразователях предусмотрена функция повышения начального значения выходного напряжения (начального напряжения вольт-частотной характеристики),

применяются модули U_d -коррекции и IR -компенсации (рис. 5). В результате достигается компенсация уменьшения момента двигателя для нагрузок с постоянным моментом сопротивления (например, конвейеры, поршневые компрессоры и насосы) или достигается увеличение пускового момента двигателя для нагрузок с высоким моментом трогания (например, экструдеры). Для регулируемых электроприводов центробежных насосов и вентиляторов используется квадратичная зависимость напряжения от частоты ($U_1/f_1^2 = \text{const}$). За счёт большего снижения напряжения двигателя при уменьшении частоты достигается уменьшение потребляемой электроприводом энергии.

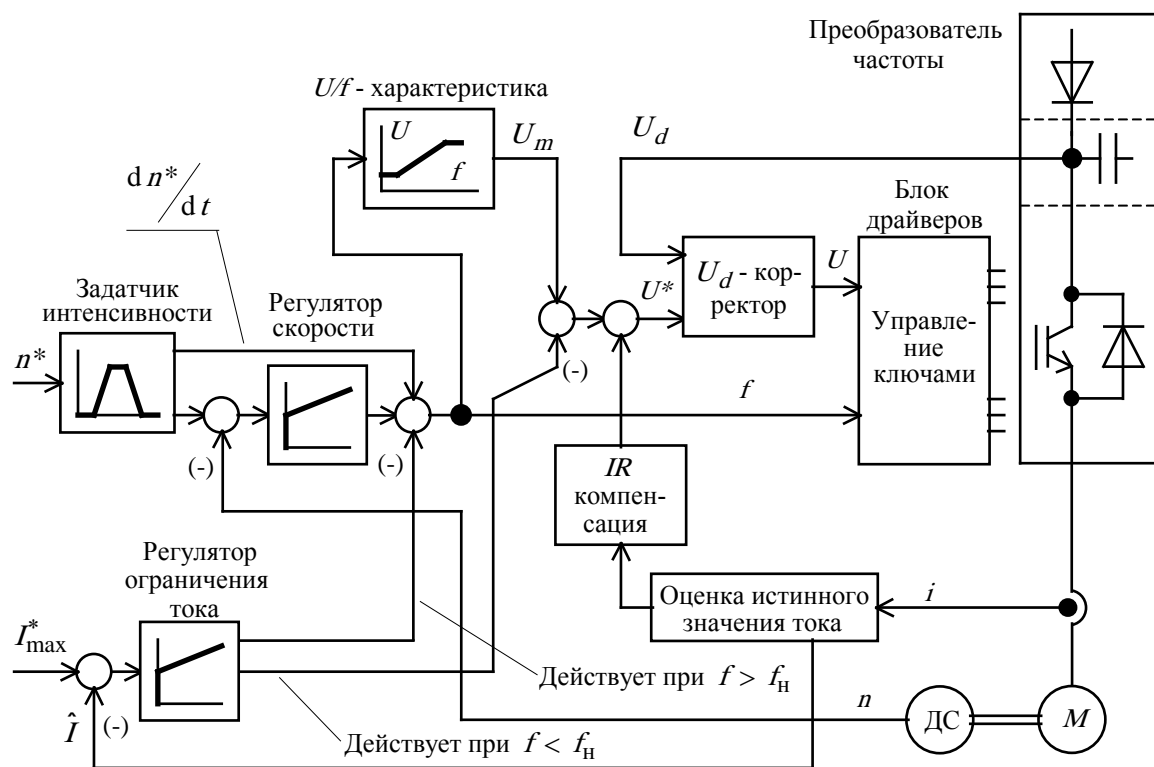


Рисунок 7 - Функциональная схема асинхронного электропривода со скалярным частотным управлением с датчиком скорости

Из-за ограниченной жесткости рабочей части механических характеристик асинхронных двигателей диапазон регулирования скорости в разомкнутых системах частотно-регулируемого асинхронного

электропривода не может быть более 1:10. Для расширения диапазона регулирования до 20 применяют компенсационные сигналы по скорости (скольжению) – модуль компенсации скольжения КС (рис. 5), до 100 – замкнутый контур регулирования с регулятором скорости РС и обратной связью по скорости с датчиком и регулятором скорости (рис.).

Для ограничения момента двигателя в пуско-тормозных режимах электропривода механизмов, у которых по технологии невозможны механические перегрузки, применяется задатчик интенсивности (ЗИС) с линейной или *S*-образной характеристикой, который устанавливается на входе электропривода в канале задания скорости. В электроприводах механизмов, для которых большие кратковременные перегрузки и стопорение двигателя являются рабочими режимами, дополнительно предусматривается система ограничения максимального допустимого тока электропривода с датчиком тока и регулятором тока. Выходной сигнал регулятора тока должен так воздействовать на напряжение и частоту статора, чтобы одновременно с ограничением тока происходило и ограничение момента двигателя на допустимом уровне.

Частотно-регулируемый асинхронный электропривод со скалярным управлением может быть и двухзонным, когда при частоте (скорости вращения) выше номинальной напряжение двигателя остаётся постоянным, равным номинальному напряжению. Длительно допустимый и кратковременно допустимый моменты двигателя в этом случае должны быть уменьшены на верхних скоростях.

Преобразователи частоты со скалярным управлением могут использоваться в многодвигательных электроприводах (без обратной связи по скорости) для управления параллельно включенными двигателями. Однако в этом случае необходимо будет решить проблемы распределения нагрузок механически взаимосвязанных двигателей и

предотвращения перегрузки отдельных не связанных между собой двигателей.

Системы *IR*-компенсации и компенсации скольжения представляют собой нелинейные положительные обратные связи и их применение необходимо только в области малых скоростей двигателя. Ограничение тока двигателя с помощью датчика и регулятора тока необходимо в системах электроприводов, в которых возможны кратковременные перегрузки. Это исключит аварийное отключение привода средствами защитной аппаратуры. Применение систем управления с датчиками и регуляторами скорости в электроприводах со скалярным управлением представляется нецелесообразным вообще, а тем более для двигателей с самовентиляцией.

Можно рекомендовать в приводах длительного режима работы с постоянной скоростью и диапазоном регулирования скорости не больше 1:10 и без особых требований к динамике применение простейших структур и законов частотного управления:

– при вентиляторном характере нагрузки разомкнутые структуры регулирования с квадратичным законом управления $\frac{U}{f^2} = const$ и возможно с корректировкой вольт-частотной характеристики в интервале малых частот;

– при постоянной нагрузке разомкнутые структуры с линейным законом управления $\frac{U}{f} = const$ с корректировкой вольт-частотной характеристики и возможно *IR*-компенсации в области малых частот.

Для систем регулируемых электроприводов при диапазоне регулирования скорости более 1:10 или с жесткими требованиями к динамике более целесообразно применять системы векторного управления без датчиков скорости.

2.3 Расчет параметров схемы замещения асинхронного двигателя

Выбираем электродвигатель общепромышленного назначения серии RA200LB6. Паспортные технические характеристики представлены ниже.

Технические характеристики RA200LB6

Высота оси вращения, мм.....	200
Мощность P_n , кВт.....	22
Синхронная частота вращения n_0 , об/мин.....	1000
Номинальная частота вращения n_n , об/мин.....	970
КПД при нагрузке 100% , о.е.....	0,87
$\cos\varphi$ при нагрузке 100% , о.е.....	0,84
Ток номинальный I_n , А.....	46
Кратность пускового тока $I_{пуск} / I_n$	6
Кратность пускового момента $M_{пуск} / M_n$	2
Кратность максимального момента M_{max} / M_n	2,5

Номинальное фазное напряжение: $U_{\text{фн}} = 220$ В

Номинальное напряжение сети: $U_{\text{ФН}} = 380$ В

Коэффициент загрузки двигателя: $p_{\text{ж}} = 0,75$ о.е.

Число пар полюсов: $p = 3$

Математическая модель асинхронного двигателя может быть представлена различными схемами замещения. Наиболее простой и удобной для расчетов асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором является Т-образная схема замещения:

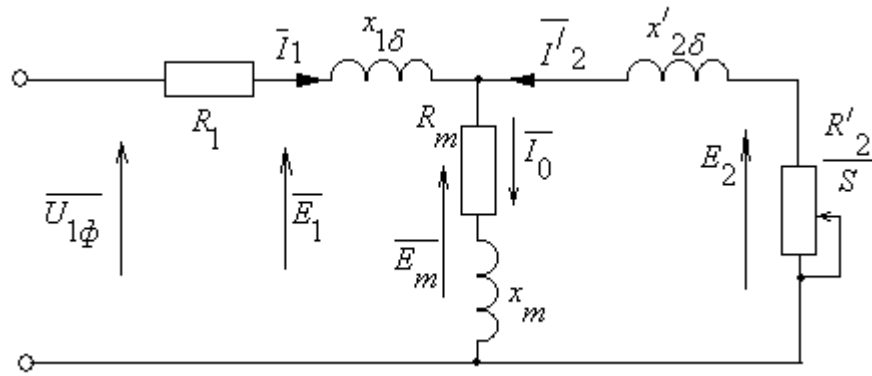


Рисунок 8 - Т-образная схема замещения асинхронного двигателя

где $U_{1\phi}$ – фазное напряжение, подводимое к обмотке статора двигателя;

I_1 – ток обмотки статора;

R_1 – активное сопротивление обмотки статора;

$X_{1\sigma}$ – индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора;

I'_2 – приведенный ток обмотки ротора к обмотке статора;

R'_2 – приведенное активное сопротивление цепи обмотки ротора к цепи обмотке статора;

$X'_{2\sigma}$ – приведенное индуктивное сопротивление рассеяния цепи обмотки ротора к цепи обмотке статора;

I_0 – ток холостого хода (намагничивания);

X_m – индуктивное сопротивление контура намагничивания.

Основные уравнения асинхронного двигателя, соответствующие данной схеме:

$$\bar{E}_m + j \cdot X'_2 \cdot \bar{I}'_2 + R'_2 \cdot \bar{I}'_2 / s = 0$$

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

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

Векторная диаграмма токов, ЭДС и напряжений изображена на рис.9.

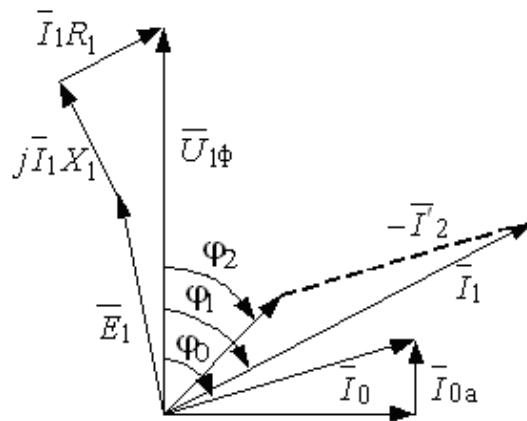


Рисунок 9 - Векторная диаграмма асинхронной машины

Найдем синхронную частоту вращения и номинальное скольжение:

$$\omega_0 = \frac{\pi \cdot n_0}{30} = 104,72 \text{ рад/с};$$

$$s_H = \frac{n_0 - n_H}{n_0} = 0,03 \text{ о.е.}$$

Ток холостого хода асинхронного двигателя определяется по формуле:

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

где I_{11} - ток статора двигателя при частичной нагрузке:

$$I_{11} = \frac{p_{\text{ж}} \cdot P_H}{3 \cdot U_{1H} \cdot \cos \varphi_{\text{РЖ}} \cdot \eta_{\text{НРЖ}}} = 33,5 \text{ А},$$

где $\eta_{\text{НРЖ}} = \eta_H = 0,985$ о.е. – КПД при частичной нагрузке;

$\cos \varphi_{\text{РЖ}}$ - коэффициент мощности при частичной нагрузке:

$$\cos \varphi_{\text{РЖ}} = \cos \varphi \cdot \left(\frac{\cos \varphi_{0,75}}{\cos \varphi} \right) = 0,827 \text{ о.е.},$$

где $\cos \varphi_{0,75} / \cos \varphi = 0,985$ – относительный коэффициент мощности при частичной нагрузке (из графика на рис.10).

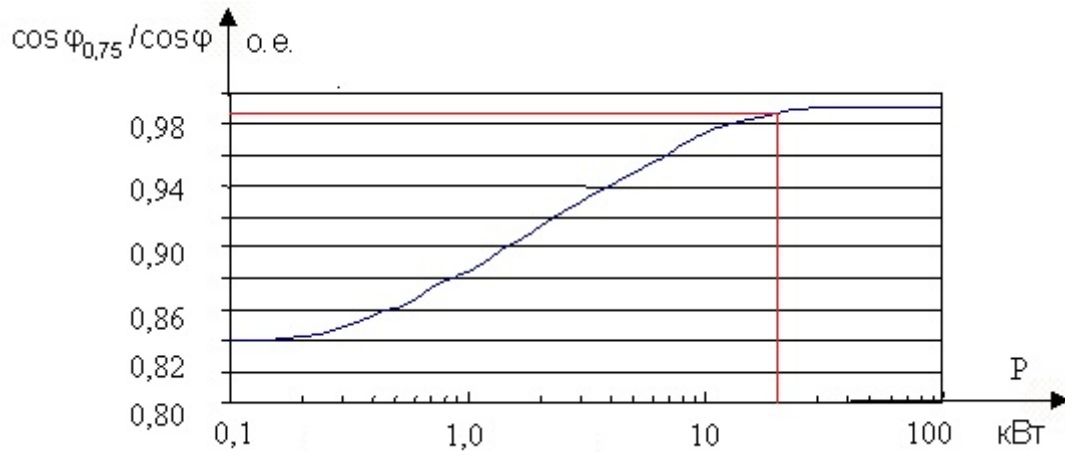


Рисунок 10 - Зависимость $\cos \varphi_{0,75} / \cos \varphi$ от мощности асинхронного двигателя

Номинальный ток статора двигателя:

$$I_{1H} = \frac{P_H}{3 \cdot U_{1H} \cdot \cos \varphi \cdot \eta_H} = 44 \text{ А.}$$

В итоге, ток холостого хода двигателя равен:

$$I_0 = \sqrt{\frac{I_{11}^2 \cdot (p_{\text{Ж}} \cdot I_{1H} \cdot \frac{1-s_H}{1-p_{\text{Ж}} \cdot s_H})^2}{1 - (p_{\text{Ж}} \cdot \frac{1-s_H}{1-p_{\text{Ж}} \cdot s_H})^2}} = 10,6 \text{ А.}$$

Из формулы Клосса определим соотношение для расчета критического скольжения. В первом приближении принимаем $\beta = 1,5$:

$$s_K = s_H \cdot \frac{k_{\text{max}} + \sqrt{k_{\text{max}}^2 - [1 - 2 \cdot s_H \cdot \beta \cdot (k_{\text{max}} - 1)]}}{1 - 2 \cdot s_H \cdot \beta \cdot (k_{\text{max}} - 1)} = 0,167 \text{ о.е.}$$

Найдем значения коэффициентов:

$$C_1 = 1 + \frac{I_0}{2 \cdot k_i \cdot I_{1H}} = 1,02 ;$$

$$A_1 = m \cdot U_{1H}^2 \cdot \frac{1 - s_H}{2 \cdot C_1 \cdot k_{max} \cdot P_H} = 1,255 .$$

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

$$R_2' = \frac{A_1}{\left(\beta + \frac{1}{s_K}\right) \cdot C_1} = 0,164 \text{ Ом.}$$

Активное сопротивление обмотки статора:

$$R_1 = C_1 \cdot R_2' \cdot \beta = 0,252 \text{ Ом.}$$

Определим параметр γ , который позволяет найти индуктивное сопротивление короткого замыкания X_{KH} :

$$\gamma = \sqrt{\left(\frac{1}{s_K}\right) - \beta^2} = 5,79 .$$

Найдем значение индуктивного сопротивления короткого замыкания:

$$X_{KH} = \gamma \cdot C_1 \cdot R_2' = 0,971 \text{ Ом.}$$

Найдем индуктивное сопротивление роторной обмотки, приведенное к статорной:

$$x_{2H}' = 0,58 \cdot \frac{X_{KH}}{C_1} = 0,552 \text{ Ом.}$$

Найдем индуктивное сопротивление статорной обмотки:

$$x_{1H} = 0,42 \cdot X_{KH} = 0,408 \text{ Ом.}$$

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

$$E_1 = \sqrt{(U_{1H} \cdot \cos \varphi - R_1 \cdot I_{1H})^2 + (U_{1H} \cdot \sqrt{1 - \cos^2 \varphi} + x_{1H} \cdot I_{1H})^2} = 221,451 \text{ В.};$$

Тогда индуктивное сопротивление намагничивания:

$$x_{\mu H} = \frac{E_1}{I_0} = 20,86 \text{ Ом.}$$

2.4 Расчет статических характеристик асинхронного двигателя

Расчет характеристик производим, используя параметры схемы замещения.

Рассчитаем и построим естественную электромеханическую характеристику:

$$I_1(\omega) = \sqrt{I_0^2 + I_2'(\omega)^2 + 2 \cdot I_0 \cdot I_2'(\omega) \cdot \sin \frac{X_{1H} + X'_{2H}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{\frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}}\right)^2 + (X_{1H} + X'_{2H})^2}}}$$

где $I_2'(\omega)$ - значение приведенного тока ротора от скольжения:

$$I_2' = \frac{U_{1H}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{\frac{\omega - \omega_0}{\omega_0}}\right)^2 + (x_{1H} + x'_{2H})^2}}$$

По вышеприведенным формулам рассчитываются естественные электромеханические характеристики $I_2'(\omega)$ и $I_1(\omega)$ (рис.11)

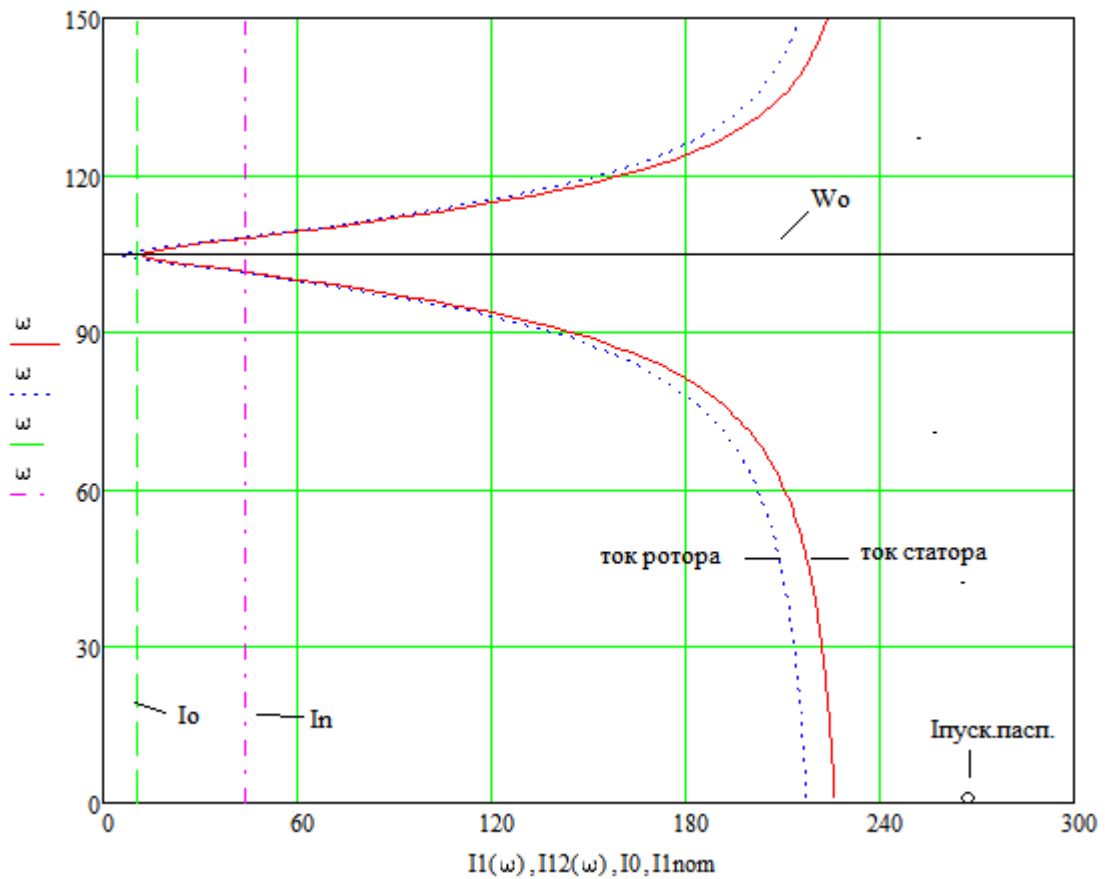


Рисунок 11 - Естественная электромеханическая характеристика для тока статора $I_1(\omega)$ и ротора $I_2^1(\omega)$

На рис..11 отмечены параметры электромеханической характеристики:

- пусковой ток двигателя, рассчитанный по паспортным данным:

$$I_{п.п} = k_i \cdot I_{1н} = 264 \text{ A};$$

- скорость холостого хода двигателя: $\omega_0 = 104,72 \text{ рад/с}$;

- ток холостого хода двигателя $I_0 = 10,6 \text{ A}$;

- номинальный ток статора двигателя: $I_{1н} = 44 \text{ A}$;

Рассчитаем и построим естественную механическую характеристику $M(\omega)$ по следующей формуле:

$$M(\omega) := \frac{3 \cdot U_{1H}^2 \cdot R'_2}{\omega_0 \cdot \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} \cdot \left[\left(R_1 + \frac{R'_2}{\frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}} \right)^2 + X_{KH}^2 \right]}$$

На рис..12 отмечены следующие параметры механической характеристики:

- номинальная скорость:

$$\omega_{НОМ} = \omega_0 \cdot (1 - s_H) = 101,6 \text{ рад/с};$$

- номинальный момент:

$$M_{НОМ} = \frac{P_{НОМ}}{\omega_{НОМ}} = 216,6 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

- критический момент двигательного режима:

$$M_K = \frac{3 \cdot U_{1H}^2}{2 \cdot \omega_0 (R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_{KH}^2})} = 552 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

- критический момент, рассчитанный по паспортным данным (отмечен черной точкой):

$$M_{K.P} = M_{НОМ} \cdot k_{max} = 541,5 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

- пусковой момент, определенный по графику:

$$M_{П} = 204 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

- пусковой момент, рассчитанный по паспортным данным (отмечен черной точкой):

$$M_{п.р} = M_{ном} \cdot k_{п} = 433,1 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

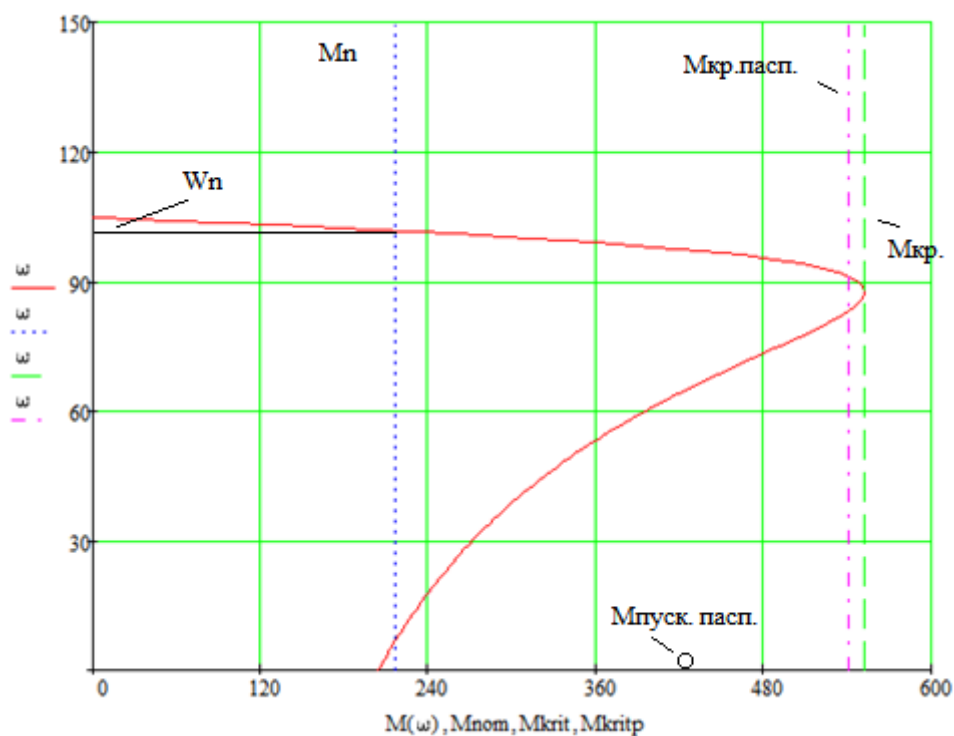


Рисунок 12 - Естественная механическая характеристика двигателя $M(\omega)$

Проанализировав значения контрольных точек, полученных аналитическим и графическим путем, можно сделать вывод, что критических различий не наблюдается. Рабочий участок характеристики формируется прогнозируемо относительно паспортных данных. Единственным значительно отличающимся результатом является значение пускового момента и пускового тока, это объясняется тем, что при скольжении близких к единице проявляется поверхностный эффект вытеснения тока в обмотке стержнях ротора, который не был учтен в расчетах.

2.5 Структурная схема асинхронного двигателя

На рис.13 представлена структурная схема асинхронного двигателя, управляемого по цепи обмоток статора изменением напряжения.

Структурная схема определяется без учета влияния электромагнитной инерции в цепях статора и ротора двигателя из упрощенной формулы Клосса

$$M = \frac{2 \cdot M_{\text{кн}} \cdot U_{\text{1н}}}{\frac{s}{s_{\text{к}}} + \frac{s_{\text{к}}}{s}}, \quad (2.5.1)$$

где $M_{\text{кн}}$ - критический момент двигателя при номинальном напряжении обмоток статора.

В формулу (2.5.1) подставим значение скольжения $s = (\omega_0 - \omega) / \omega_0$, и получим после преобразований

$$M = \frac{2 \cdot M_{\text{кн}} \cdot \omega_0 \cdot s_{\text{к}} (\omega_0 - \omega) U_{\text{1н}}^2}{(\omega_0 - \omega)^2 + s_{\text{к}}^2 \cdot \omega_0^2}. \quad (2.5.2)$$

Затем раскладываем уравнение (2.5.2), в ряд Тейлора в окрестности точки $M=0$ и $\omega = \omega_0$, пренебрегая членами высшего порядка малости получаем

$$\Delta M = k_{\text{м}} \cdot \Delta U_{\text{1н}} + k_{\beta} \cdot \Delta \omega, \quad (2.5.3)$$

где $k_{\text{м}} = \frac{\Delta M}{\Delta U_{\text{1н}}}$ - коэффициент чувствительности по моменту к изменению первой гармоники напряжения, Н·м·В⁻¹;

k_{β} - жесткость механической характеристики двигателя, Н·м·с/рад.

Уравнение движения для установившегося режима работы электропривода

$$M - M_{\text{с}} = M_{\text{дин}} = J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt}. \quad (2.5.4)$$

Подставим (2.5.3) в уравнение движения (2.5.4), получим, перейдя от приращений к абсолютным величинам,

$$k_M \cdot U_{1H} + k_B \cdot \omega - M_C = J_\Sigma \frac{d\omega}{dt}. \quad (2.5.5)$$

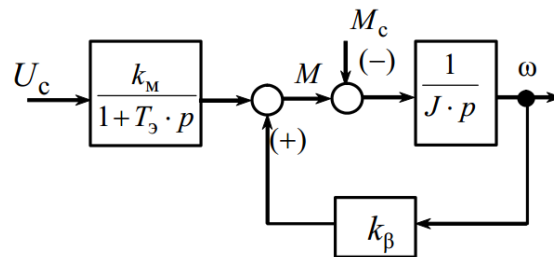


Рисунок 13 – Структурная схема асинхронного двигателя

2.6 Расчет и моделирование переходных процессов пуска асинхронного двигателя прямым включением в сеть и при изменении нагрузки

Моделирование асинхронного двигателя осуществим с помощью программы *MATLAB Simulink*.

Для создания имитационной модели необходимо знать следующие параметры двигателя.

Индуктивность фазы обмотки статора:

$$L_{1\sigma} = \frac{X_{1H}}{2 \cdot \pi \cdot f_{1H}} = 0,001299 \text{ Гн.}$$

Индуктивность фазы обмотки ротора:

$$L_{2\sigma} = \frac{X'_{2H}}{2 \cdot \pi \cdot f_{1H}} = 0,001758 \text{ Гн.}$$

Индуктивность цепи намагничивания:

$$L_\mu = \frac{X_{\mu H}}{2 \cdot \pi \cdot f_{1H}} = 0,066 \text{ Гн.}$$

Имитационная модель изображена на рис.14.

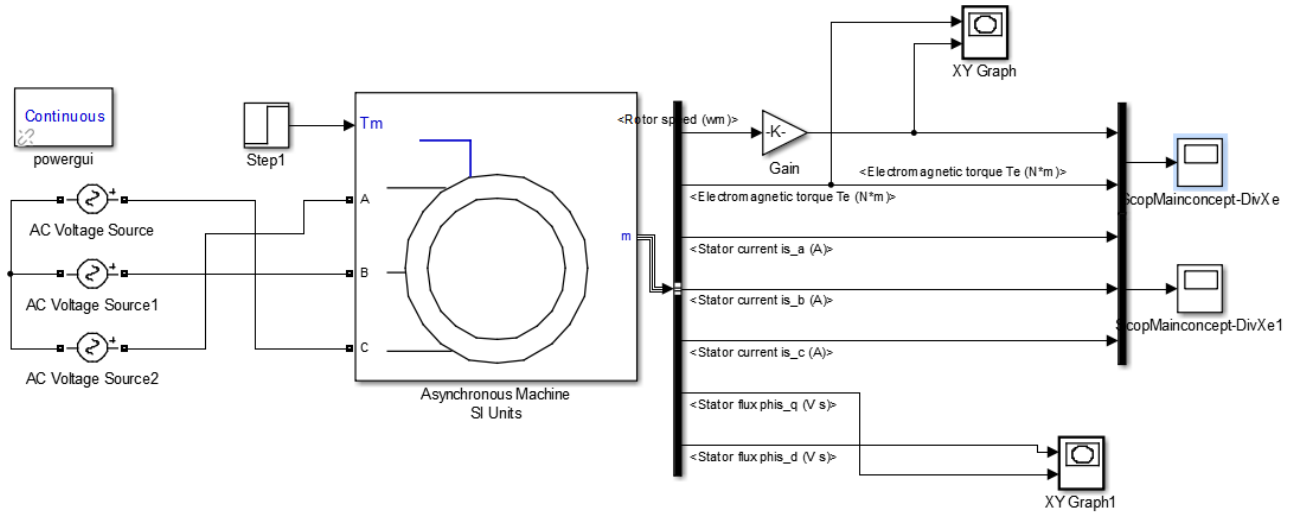


Рисунок 14 - Имитационная модель прямого пуска асинхронного двигателя

На рис.15 представлены заданные параметры схемы замещения.

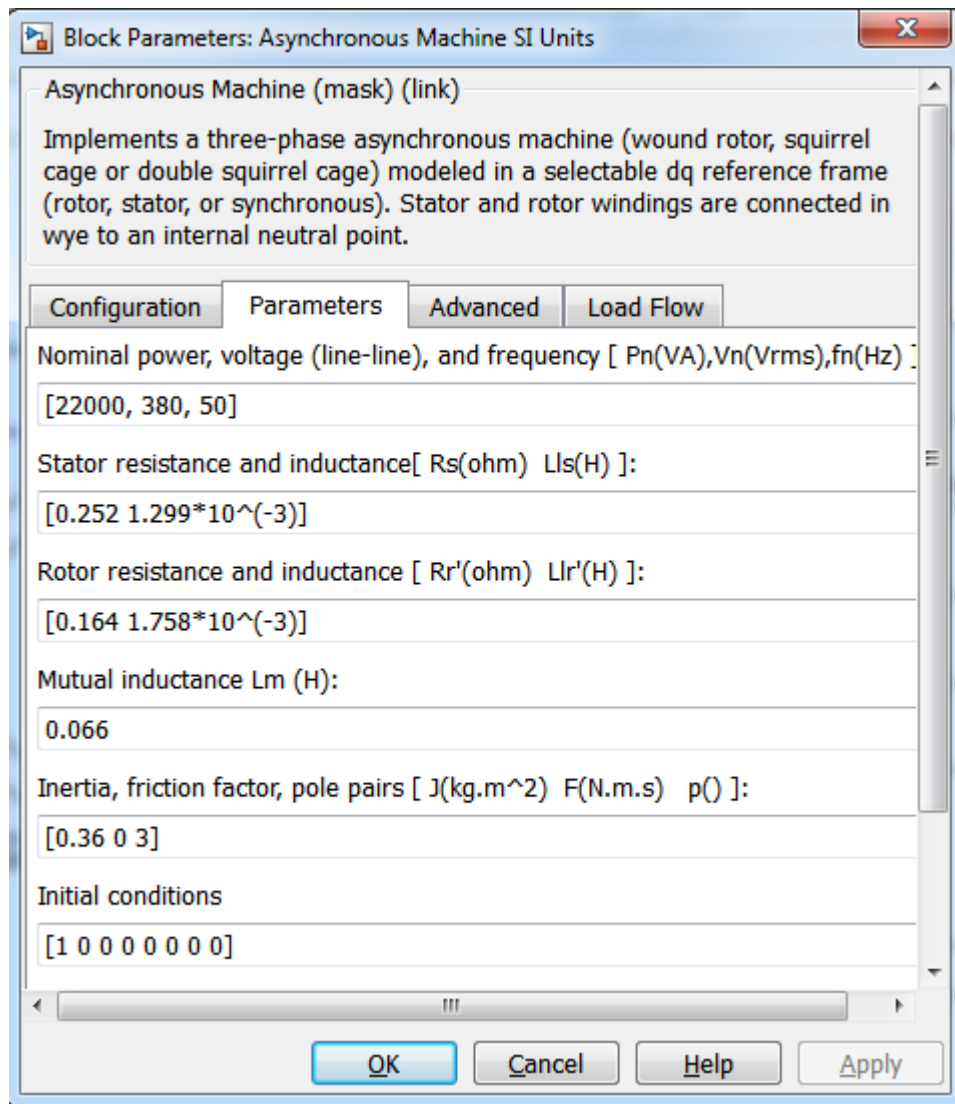


Рисунок 15 – Параметры схемы замещения

Ниже представлены переходные характеристики скорости и момента (рис.16), а также динамическая характеристика (рис.17) при прямом пуске АД без нагрузки и при набросе нагрузки.

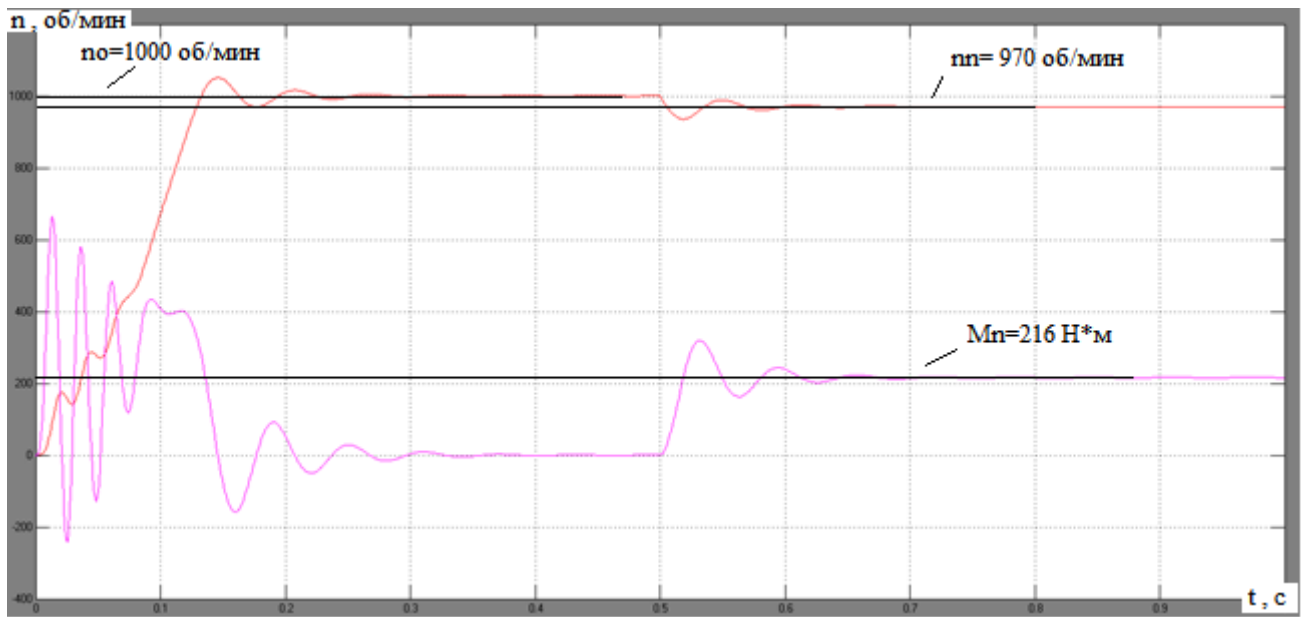


Рисунок 16 - Переходная характеристика скорости и момента ротора АД при прямом пуске

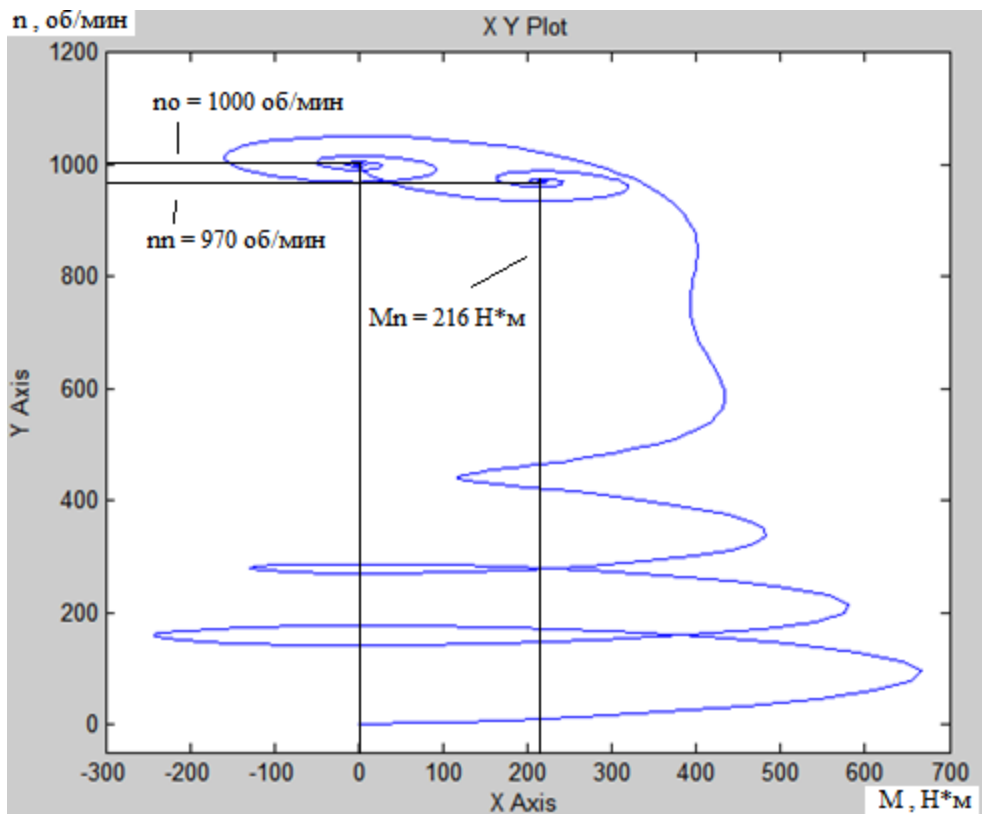


Рисунок 17 - Динамическая механическая характеристика двигателя

На рис. 18 представлена зависимость, которая показывает вращение поля статора двигателя в координатной системе d, q .

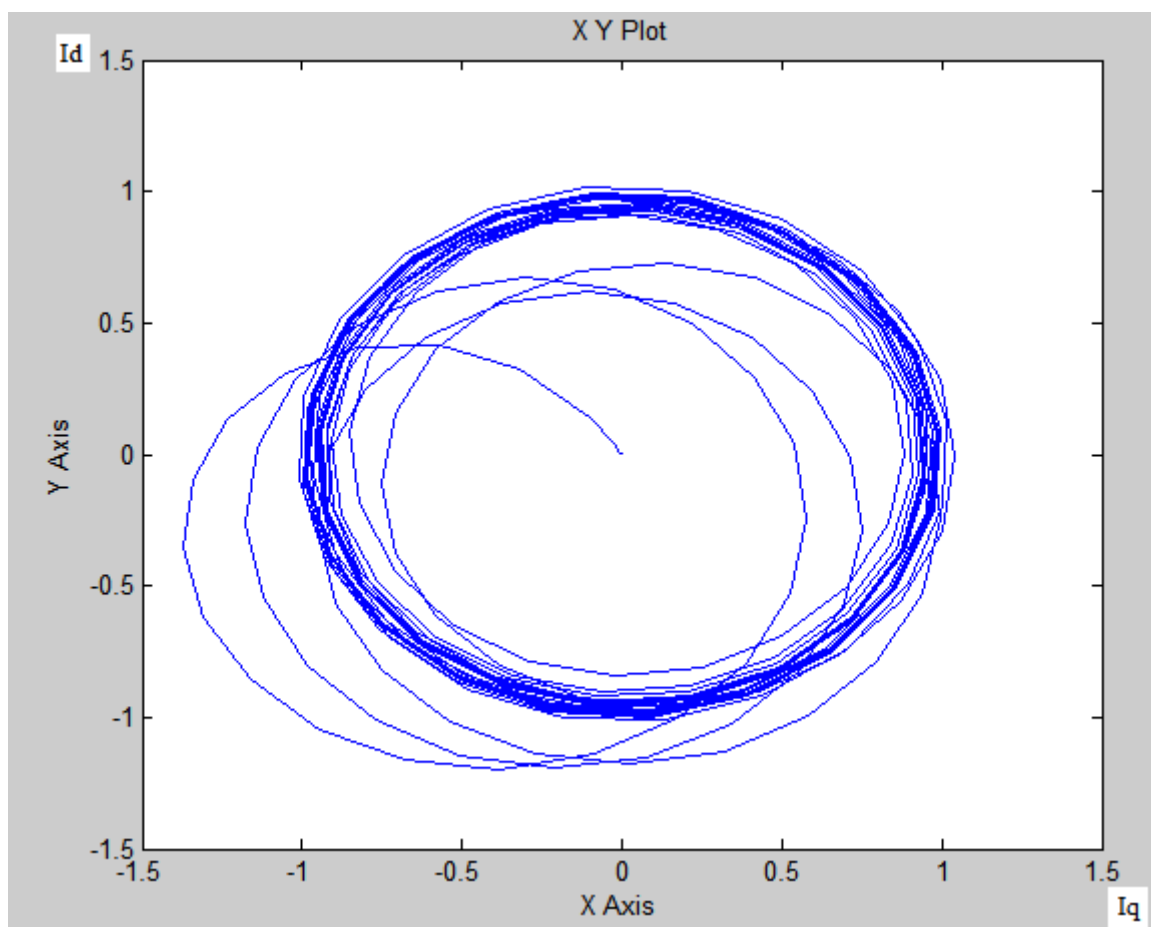


Рисунок 18 - Вращающееся поле статора в координатной системе d, q .

Приведенные выше характеристики показывают адекватность работы модели двигателя. В табл. 1 сведены расчетные параметры и параметры, полученные с имитационной модели по скорости и моменту двигателя.

Таблица 1

Параметр	Расчетная модель	Имитационная модель
n_0 , об/мин	1000	1000
n_H , об/мин	970	970
M_H , Н·м	216,5	216,5

Значения скорости идеального холостого хода и номинальной скорости при номинальной нагрузке совпадают с расчетными. В качестве нагрузки примем номинальное значение.

2.7 Обоснование и выбор структурной схемы электропривода переменного тока со скалярным регулированием скорости и компенсацией момента

Теоретически и практически доказано, что в классе законов U_{1j} / f_{1j} невозможно одновременно обеспечить удовлетворительные механические и энергетические характеристики в широком диапазоне скоростей и изменения нагрузки. Основная причина этого – возрастания влияния активного сопротивления обмотки статора при снижении частоты питающего напряжения. В асинхронных частотно-регулируемых электроприводах со скалярным управлением, кроме законов U_{1j} / f_{1j} , получили применение и другие законы регулирования: E_1 / f_1 , E_m / f_1 , E'_2 / f_1 .

На практике наибольшее распространение получили такие способы частотного регулирования скорости как $E_{1j} / f_{1j} = const$, $E_{1j} / f_{1j}^2 = const$, $E_{1j} / \sqrt{f_{1j}} = const$. При регулировании скорости в классе законов E_{1j} / f_{1j} необходимо повышать фазное напряжение $U_{1j} = E_{1j} + I_1 \cdot R_1$ на величину падения напряжения $I_1 \cdot R_1$ на активном сопротивлении обмотки статора, а способ регулирования скорости асинхронного двигателя получил название – частотное регулирование с IR-компенсацией.

Структурная схема системы скалярного частотного управления с IR-компенсацией приведена на рис..19

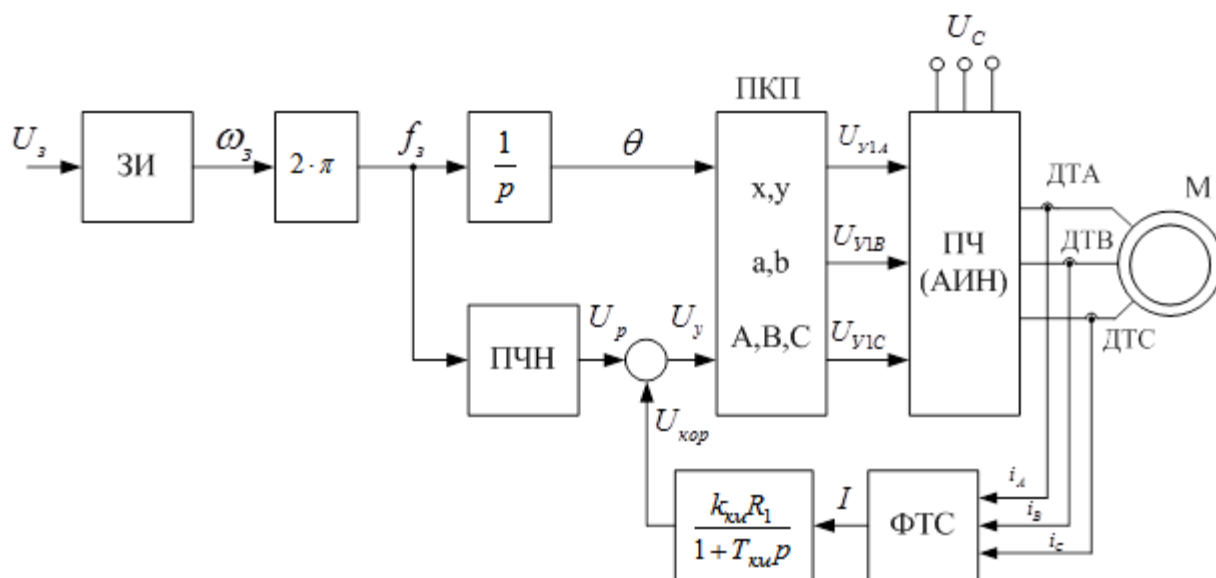


Рисунок 19 - Структурная схема системы скалярного частотного управления с IR-компенсацией

Задатчик интенсивности формирует кривую и темп разгона двигателя. При дистанционном управлении электроприводом сигналом задания скорости является задающее напряжение U_3 . Ему соответствует задающая частота f_3 местного управления, в этом случае управление пуском и остановом двигателем производится с панели преобразователя. Блок “преобразователь частота-напряжение” ПЧН формирует требуемую зависимость скалярного управления между частотой и напряжением преобразователя, чем и устанавливается принятый закон частотного регулирования $E_{1j}/f_{1j} = \text{const}$.

При скалярной IR-компенсации сигнал управления U_y является суммой сигналов регулирования U_p и положительной обратной связи по току $U_{кор}$:

$$U_y = U_p + U_{кор} = U_p + k_{км} \cdot R_1 \cdot I ,$$

где $k_{км}$ – коэффициент положительной обратной связи по току;

R_1 - активное сопротивление фазы обмотки статора АД;

I – сигнал пропорциональный действующим значениям токов i_a, i_b, i_c обмоток статора АД.

Сигнал управления является входным для прямого координатного преобразователя (ПКП), на выходе которого формируется три синусоидальных напряжения управления U_{1yA} , U_{1yB} , U_{1yC} сдвинутые относительно друг друга на угол $\pm 2\pi/3$, с амплитудами пропорциональными напряжению управления. Сигналы U_{1yA} , U_{1yB} , U_{1yC} формируют фазные напряжения на выходе автономного инвертора напряжения (АИН).

2.8 Расчет электромеханических и механических характеристик системы «Преобразователь частоты – асинхронный двигатель» с *IR*-компенсацией

Расчет характеристик производим для частот $f_1=50;30;15;5$ Гц. При законе регулирования:

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

Найдем относительные значения частот питающего напряжения:

$$\text{- при } f_{1н1}=50 \text{ Гц} \quad \text{-} \quad f_{1ж1} = \frac{f_{1н1}}{f_{1н}} = \frac{50}{50} = 1;$$

$$\text{- при } f_{1н2}=30 \text{ Гц} \quad \text{-} \quad f_{1ж2} = \frac{f_{1н2}}{f_{1н}} = \frac{30}{50} = 0,6;$$

$$\text{- при } f_{1н3}=15 \text{ Гц} \quad \text{-} \quad f_{1ж3} = \frac{f_{1н3}}{f_{1н}} = \frac{15}{50} = 0,3;$$

$$\text{- при } f_{1н4}=5 \text{ Гц} \quad \text{-} \quad f_{1ж4} = \frac{f_{1н4}}{f_{1н}} = \frac{5}{50} = 0,1.$$

Найдем фазное напряжение обмотки статора двигателя:

$$U_{1H1} = Z_p \cdot f_{1H1} = 4,4 \cdot 50 = 220 \text{ В};$$

$$U_{1H2} = Z_p \cdot f_{1H2} = 4,4 \cdot 30 = 132 \text{ В};$$

$$U_{1H3} = Z_p \cdot f_{1H} = 4,4 \cdot 15 = 66 \text{ В};$$

$$U_{1H2} = Z_p \cdot f_{1H2} = 4,4 \cdot 5 = 22 \text{ В}.$$

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

$$\omega_{01} = \frac{2\pi \cdot f_{1H1}}{p} = 104,7 \text{ рад/с};$$

$$\omega_{02} = \frac{2\pi \cdot f_{1H2}}{p} = 62,8 \text{ рад/с};$$

$$\omega_{03} = \frac{2\pi \cdot f_{1H3}}{p} = 31,4 \text{ рад/с};$$

$$\omega_{04} = \frac{2\pi \cdot f_{1H4}}{p} = 10,5 \text{ рад/с}.$$

Построим вольт-частотную характеристику для закона регулирования

$$\frac{U_1}{f_1} = \text{const} \text{ (рис.20)}.$$

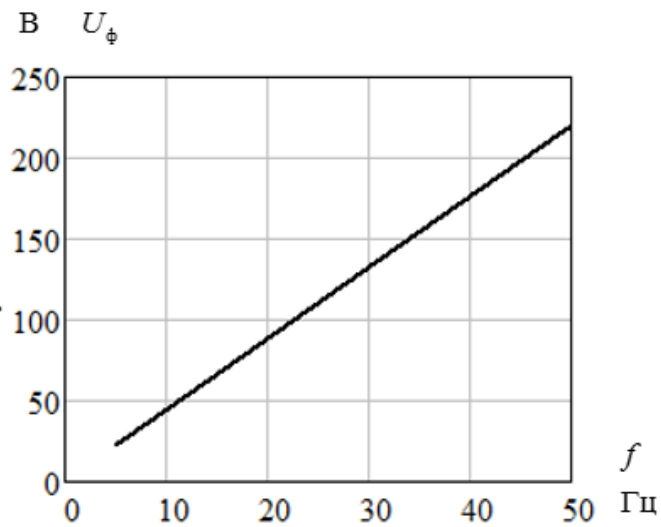


Рисунок 20 - Вольт-частотная характеристика при $\frac{U_1}{f_1} = const$

Строим электромеханические характеристики $I_2^1(\omega)$ для выбранных частот по выражениям:

$$I_2^1(s, f) = \frac{U_{1H}(f)}{\sqrt{(R_1 + \frac{R_2'}{s})^2 + X_{кн}^2 \cdot f_{1ж}^2(f) + (\frac{R_1 \cdot R_2'}{s \cdot X_{\mu H}} \cdot f_{1ж}(f))^2}},$$

где $\omega(s, f) = \omega_0(f) \cdot (1 - s)$.

Строим семейство электромеханических характеристик с IR компенсацией и без неё для каждой из фиксированной частот $f_1=50;30;15;5$ Гц. Принимаем следующие коэффициенты IR компенсации:

$$K_{KM1} = 0,25; K_{KM2} = 0,5; K_{KM3} = 0,75.$$

Тогда, с учетом IR компенсации сопротивления статора двигателя будут равны:

$$R_{\text{эKB1}} = R_1(1 - K_{KM1}) = 0,189;$$

$$R_{\text{эKB2}} = R_1(1 - K_{KM2}) = 0,126;$$

$$R_{\text{экв3}} = R_1(1 - K_{\text{км3}}) = 0,063.$$

На рис.21 представлены электромеханические характеристики $I_2^1(\omega)$ двигателя с IR -компенсацией.

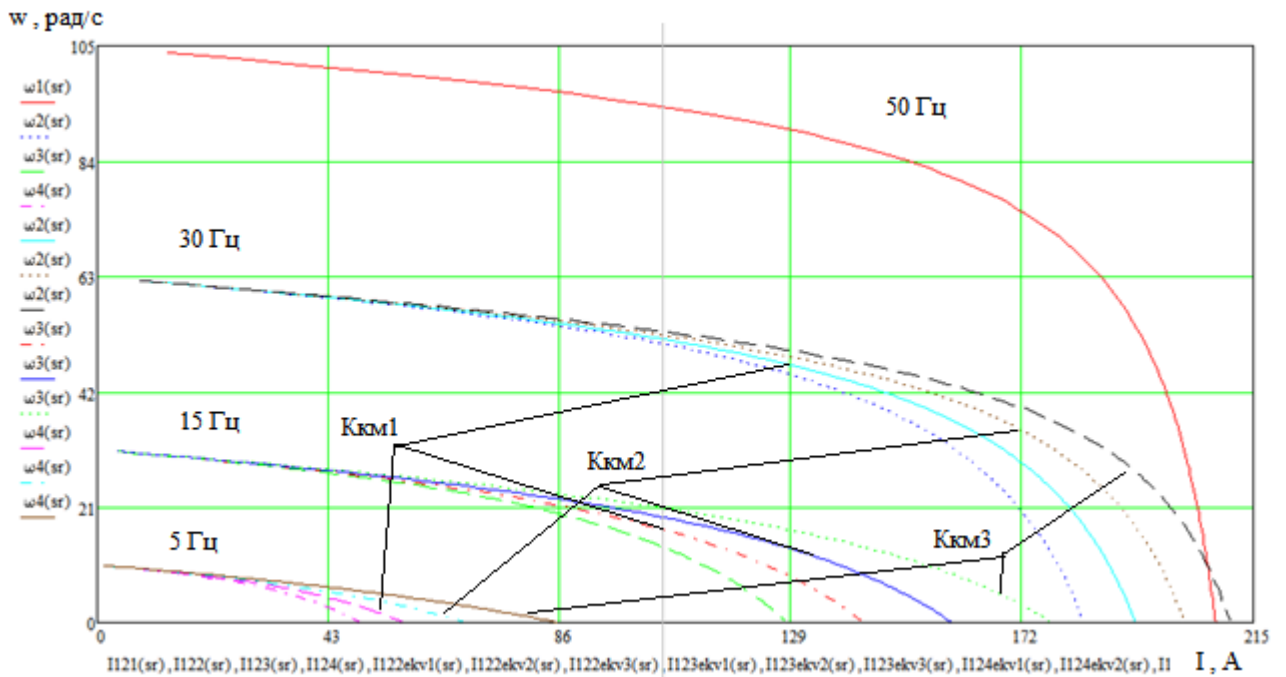


Рисунок 21 - Искусственные электромеханические характеристики $I_2^1(\omega)$ с IR -компенсацией

Строим электромеханические характеристики $I_1(\omega)$ для выбранных частот по выражениям:

$$I_1(s, f) = \sqrt{I_0^2 + (I_2^1(s, f))^2 + 2 \cdot I_0 \cdot I_2^1(s, f) \cdot \frac{X_{\text{кн}} \cdot f_{1\text{ж}}(f)}{\sqrt{(R_1 + \frac{R_2'}{s})^2 + X_{\text{кн}}^2 \cdot f_{1\text{ж}}^2(f)}}};$$

где $\omega(s, f) = \omega_0(f) \cdot (1 - s)$.

Рассчитаем токи холостого хода для каждого значения частоты:

-при $f_{1н1}=50$ Гц -
$$I_{01} = \frac{U_{1н}}{\sqrt{R_1^2 + (X_{1н} + X_{\mu H})^2 \cdot f_{1ж1}}} = 22,546A ;$$

- при $f_{1н2}=30$ Гц -
$$I_{02} = \frac{U_{1н2}}{\sqrt{R_1^2 + (X_{1н} + X_{\mu H})^2 \cdot f_{1ж2}}} = 17,46A ;$$

- при $f_{1н2}=15$ Гц -
$$I_{03} = \frac{U_{1н3}}{\sqrt{R_1^2 + (X_{1н} + X_{\mu H})^2 \cdot f_{1ж3}}} = 12,339A ;$$

- при $f_{1н4}=5$ Гц -
$$I_{04} = \frac{U_{1н4}}{\sqrt{R_1^2 + (X_{1н} + X_{\mu H})^2 \cdot f_{1ж4}}} = 7,108A .$$

На рис.22 представлены электромеханические характеристики $I_1(\omega)$ двигателя с IR-компенсацией.

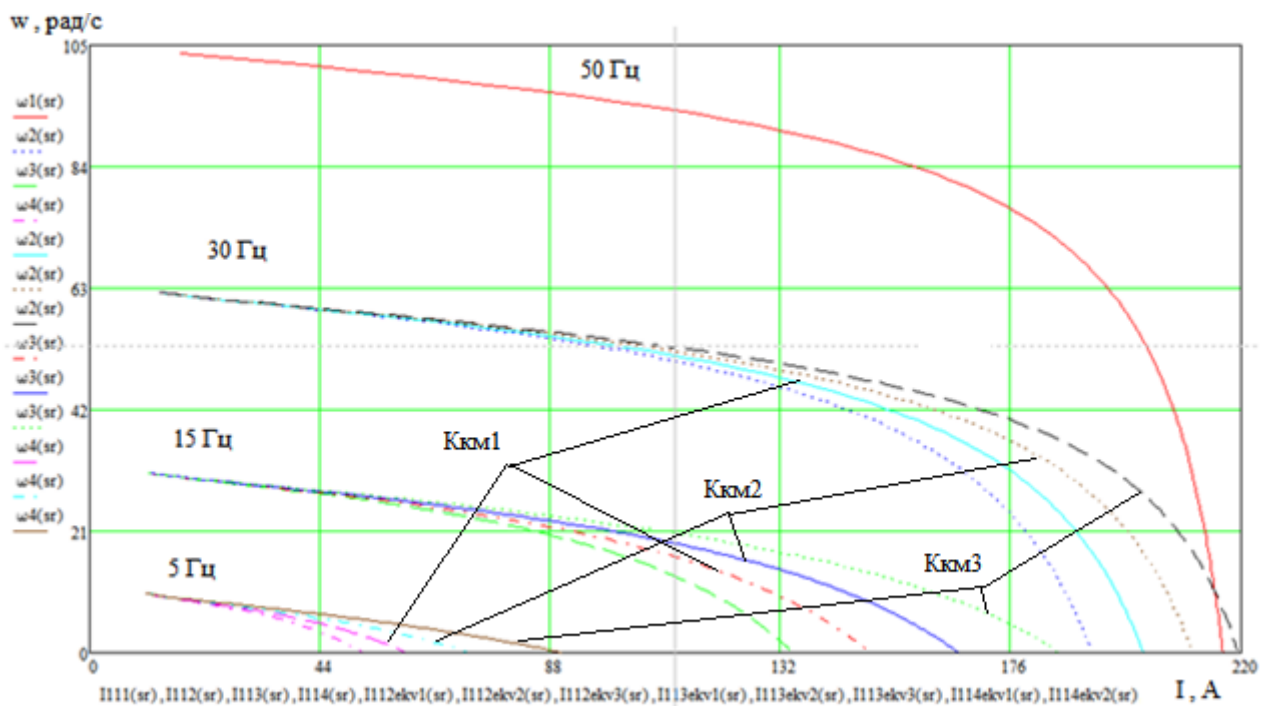


Рисунок 22 - Искусственные электромеханические характеристики $I_1(\omega)$ с IR-компенсацией

Строим механические характеристики $M(\omega)$ для выбранных частот по выражениям:

$$M(s, f) = \frac{3 \cdot (U_{1н}(f))^2 \cdot R_2^1}{\omega_0(f) \cdot s \cdot \left[X_{кн}^2 \cdot (f_{1ж}(f))^2 + \left(R_1 + \frac{R_2^1}{s} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2^1}{s \cdot X_{\mu к} \cdot f_{1ж}(f)} \right)^2 \right]}$$

где $\omega(s, f) = \omega_0(f) \cdot (1 - s)$.

На рис.23 представлены механические характеристики $M(\omega)$ двигателя с IR-компенсацией.

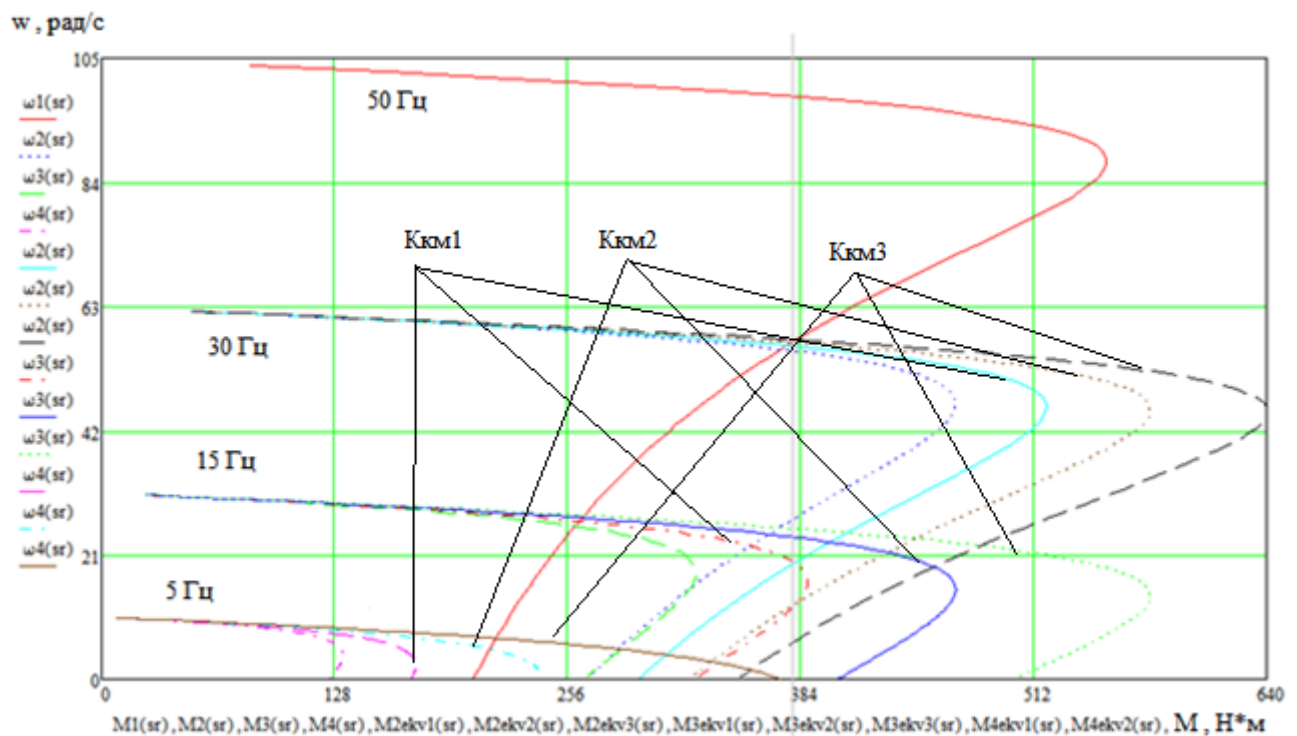


Рисунок 23 - Искусственные механические характеристики $M(\omega)$ с IR-компенсацией

При работе на естественной характеристике ($f=50$ Гц) IR-компенсация не применяется, так как фазное напряжение повышается выше номинального что недопустимо.

По рис.21-22 видно, что при увеличении коэффициента компенсации момента $K_{кз}$ токи короткого замыкания $I_{кз}$ имеют большие значения, причем эти различия тем больше, чем меньше частота обмоток статора f_1 . Это объясняется тем, что при малых частотах больше доля падения

напряжения на активном сопротивлении R_1 , следовательно, больше доля компенсации.

По рис.23 видно, что при увеличении коэффициента компенсации момента K_{KM} критический момент увеличивается, а характеристики становятся более жесткими. На графике различия в критическом и пусковом моментах при различных K_{KM} не так заметны. Это можно объяснить тем, что мощность двигателя велика и сопротивление его статорной обмотки мало, а соответственно и падение напряжения на ней невелико.

2.9 Разработка схемы имитационной модели электропривода с компенсацией момента и законом регулирования частоты преобразователя

По типологии выбранной структурной схемы электропривода, представленной в разделе 2.7 рис.19, в среде *MATLAB Simulink* была разработана имитационная модель асинхронного электропривода с компенсацией момента. Вид имитационной модели представлен на рис.24 .

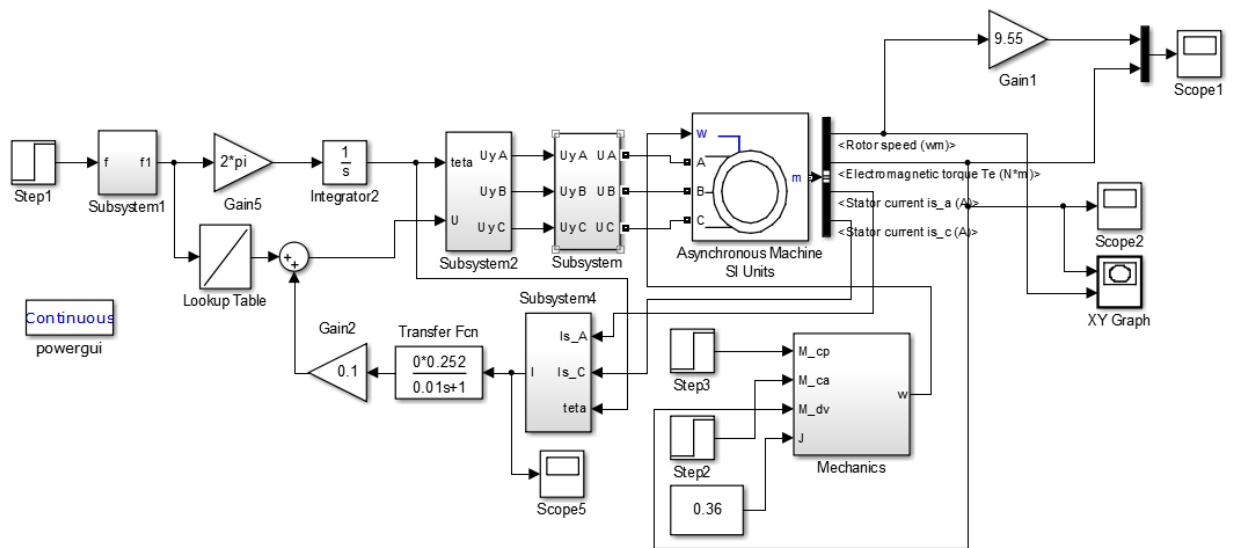


Рисунок 24 – Имитационная модель системы частотного управления со скалярной IR-компенсацией

На рис.25 представлена модель прямого координатного преобразователя (подсистема *Subsystem2*).

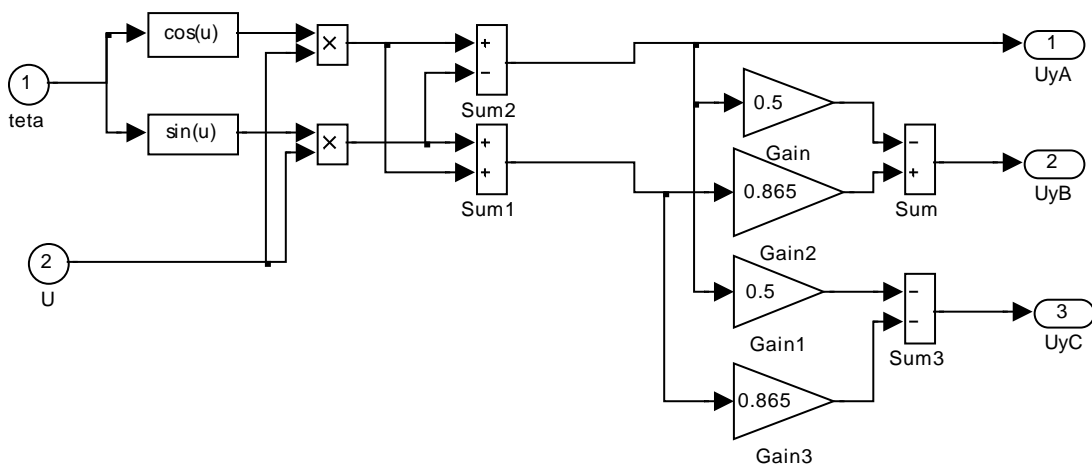


Рисунок 25 - Имитационная модель прямого координатного преобразователя

На рис.26 представлена модель преобразователя частоты (подсистема *Subsystem*).

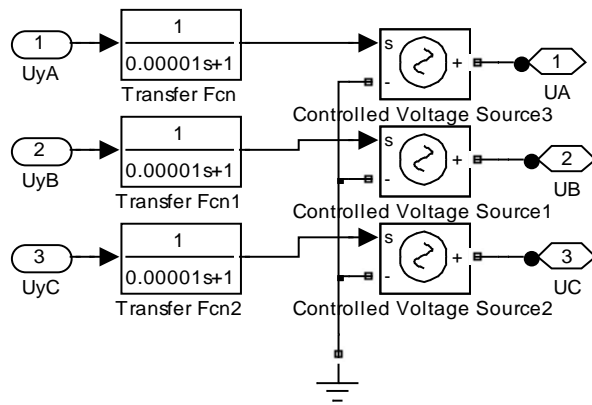


Рисунок 26 - Имитационная модель преобразователя частоты

На рис. 27 представлена модель обратного координатного преобразователя (подсистема *Subsystem4*).

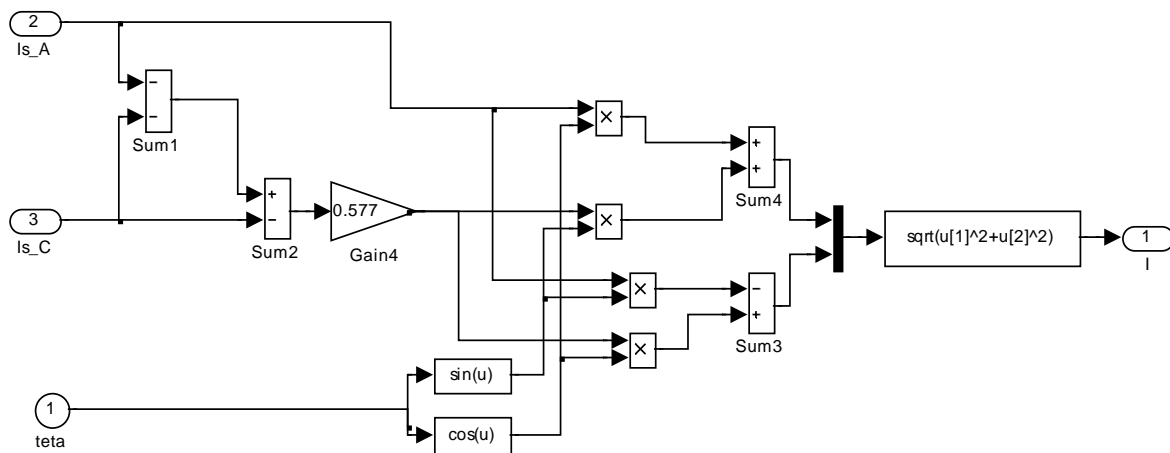


Рисунок 27 - Имитационная модель обратного координатного преобразователя

2.10 Имитационное моделирование переходных режимов электропривода при частотном скалярном управлении с компенсацией момента

В процессе работы было проделано 3 опыта с различными значениями коэффициентов компенсации момента и 1 опыт без компенсации, величины этих коэффициентов равны

$$K_{\text{KM1}} = 0,25; K_{\text{KM2}} = 0,5; K_{\text{KM3}} = 0,75.$$

На рис.28–31 представлены графики переходных процессов по скорости и по электромагнитному моменту двигателя при различных коэффициентах компенсации и при набросе нагрузки. В момент времени $t=6$ с. Происходит наброс нагрузки $M_{\text{ном}}=216 \text{ Н}\cdot\text{м}$.

На рис. 32-35 представлены динамические характеристики $M=f(\omega)$ двигателя при различных коэффициентах компенсации.

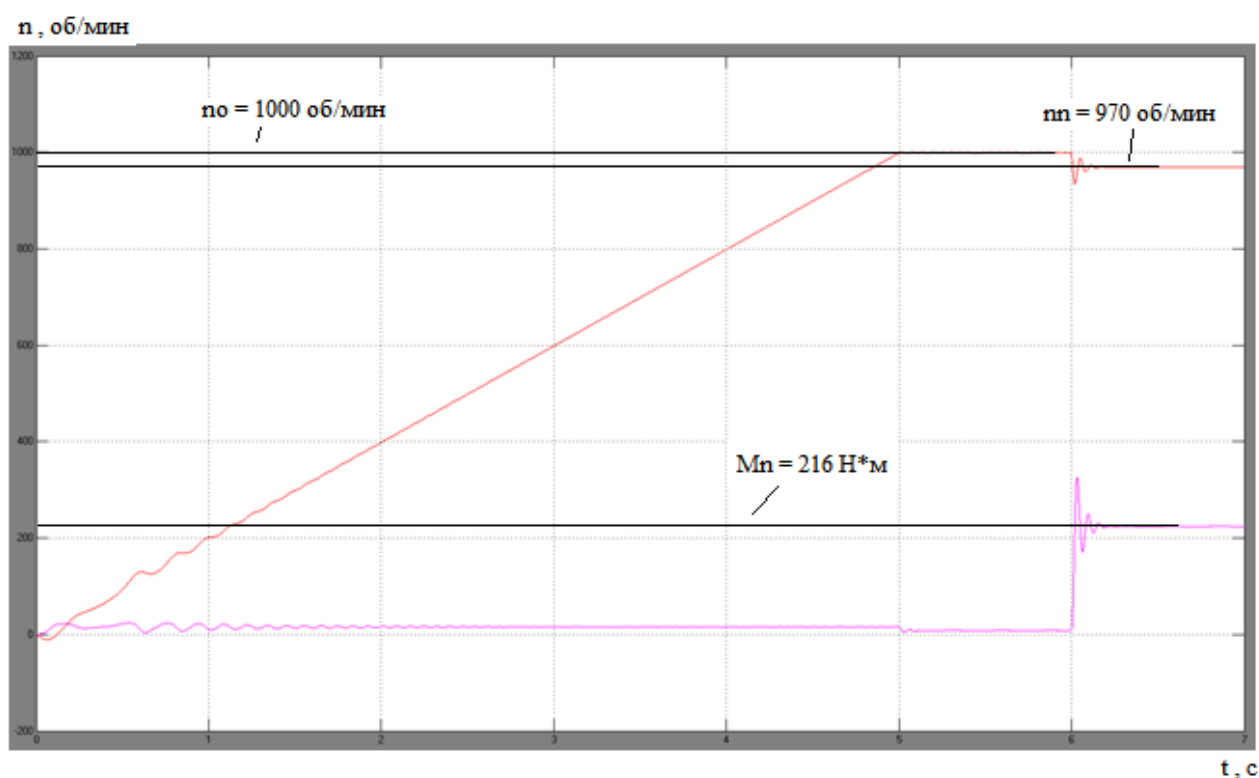


Рисунок 28 - Переходные процессы по скорости и моменту без ИР-компенсации

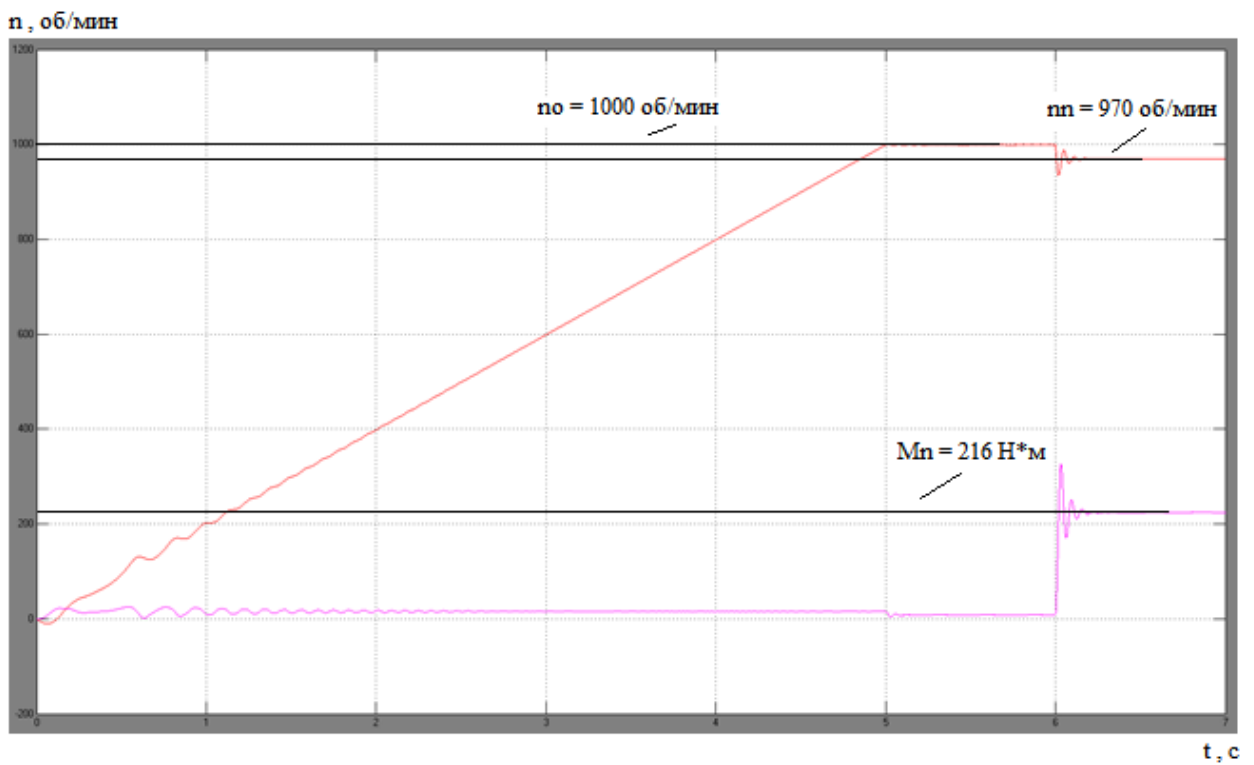


Рисунок 29 - Переходные процессы по скорости и моменту при $K_{KM1} = 0,25$

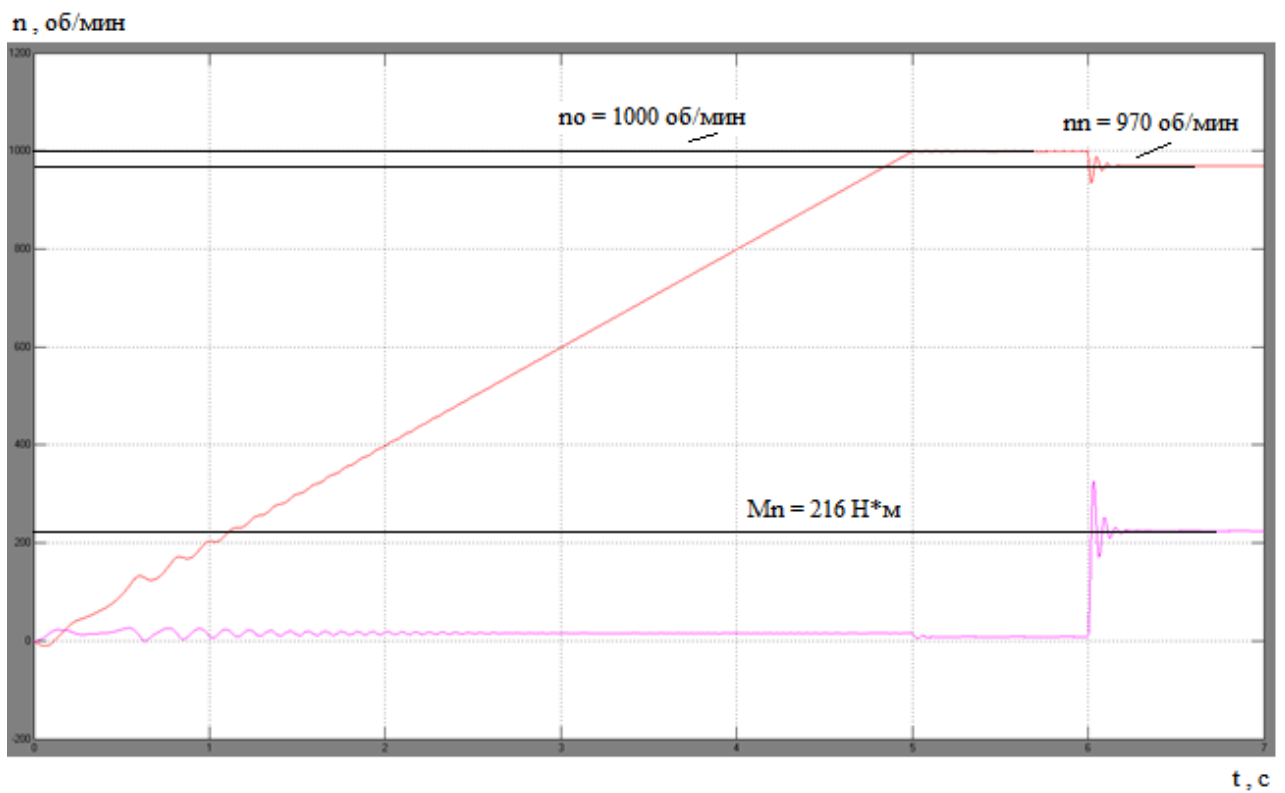


Рисунок 30 - Переходные процессы по скорости и моменту при $K_{KM2} = 0,5$

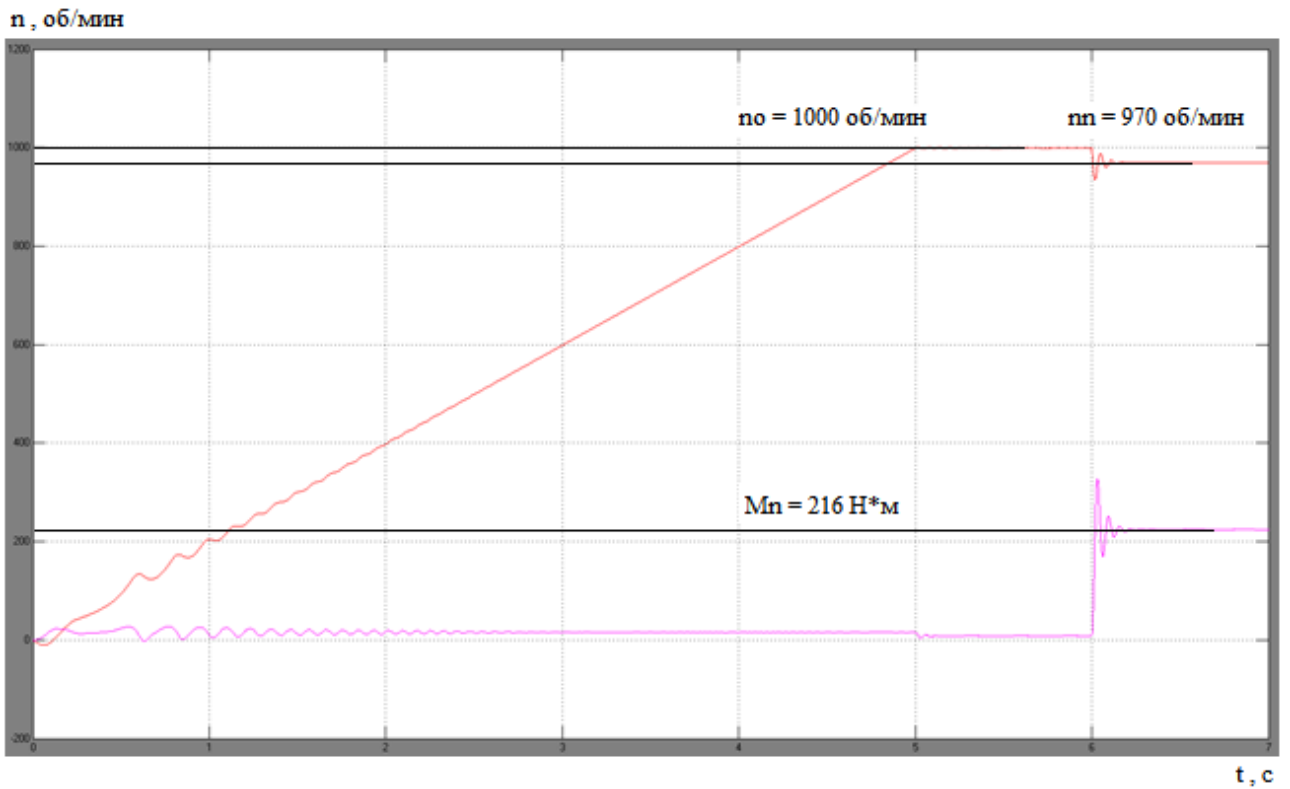


Рисунок 31 - Переходные процессы по скорости и моменту при $K_{KM3} = 0,75$

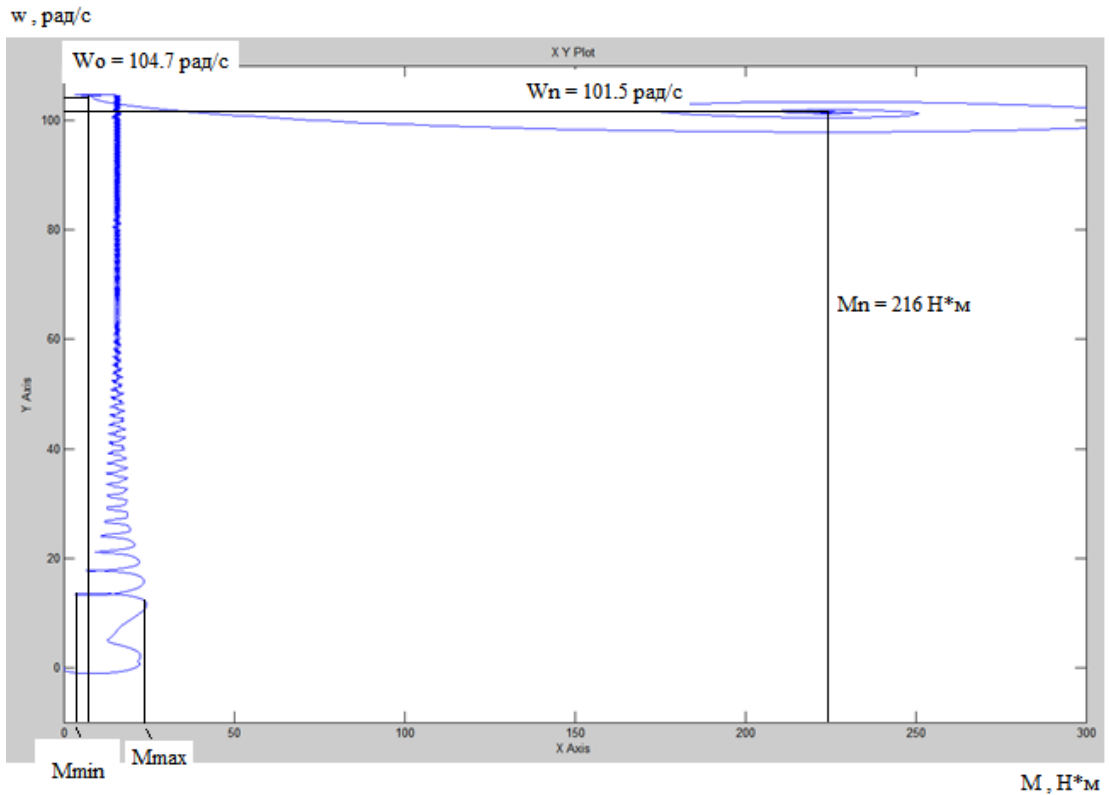


Рисунок 32 - Динамическая характеристика двигателя без IR-компенсации

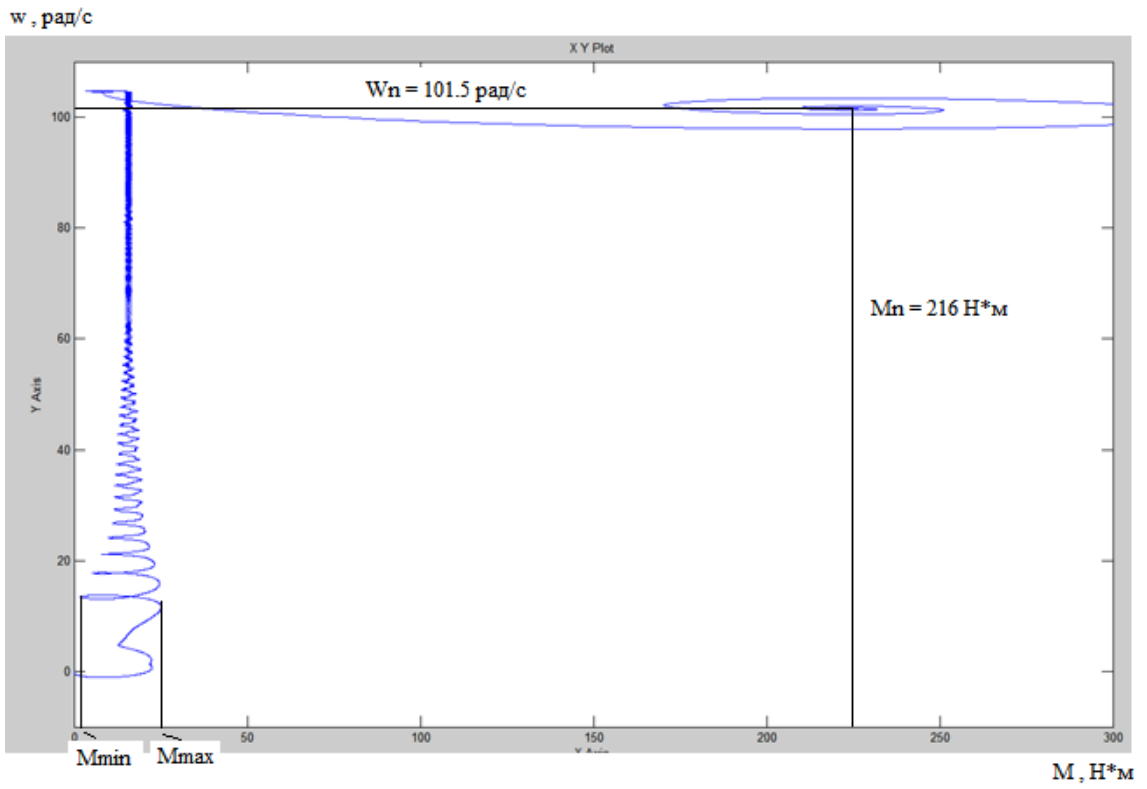


Рисунок 33 - Динамическая характеристика двигателя при $K_{KM1} = 0,25$

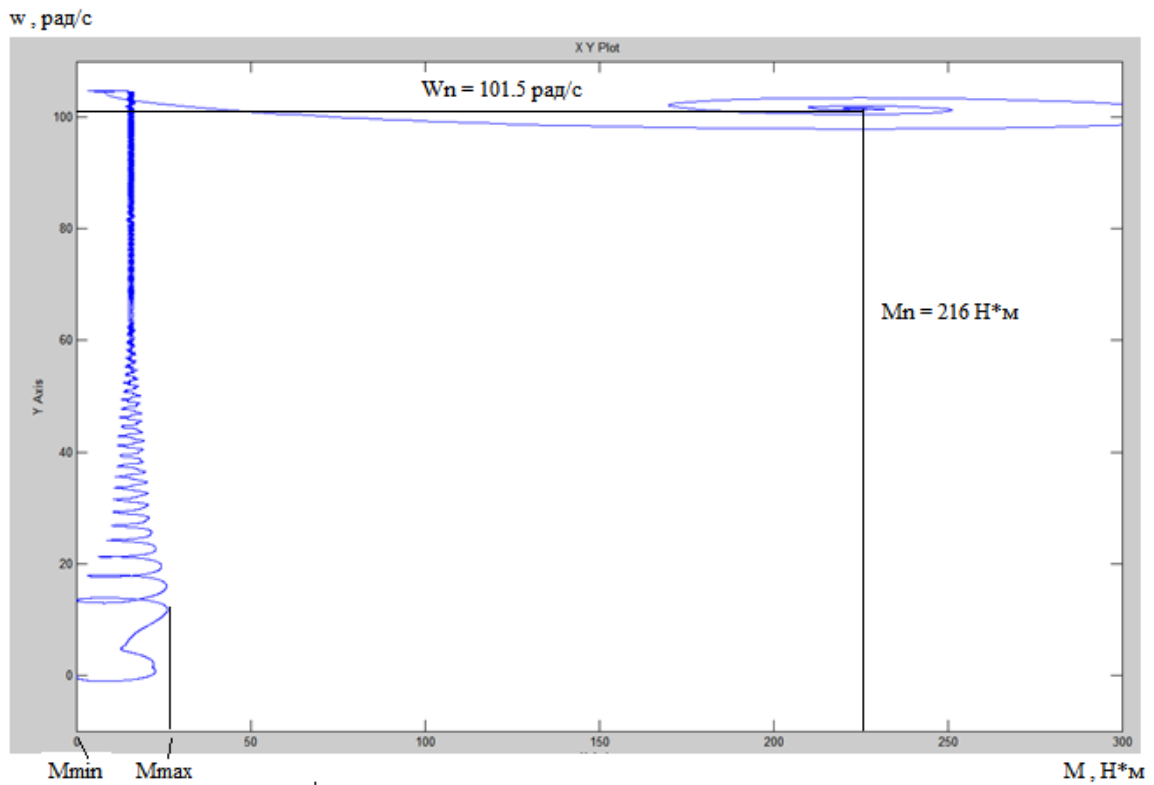


Рисунок 34 - Динамическая характеристика двигателя при $K_{KM2} = 0,5$

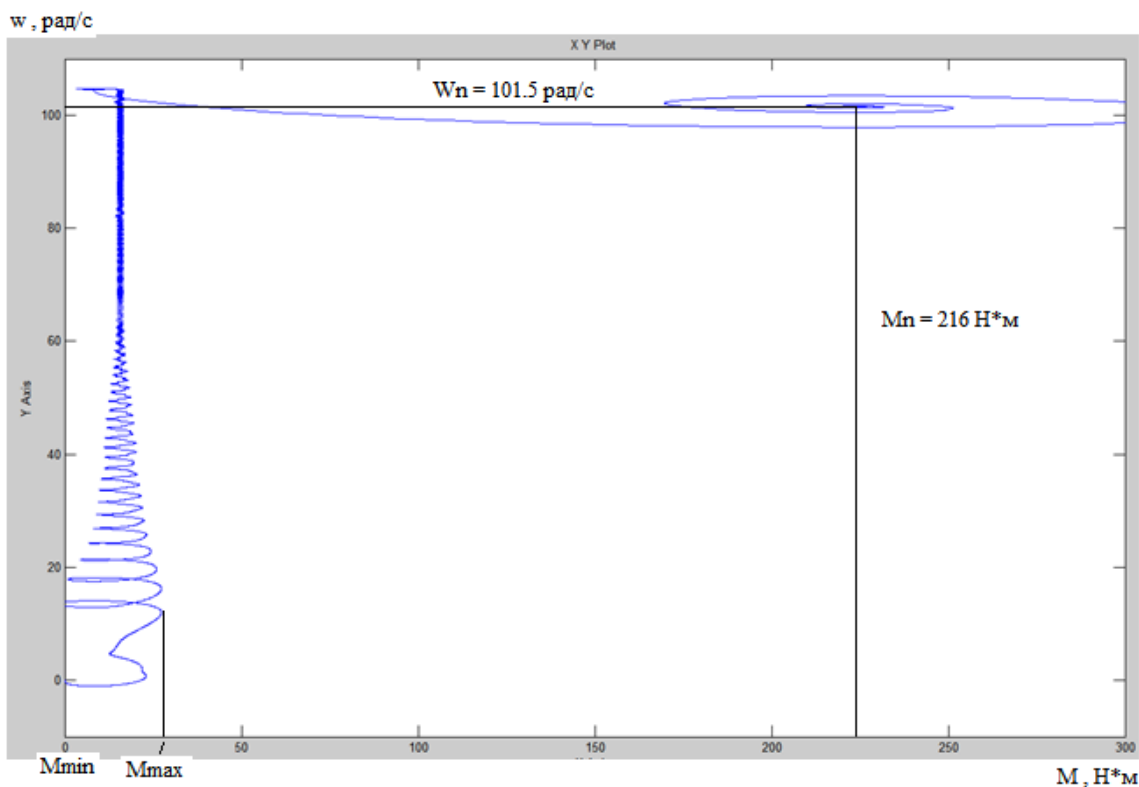


Рисунок 35 - Динамическая характеристика двигателя при $K_{KM3} = 0,75$

Из динамических характеристик (рис.32–35) видно, что с увеличением коэффициента компенсации K_{KM} диапазон разброса электромагнитных моментов во время разгона двигателя увеличивается, таким образом:

- без *IR*-компенсации: $M_{min} = 2 \text{ Н}\cdot\text{м}$; $M_{max} = 21 \text{ Н}\cdot\text{м}$;
- с учетом *IR*-компенсации $K_{KM1} = 0,25$: $M_{min} = 1 \text{ Н}\cdot\text{м}$; $M_{max} = 22 \text{ Н}\cdot\text{м}$;
- с учетом *IR*-компенсации $K_{KM2} = 0,5$: $M_{min} = 0 \text{ Н}\cdot\text{м}$; $M_{max} = 23 \text{ Н}\cdot\text{м}$;
- с учетом *IR*-компенсации $K_{KM3} = 0,75$: $M_{min} = -1 \text{ Н}\cdot\text{м}$; $M_{max} = 24 \text{ Н}\cdot\text{м}$.

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
3-5Г2Б1	Зырянов Илья Валерьевич

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

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

<p>1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения</p>	<p><i>Асинхронный электропривод лебедки со скалярным управлением. Цех металлообработки. Анализ разработки цифрового регулируемого электропривода лебедки, создание метода разработки регулируемого электропривода с короткозамкнутым ротором. Технологический процесс разработки и проверки системы.</i></p>
---	--

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<p>1. Производственная безопасность</p> <p>1.1 Анализ выявленных вредных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения в следующей последовательности:</p> <ul style="list-style-type: none"> - физико-химическая природа вредности, её связь с разрабатываемой темой; - действие фактора на организм человека; - приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ); - предлагаемые средства защиты; - (сначала коллективной защиты, затем – индивидуальные защитные средства). <p>1.2. Анализ выявленных опасных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения в следующей последовательности:</p> <ul style="list-style-type: none"> – механические опасности (источники, средства защиты; -- термические опасности (источники, средства защиты); – электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, молниезащита – источники, средства защиты); – пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения). 	<p><i>Анализ вредных факторов: ГОСТ 12.0.003-74. ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация Физические опасные и вредные производственные факторы ГОСТ 12.1.003-2014 ССБТ «Шум. Общие требования безопасности»: не превышает 80 дБ. СИЗ: наушники, противошумные каски ГОСТ Р 55710-2013 «Освещение рабочих мест внутри зданий. Нормы и методы измерений»:</i></p> <p><i>Анализ опасных факторов: 1. Механические травмы («Межотраслевые правила по охране труда при эксплуатации электроустановок» ПОТРМ-016-2001; РД 153 - 34,0-03,150-00). Защита: плакаты, ограждения, сигнализация. Электробезопасность (ГОСТ 12.1.038 – 82 «ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов»; ПУЭ; Приказ Министерства труда и социальной защиты РФ от 24 июля 2013 г. № 328н “Об утверждении Правил по охране труда при эксплуатации электроустановок”). Защита: экраны, сигнализация, плакаты, ограждения. СИЗ: перчатки, боты, коври, клещи, штанги.</i></p>
---	--

<p>2. Экологическая безопасность:</p> <ul style="list-style-type: none"> – защита селитебной зоны – анализ воздействия объекта на атмосферу (выбросы); – анализ воздействия объекта на гидросферу (сбросы); – анализ воздействия объекта на литосферу (отходы); – разработать решения по обеспечению экологической безопасности со ссылками на НТД по охране окружающей среды. 	<p><i>Воздействия на атмосферу, литосферу и гидросферу вредных выбросов, отходов не имеет. Утилизировать отход материалов и металлов для вторичного использования. Перерабатываются в металлургических заводах и производятся для вторичного использования. ГОСТ 30772-2001, Отходы производства и потребления, для которых существует возможность повторного использования непосредственно или после дополнительной обработки.</i></p>
<p>3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</p> <ul style="list-style-type: none"> – перечень возможных ЧС при разработке и эксплуатации проектируемого решения; – выбор наиболее типичной ЧС; – разработка превентивных мер по предупреждению ЧС; – разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий. 	<p><i>Наиболее типичная ЧС для рассматриваемого цеха является пожар (Федеральный закон от 22.07.2013г. №213-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности»). Для обеспечения безопасности приняты меры:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - установлена автоматическая пожарная сигнализация и система автоматического пожаротушения; - разработана инструкция по пожарной безопасности для работников; - помещения оснащены первичными средствами пожаротушения; - разработан план эвакуации работников при пожаре; - назначено ответственное лицо при возникновении ЧС.
<p>4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</p> <ul style="list-style-type: none"> – специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны. 	<p><i>ГОСТ 12.2.049-80 ССБТ. Оборудование производственное. Общие эргономические требования. Трудовому кодексу РФ и постановлению Правительства РФ от 20 ноября 2008 года N 870 "Об установлении сокращенной продолжительности рабочего времени, ежегодного дополнительного оплачиваемого отпуска, повышенной оплаты труда работникам, занятым на тяжелых работах, работах с вредными и (или) опасными и иными особыми условиями труд ГОСТ 21753-76. Система «человек-машина». Рычаги управления. Общие эргономические требования.</i></p>

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

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

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
3-5Г2Б1	Зырянов Илья Валерьевич		

Введение

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

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

3. Производственная безопасность

3.1 Описание технологического процесса и рабочего места

Технологический процесс разработки и проверки системы электропривода лебедки заключается в следующем:

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

3.2 Анализ вредных производственных факторов и обоснование мероприятий по их устранению

3 ГОСТ 12.0.003-74. ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы.

При эксплуатации подвижных средств непрерывного действия необходимо учитывать наличие и возможность воздействия следующих вредных факторов:

- повышенного уровня шума (в производственных цехах, машинных залах и в других помещениях и сооружениях, где установлено технологическое оборудование);
- недостаточной освещенности рабочей зоны

3.2.1 Шум

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

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

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

- обеспечение персонала индивидуальными средствами защиты по ГОСТ 12.4.011 – 89;

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

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

Таблица 2

Помещения, рабочие места	Уровни звукового давления (дБ) в октавных полосах со среднегеометрическими частотами,								Уровни звука и эквивалентные уровни звука, дБА
	Гц								
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Помещения для инженерно-технического персонала цехов и служб	79	70	68	58	55	52	50	49	60
Помещения для размещения шумного оборудования	94	87	82	78	75	73	71	70	80
Мастерские механические и по ремонту оборудования с собственными источниками шума	99	92	86	83	80	78	76	74	85
Комнаты мастеров механической мастерской, мастеров по ремонту оборудования	83	74	68	63	60	57	55	54	65

3.2.2 Освещение помещений подвижных механизмов

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

- Для осветительных установок помещений механизмов перемещения принимается напряжение 380/220 В с глухозаземленной нейтралью. Питание осветительных сетей помещения осуществляется от трансформаторов собственных нужд 6/0,38 кВ, питающих одновременно и силовые токоприемники в этом помещении.
- Размещение осветительной арматуры в цехе зависит от количества параллельных линий. При наличии одной линии светильники располагаются в два ряда по боковым стенкам. При наличии двух линий осветительная арматура устанавливается в три ряда над проходами.
- Аварийное освещение предусматривается только для проходов между установками и станками, с использованием минимального количества светильников.
- Сеть штепсельных розеток выполняется по всей длине цеха с установкой розеток через 20 - 25 м. Ремонтное освещение осуществляется переносными аккумуляторными фонарями во взрывобезопасном исполнении.
- Высота установки светильников в цехах, как правило, должна быть 2,5 - 3 м.

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

3.2.3 Анализ опасных факторов

4 Опасный фактор - это воздействие на человека, которое в определённых условиях приводит к травмам или резкому внутреннему ухудшению здоровья.

5 ГОСТ 12.2.003–91 ССБТ. Оборудование производственное. Общие требования безопасности.

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

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

3.2.4 Электробезопасность.

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

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

- а) обоснование категории помещения по степени опасности поражения электрическим током;
- б) требования к электрооборудованию;
- в) анализ соответствия реального положения на производстве перечисленным требованиям;
- г) мероприятия по устранению обнаруженных несоответствий;

д) обоснование мероприятий и средств защиты, работающих от поражения электрическим током.

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

3.3 Защита окружающей среды

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

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

3.4 Предотвращение ЧС и устранение их последствий

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

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

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

В помещении цеха устанавливается пожарный инвентарь первичных средств пожаротушения:

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

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

3.5. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

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

1. Утвердить Список производств, работ, профессий и должностей, работа в которых дает право на дополнительный отпуск за подземные, вредные и тяжелые условия труда работникам промышленно-производственного

персонала, занятым на горнодобывающих предприятиях, в объединениях и шахтостроительных, шахтопроходческих, шахтомонтажных организациях металлургической промышленности согласно приложению.

2. Установить, что дополнительный отпуск за вредные и тяжелые условия труда работникам промышленно-производственного персонала, занятым в производствах черной и цветной металлургии, впредь до принятия нового законодательства об отпусках предоставляется по соответствующим разделам Списка производств, цехов, профессий и должностей с вредными условиями труда, работа в которых дает право на дополнительный отпуск и сокращенный рабочий день, утвержденного постановлением Государственного комитета Совета Министров СССР по вопросам труда и заработной платы и Президиума ВЦСПС от 25 октября 1974 года N 298/П-22 с дополнениями, изменениями и редакционными уточнениями, внесенными постановлениями Государственного комитета Совета Министров СССР по труду и социальным вопросам и Президиума ВЦСПС от 1 ноября 1977 года N 369/П-16 и Государственного комитета СССР по труду и социальным вопросам и Президиума ВЦСПС от 5 ноября 1987 года N 669/П-11 и N 670/П-11. При этом продолжительность дополнительного отпуска устанавливается в пределах до 7, до 14, до 21, до 28, до 42 календарных дней вместо фиксированной продолжительности этого отпуска соответственно 6, 12, 18, 24, 36 рабочих дней, предусмотренной в указанных выше нормативных актах.

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

Студенту:

Группа	ФИО
3-5Г2Б1	Зырянов Илья Валерьевич

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

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

<p>1. <i>Стоимость ресурсов проектной работы: материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> - Примерный бюджет проекта 300 тыс.руб.; - В исследовании задействованы 3 человека: научный руководитель, два инженера; - Проект выполняется на базе лаборатории ТПУ - Стоимость оборудования (ПК) – 30 тыс. рублей, принтер – 5 тыс. рублей
<p>2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> - Проект выполняется в соответствии с ГОСТ 14.322-83 «Нормирование расхода материалов» и ГОСТ Р 51541-99 «Энергосбережение. Энергетическая эффективность» В соответствии с ГОСТ 14.322-83 «Нормирование расхода материалов» и ГОСТ Р 51541-99 «Энергосбережение. Энергетическая эффективность»
<p>3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> -Отчисления во внебюджетные фонды – 30,2% от ФОТ

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

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

3. <i>Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования</i>	- <i>Определение ресурсной (ресурсосберегающей) и экономической эффективности исследования</i>
Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):	
1. <i>Оценка технического уровня новшества</i>	
2. <i>Смета затрат</i>	

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

Задание выдал консультант:

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

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
3-5Г2Б1	Зырянов Илья Валерьевич		

4. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ.

4.1. Инициализация проекта и его технико-экономическое обоснование.

Исследования, проводимые в данной выпускной работе, являются инициативными в рамках научно-исследовательской работы для ОАО «ТДСК». Таким образом, потенциальными потребителями результатов этого исследования являются предприятия строительной сферы, расположенные на территории Российской Федерации. Компании находятся в постоянном поиске новых площадок для строительства, что является толчком для создания новых объектов и проектных организаций. В условиях кризиса многое оборудование стало экономически невыгодно, и появилась необходимость замены оборудования Российского производства. Учитывая закон президента РФ от 05.04.2013г. №44-ФЗ (закон о госзакупках), Импортозамещения.

4.1.1. Потенциальные потребители результатов исследования

Сегментируем рынок по следующим критериям: размер компании-заказчика, вид электропривода (таб. 3)

		Вид электропривода			
		Электропривод постоянного тока	Электропривод переменного тока	Электропривод АД с фазным ротором	Электропривод с частотным регулированием
Размер компании	Крупные		Фирма Hyundai		Фирма АВВ
	Средние	Фирма АВВ	Фирма Control Technicues	Фирма Omron	
	Мелкие	Фирма Siemens		Фирма ТДСК	

Таблица 3 – Карта сегментирования рынка электрооборудования по используемым видам электроприводов.

На карте сегментирования представлено, которые ниши в рынке электрического оснащения не забраны соперниками либо в каком месте степень конкурентной борьбы низок..

Результат сегментирования:

- главным секторам рынка принадлежат применение электропривода с частотным регулировкой средними и небольшими фирмами;
- наиболее многообещающим сектором считается рекомендация электропривода с частотным регулировкой средним фирмам;
- сегментом рынка, заманчивых для компании в перспективе, считается рекомендация электропривода с частотным регулировкой небольшим, активно развивающимся, фирмам.

4.1.2. Анализ технических решений

Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения позволяет провести оценку сравнительной эффективности различных марок электропривода, которые можно использо-

вать в лебедке.

Целесообразно проводить данный анализ с помощью оценочной карты, пример которой приведен в табл. 2. Для этого необходимо отобрать не менее двух-трех конкурентных товаров и разработок. В качестве конкурентных товаров были рассмотрены электроприводы (RA200LB6, A180S4, A200M6.)

Таблица 4 - Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкуренто-		
		Б _ф	Б _{к1}	Б _{к2}	К _ф	К _{к1}	К _{к2}
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
1. Повышение производительности труда пользователя	0,15	5	4	4	0,75	0,6	0,6
2. Удобство в эксплуатации (соответствует требованиям потребителей)	0,07	4	3	2	0,16	0,12	0,6
3. Энергоэкономичность	0,11	4	3	2	0,44	0,33	0,22
4. Надежность	0,2	4	4	4	0,8	0,8	0,8
5. Уровень шума	0,03	2	3	3	0,06	0,09	0,09
6. Безопасность	0,08	4	2	3	0,32	0,16	0,24
Экономические критерии оценки эффективности							
1. Конкурентоспособность продукта	0,04	3	2	2	0,12	0,08	0,08
2. Цена	0,15	5	4	3	0,6	0,6	0,45
3. Предполагаемый срок эксплуатации	0,12	5	3	4	0,6	0,36	0,48
4. Послепродажное обслуживание	0,05	3	5	2	0,15	0,25	0,1
Итого	1	39	33	31	4	3,39	2,94

Аспекты с целью сопоставления и оценки ресурсоэффективности и ресурсосбережения, приведенные в таб.2 , выбираются, отталкиваясь с подобранных предметов сопоставления с учетом их технических и финансовых отличительных черт разработки, формирования и эксплуатации.

Позиция исследования и соперников расценивается согласно каждому признаку экспертным путем согласно пятибалльной шкале, где 1 – более невысокая позиция, а 5 – более крепкая.

4.1.3. Оценка коммерческого потенциала инженерных решений (ИР)

Выбор структурной (принципиальной) схемы электропривода сводится к сравнению нескольких возможных вариантов и выбору наиболее оптимальной.

I вариант: A180S4, A200M6

II вариант: RA200LB6

Таблица 5 Оценка и выбор двигателей

	Варианты		Примечания (преимущества недостатки)
	I	II	
1. Общее количество составных частей	4	4	
2. Количество типов элементов	4	4	
3. Количество оригинальных элементов	2	2	
4. Стоимость покупных комплектующих	Дорогие комплектующие	Стоимость в 2 раза меньше	Простота конструкции
5. Показатели надежности	Надежность, сложность обслуживания	Надежность, простота обслуживания	

6. Питание:			
а) вид	U=380 В	U=380 В	
б) мощность	P=20 кВт	P=22 кВт	
7. Габариты		Меньше в 2 раза	
8. Масса		Легче в 2 раза	

Для оценки коммерческого потенциала ИР были рассмотрены следующие:

1. уровень капитальных вложений;
2. уровень надежности;
3. уровень обслуживания;
4. завышение мощности электропривода;
5. уровень затрат на эксплуатацию;
6. коэффициент мощности;
7. генерирование помех.

Таблица 6 Коэффициент весомости критериев

Номер критерия	1	2	3	4	5	6	7
Коэффициент весомости	1.0	0.8	0.6	0.3	0.4	0.2	0.1

По каждому частотному критерию устанавливаем оценку степени обеспечения цели:

Оценка обеспечения цели: низкий 1.0, средний 0.5, высокий 0.

Полученные результаты сведены в таб.7.

Таблица 7 Оценка качества по групповым критериям

Номер варианта	Групповой критерий							Общая оценка качества
	1.0	0.8	0.6	0.3	0.4	0.2	0.1	
I	0,5	0	0,5	0	0,5	0,5	0,5	1,15
II	1,0	0,5	1,0	0	0,5	0	0,5	2,25

Из таблицы 7 видно, что выбранные качественные характеристики обеспечиваются в варианте II.

Итогом данного анализа является определение конкурентных преимуществ, которые отличающихся высоким уровнем качества при стандартном наборе определяющих его параметров. Из данного анализа видно, что наиболее перспективен электропривод RA200LB6

4.2 Формирования плана и графика работ по проекту

Этапы проектирования, количество и должности исполнителей, а также трудоемкость работ сведены в таблицу 8

Таблица 8- Расчет трудоемкости работ проекта

№ пп	Перечень работ	Исполнители	Трудоем- кость, дней
		должность	
1	2	3	4
1	Получение задания на разработку про- екта	Научный руков-ль	1
		Инженер 10 рз	1
		Инженер 11 рз	1
2	Сбор исходных данных: - электрические схемы соединения; - параметров трансформаторов, авто- трансформаторов, линий, генераторов,	Научный руков-ль	3
		Инженер 10 рз	4
		Инженер 11 рз	4
3	Подготовка данных для ввода в базу комплекса - составление схем замещения (прямой, обратной, нулевой последовательно-	Научный руков-ль	1
		Инженер 10 рз	6
		Инженер 11 рз	6
4	Ввод данных в базу комплекса	Инженер 10 рз	4
5	Отладка базы данных и проведение тестовых расчетов	Научный руков-ль	2
		Инженер 10 рз	2
6	Расчёт модели АД	Инженер 11 рз	1
7	Проверка модели АД	Научный руков-ль	2

8	Расчёт модели АД-ПЧ	Инженер 10 рз	13
9	Проверка модели АД-ПЧ	Инженер 11 рз	13
10	Оформление пояснительной записки	Научный руков-ль	3
Длительность работы, дней			67

4.3 Расчет сметы затрат на исследование

В структура расходов на конструирование новой технической концепции содержит цена абсолютно всех затрат, образующих сущность этого исследования.

Расходы сгруппировываются согласно заметкам расходов:

Расходы группируются по статьям затрат:

- 1) затраты на оплату труда работников;
- 2) отчисления в социальный налог;
- 3) материальные затраты;
- 4) амортизация основных фондов НМА;
- 5) прочие прямые затраты;
- 6) накладные расходы.

4.3.1 Затраты на оплату труда работников

Расчёт окладов приведён в таблице 9.

Таблица 9- Расчёт окладов

Исполнители	Разряд	Кс	З _{тс} , руб
1. Научный руководитель	15	3,62	14801
	10	2,44	11250
2. Инженер 1	11	2,68	12357
3. Инженер 2			
Итого			38408

Расчёт месячной заработной платы научного руководителя:

$$Z_{\text{мес}} = Z_{\text{тс}} \cdot K_{\text{пр}} \cdot K_{\text{р}},$$

где $Z_{\text{тс}}$ – оклад, $K_{\text{пр}}$ – коэффициент премиальных выплат по данным предприятия; $K_{\text{пр}} = 1,4$;

$K_{\text{р}}$ – районный коэффициент

$$Z_{\text{мес}} = 14801 \cdot 1,4 \cdot 1,3 = 26937,82 \text{ р.}$$

Расчёт месячной заработной платы инженера 10 разряда:

$$Z_{\text{мес}} = Z_{\text{тс}} \cdot K_{\text{пр}} \cdot K_{\text{р}}$$

$$Z_{\text{мес инж1}} = 11250 \cdot 1,4 \cdot 1,3 = 20475 \text{ р.}$$

Расчёт месячной заработной платы инженера 11 разряда:

$$Z_{\text{мес инж2}} = 12357 \cdot 1,4 \cdot 1,3 = 22489,74 \text{ р.}$$

Расчеты сводим в таблицу 10.

Таблица 10.

Должность	Разряд	Оклад, руб.
Научный руководитель	15	26937,82
Инженер	11	22489,74
Инженер	10	20475

Зарплата за один день рабочего месяца

$$Z_{\text{день}} = Zi^{p.k} / 21 (\text{руб.})$$

Основная зарплата за отработанное время

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{день}} * t_{\text{раб}} (\text{руб.})$$

где $t_{\text{раб}}$ - количество отработанных дней

Результаты расчета сводим в таблицу 11.

Таблица 11.

Должность	Разряд	Оклад, руб	Колич. дней	Зарплата за 1 день рабо- чего месяца, руб.	Основная зарплата за отработанное время, руб.
Руковод. проекта	15	26937,82	36	1282,75	46179,12
Инженер	11	22489,74	39	1070,94	41766,66
Инженер	10	20475	33	975	32175
Итого основная заработная плата исполнителей, руб.					120120,8

4.3.2 Отчисления в социальные фонды

Рассчитаем размер отчислений в социальные фонды

$$З_{\text{соц.н}}=0,302 \cdot З_{\text{осн}}=0,302 \cdot 120120,8= 36276,49 \text{руб}$$

4.3.3 Расчет затрат на материалы

Затраты на канцелярские товары:

Примем эти затраты в размере 600 руб. $I_{\text{мат}} = 600$ руб.

• 4.3.4. Амортизация вычислительной техники

Примем, что компьютер стоит 30 тыс. руб. (ср. цена по городу подходящей комплектации), стоимость принтера равна 5 тыс. руб.

Тогда в год амортизационные отчисления на оргтехнику составят:

$$A = \frac{T_{\text{исп}}}{365} \cdot C_{\text{ОРГ.ТЕХ.}} \cdot H_A = \frac{35}{365} \cdot 35000 \cdot 0,1 = 335,61 \text{ руб.}$$

4.3.5 Расчет на прочие прямые затраты

Статья содержит расходы на получение научно – тех. литературы, осуществление патентных исследований, содержание оргтехники, обслуживание связи, канцтовары, представительские затраты, командировки, изнашивание по нематериальным активам и на прочие никак не принадлежащие к прежде упомянутым статьям.

$$\text{Пр}_{\text{зат}} = 0,1 \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{соц.н}} + I_{\text{мат}} + I_{\text{ам}}) = (120120,8 + 36276,49 + 600 + 335,61) \cdot 0,1 = 15733,29 \text{ руб.}$$

4.3.6 Расчет накладных расходов

Накладные расходы:

$$H_{\text{рас}} = 16 \% \cdot Z_{\text{осн}} = 16 \% \cdot 120120,8 = 19219,33 \text{ руб.}$$

4.3.7 Себестоимость проекта

Полная стоимость проекта:

$$\text{Ст}_{\text{пр}} = Z_{\text{осн}} + Z_{\text{соц.н}} + I_{\text{мат}} + I_{\text{ам}} + \text{Пр}_{\text{зат}} + H_{\text{рас}} = 120120,8 + 36276,49 + 600 + 335,61 + 15733,29 + 19219,33 = 192185,52 \text{ (руб)}$$

Плановые накопления 20-30% от себестоимости проекта

$$H = 0,2 \cdot \text{Ст}_{\text{пр}} = 0,2 \cdot 192185,52 = 38437,1 \text{ руб.}$$

$$K_{\text{ПРОЕКТА}} = \text{Ст}_{\text{пр}} + H = 192185,52 + 38437,1 = 230622,6 \text{ руб.}$$

Затраты на проектирование по статьям приведены в таблице 10

Таблица 12- Смета затрат на проектирование

Затраты	Сумма, руб.
1. Материальные затраты, Имат	600
2. Основная заработная плата работников, Зосн	120120,8
3. Отчисление в социальные фонды,	36276,49
4. Амортизация компьютерной техники, Иам	335,61
5. Прочие прямые расходы, Ипр	15733,29
6. Накладные расходы, Нрас	19219,33
7. Себестоимость проекта, (п1+п2+п3+п4+п5+п6)	192185,52
8. Плановые накопления, 20%(п7)	38437,1
Итого: (п7+п8)	230622,6

Вывод по разделу. Себестоимость затрат на исследовательскую работу составила 230622,6 руб., данная сумма не превышает требования.

4.4 Определение экономической эффективности исследования

Определение эффективности затрат на проектирование проекта, заключается в следующем: что проектирование проекта будет происходить в Федеральном научном производственном центре «Алтай» и это позволит сэ- кономить на оплате труда, так как районный коэффициент для данного регио- на страны составляет 1,25, в Томском регионе он составляет 1,5, а также доплата за северный регион.

И при условии, что заказчик может предоставить максимум 300 000 рублей на проектирование, то конструкторское бюро Федерального научного производственного центра «Алтай» выполнит данную работу за 230622,6 руб и это является оптимальным и наиболее экономически выгодной.

Ресурсы на проектирование не большие и устраивают заказчика, так как они являются расходными.

4.4.1 Выводы по разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение».

В данном разделе ВКР были выполнены все поставленные задачи:

1) ОАО «ТДСК» открывает новые строительные площадки, требуя правильного и целесообразного расхода средств, не допуская ошибок при проектировании.

2) Экономически обоснован выбор электропривода лебедки, был произведен расчет коэффициента научно- технического уровня – 2,5, указывающий на высокий потенциал данного исследования.

3) Осуществлено планирование и составлены графики исследователь- ких работ. Всего потребуется 67 рабочих дней на разработку проекта.

4) Рассчитаны издержки на амортизационные вложения, расчет заработной платы исполнителей и обслуживающего персонала. Величина затрат на проектирование составила 230 622 рублей.

Таким образом, себестоимость проекта составила 230 622 рублей, данная сумма полностью удовлетворяет заказчика и экономит ему 69 378 рублей.

5 Заключение

В данном курсовом проекте была рассмотрена система “Преобразователь частоты – асинхронный двигатель”. В проекте были рассчитаны параметры схемы замещения асинхронного двигателя и построены естественные механическая и электромеханические характеристики. В результате имитационного моделирования были сняты динамические характеристики двигателя при прямом пуске и выяснено, что двигатель является устойчивым звеном, и параметры схемы замещения вычислены правильно. Расчет потерь в роторе показал, что при линейной нагрузке при уменьшении частоты питающего напряжения они также уменьшаются. Расчет статических характеристик замкнутой системы с IR-компенсацией показал, что IR-компенсация оказывает существенное влияние только при малых частотах, где потери на активном сопротивлении статора увеличиваются. В проекте были рассчитаны и построены статические характеристики и с помощью имитационного моделирования сняты динамические характеристики системы

Список использованной литературы

1. Чернышев А. Ю., Чернышев И. А. Расчет характеристики электроприводов переменного тока. Часть 1. Асинхронный двигатель. Учебное пособие./Томский политехнический университет. – Томск: Издательство ТПУ, 2005.–136 с.
2. Чернышев А.Ю., Кояин Н.В. Проектирование электрических приводов: Учебно-методическое пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2005. – 120 с.
3. Дементьев Ю.Н., Чернышев А.Ю., Чернышев И.А. Электрический привод: учебное пособие. –Томск: Изд-во ТПУ, 2008. – 244 с.
4. Мальцева О.П., Удут Л.С., Кояин Н.В. Системы управления асинхронных частотно-регулируемых электроприводов. – Томск: Изд. ТПУ, 2011. – 476с.
5. Удут Л. С., Мальцева О.П., Кояин Н.В. Проектирование и исследование электроприводов. Часть 4. – тиристорные преобразователи для электроприводов постоянного тока: Учебное пособие. – Томск: Изд. ТПУ, 2002. – 152 с.
6. Удут Л.С., Мальцева О.П., Кояин Н.В. Проектирование и исследование электроприводов. Часть 8. – Асинхронный частотно-регулируемый электропривод: Учебное пособие. – Томск: Изд. ТПУ, 2010. – 448 с.
7. Долин П.А. Справочник по технике безопасности. – 6е изд., переработанное и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 824 с.
8. ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. «Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов»
9. ГОСТ Р 50571.3-94 “Электроустановки зданий. Часть 4. Требования по обеспечению безопасности. Защиты от поражения электрическим током.”
10. ГОСТ 21753-76. Система «человек-машина». Рычаги управления. Общие эргономические требования.

11. Приказ Министерства труда и социальной защиты РФ от 24 июля 2013 г. № 328 н «Об утверждении Правил по охране труда при эксплуатации электроустановок»
12. ГОСТ 12.1.003-83 ССБТ. «Шум. Общие требования безопасности»
13. СП 52.13330.2011 «Естественное и искусственное освещение»
14. ГОСТ Р 22.3.03-94. «Безопасность в ЧС. Защита населения. Основные положения»
15. О.Б. Назаренко, А.Г. Дашковский. Безопасность жизнедеятельности. Расчёт искусственного освещения. Методические указания к выполнению индивидуальных заданий для студентов дневного и заочного обучения всех специальностей. – Томск: Изд. ТПУ, 2001
16. Борисова Л.М., Гершанович Е.А. Экономика энергетики: учебное пособие. – Томск: Изд. ТПУ, 2006.