

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Тольяттинский государственный университет»

Институт химии и энергетики  
(наименование института полностью)

---

Кафедра «Электроснабжение и электротехника»  
(наименование)

13.04.02 Электроэнергетика и электротехника  
(код и наименование направления подготовки)

---

Режимы работы электрических источников питания, подстанций, сетей и систем  
(направленность (профиль))

---

## **ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)**

на тему Разработка системы энергоэффективного привода асинхронного электродвигателя на химическом предприятии

Студент

П.И. Ложкин  
(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Научный  
руководитель

д.т.н., профессор, В.В. Вахнина  
(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

Тольятти 2021

## Содержание

Введение .....	4
1 Анализ современного состояния вопроса применения энергоэффективных электродвигателей на промышленных предприятиях .....	8
1.1 Основные установки и технологические процессы на ООО «Тольяттикаучук» .....	8
1.2 Основные типы преобразователей частоты .....	10
1.3 Способы регулирования частоты вращения асинхронных двигателей.....	16
1.4 Требования к автоматизированной системе частотного регулируемого привода .....	18
2 Разработка схемы управления электродвигателем с устройством частотного регулирования и оценка электрических параметров системы ..	22
2.1 Разработка схемы частотного регулирования электродвигателя .....	22
2.2 Характеристики двигателя насоса .....	24
2.3 Выбор преобразователя частоты .....	25
2.4 Характеристика статических режимов работы электропривода .....	29
2.5 Энергетические характеристики электропривода .....	34
2.6 Разработка расчетной модели электродвигателя в среде MatLab .....	38
2.7 Моделирование механических характеристик и тока электродвигателя в среде MatLab .....	44
3 Экономическое обоснование целесообразности внедрения частотного регулируемого привода .....	55
3.1 Алгоритм расчета экономии электроэнергии при применении метода частотного регулирования двигателя относительно дросселирования .....	55
3.2 Расчет годовой экономии электроэнергии .....	57
3.3 Расчет экономической эффективности для цеха .....	60
3.4 Расчет пусконаладочных работ и обслуживания оборудования .....	61

3.5 Затраты на амортизацию .....	62
3.6 Экономический эффект от использования частотно-регулируемого привода насосов и вентиляторов на предприятии относительно дросселирования .....	64
Заключение .....	67
Список используемой литературы и используемых источников .....	69

## Введение

Наиболее эффективная энергосберегающая технология на промышленных предприятиях является применений частотного регулирования асинхронных электродвигателей [26]. Скорость вращения ротора асинхронного электродвигателя (АД) зависит от частоты тока, которая в промышленной сети неизменна и равна 50 Гц. Поэтому скорость вращения асинхронных электродвигателей, подключенных непосредственно к сети, будет тоже неизменной. В большинстве случаев требуется управлять скоростью вращения электродвигателя, например, для изменения производительности насоса. Если нельзя изменять скорость вращения, то для этого используются регулирующие клапаны, задвижки и т.д., что дает дополнительное сопротивление и дополнительные потери в электродвигателе. Поэтому для уменьшения потерь необходимо исключить дополнительные сопротивления на участке от насоса до сетевого трубопровода, для этого применяют запорно-регулирующую аппаратуру. Самый лучший способ уменьшения потерь – процесс регулирования передать насосу [42]-[45] или использовать «коммутируемый реактивный двигатель, который широко используется в последние годы. Имеет простую и прочную конструкцию, низкую инерцию, высокий крутящий момент на соотношение ампер, высокую скорость и высокую производительность с разными приложениями» [38]. Основной недостаток таких двигателей – дороговизна.

При регулировании частоты двигателя потребление электроэнергии существенно снижается за счет того, что ее расход пропорционален необходимой производительности насоса.

«Применение частотного регулирования приводов позволяет существенно снизить эксплуатационные затраты и дополнительные потери. Например, снижение перепада давления между всасывающим и напорным патрубками насосного агрегата увеличивает срок службы сальниковых

уплотнений и обеспечивает стабильность давления воды в трубопроводных сетях» [13]. «Поэтому одной из самых эффективных современных технологий является частотное регулирование асинхронных электродвигателей» [3].

Объект исследования – асинхронный двигатель насоса Н-65 в производстве сополимерных бутадиен-стирольных каучуков ООО «Тольяттикаучук».

Предмет исследования – проектные решения по эффективности внедрения частотного регулирования асинхронных электродвигателей в производстве сополимерных бутадиен-стирольных каучуков ООО «Тольяттикаучук».

Целью исследования является анализ проектных решений по эффективности внедрения частотного регулирования асинхронных электродвигателей в производстве сополимерных бутадиен-стирольных каучуков ООО «Тольяттикаучук».

Гипотеза исследования состоит в том, что за счет внедрения частотного регулирования асинхронных электродвигателей в производстве сополимерных бутадиен-стирольных каучуков ООО «Тольяттикаучук» будет снижена потребляемая из сети электрическая мощность, повысится  $\cos\varphi$ , будет обеспечен плавный пуск установок, уменьшатся эксплуатационные расходы, будут улучшены условия труда персонала и увеличится срок службы оборудования.

Задачи:

- Анализ современного состояния вопроса применения энергоэффективных двигателей – АД с частотным регулированием (с непосредственной связью и с промежуточным контуром постоянного тока);
- Разработка системы управления электродвигателем с устройством частотного регулирования и выполнение оценки электрических параметров системы путем моделирования в ПК Matlab;

- Расчет экономической эффективности разработанной системы управления АД с устройством частотного регулирования.

Методы исследования. При решении поставленных в работе задач был выполнен анализ научной литературы по теме ВКР. При выполнении ВКР использовались теория электрических цепей и электрических машин, автоматизированного электропривода, для расчета электрических характеристик электропривода применялось компьютерное моделирование в ПК Matlab.

Научная новизна исследования заключается в:

- выполнен анализ современного состояния вопроса применения энергоэффективных двигателей в производстве сополимерных бутадиен-стирольных каучуков ООО «Тольяттикаучук»;
- разработана система управления электродвигателем с устройством частотного регулирования и выполнение оценки электрических параметров системы путем моделирования в ПК Matlab.

Практическая значимость исследования заключается в том, что при расчете экономической эффективности спроектированной системы управления технологическим процессом выяснено, что внедрение системы частотного регулирования электропривода позволяет экономить 117 064 рубля в год. Сама же система, установленная на 15 однотипных насосов в цехе, окупится за срок 0,76 лет.

Личное участие автора в организации и проведения исследования состоит в анализе современного состояния вопроса применения энергоэффективных электродвигателей на промышленных предприятиях; разработке схемы управления электродвигателем с устройством частотного регулирования и оценке электрических параметров системы путем моделирования в ПК Matlab; расчете экономической эффективности разработанной системы управления АД с устройством частотного регулирования. Доказана целесообразность не просто включения

преобразователя для управления агрегатом, а создания специализированных систем управления технологическим процессом.

Апробация и внедрение результатов работы велись в течение всего исследования. Его результаты докладывались на следующих конференциях:

- V Всероссийской научно-технической конференции студентов, магистрантов, аспирантов «Энергосбережение и энергобезопасность производственных процессов» (ноябрь 2019 г., Тольятти);

- студенческих днях науки в ТГУ (апрель 2021 г., Тольятти);

- на научных семинарах кафедры «Электроснабжение и электротехника» института химии и энергетики Тольяттинского государственного университета.

На защиту выносятся:

- Результаты анализа современного состояния вопроса применения энергоэффективных двигателей – АД с частотным регулированием (с непосредственной связью и с промежуточным контуром постоянного тока);
- Разработанная системы управления электродвигателем с устройством частотного регулирования;
- Выполненная оценка электрических параметров системы управления электродвигателем с устройством частотного регулирования;
- Технико-экономическое обоснование разработанной системы управления АД с устройством частотного регулирования для производства сополимерных бутадиен-стирольных каучуков ООО «Тольяттикаучук».

# **1 Анализ современного состояния вопроса применения энергоэффективных электродвигателей на промышленных предприятиях**

## **1.1 Основные установки и технологические процессы на ООО «Тольяттикаучук»**

Производство сополимерных бутадиен-стирольных каучуков состоит из цехов Е-1, Е-2, Е-12. Объем производства достигает до 60 тыс. тонн в год, сополимерные бутадиен-стирольных каучуки применяются в шинной, резинотехнической и других отраслях промышленности.

Цех Е-1 предназначен для сополимеризации бутадиена и альфаметилстирола в водном растворе. Конечная продукция цеха - латекс, который передается в цех Е-2 для выделения каучука в брикетах.

На рисунке 1 представлена упрощенная технологическая схема процесса. Выбранный для исследования насос поз. Н-65 качает частично дегазированный латекс из колонны предварительной дегазации латекса в колонны поз. К-66 для отгонки незаполимеризованных мономеров латекса.

Существующая система работает следующим образом.

Насосы поз. Н-65 включают 15 однотипных насосов. Насосы объединены в группы по три насоса: насос линии предварительной дегазации, насос вакуумной дегазации и резервный насос. В работе постоянно 2 насоса.

Описание проектируемой автоматизированной системы частотного регулируемого привода.

Каждый из насосов Н-65 линии предварительной дегазации должен иметь регулируемую частоту вращения. Частота вращения должна задаваться задатчиком, причем использовать один задатчик на группу из трех насосов. Должна быть предусмотрена возможность корректировки частоты вращения на каждом насосе. Скорость вращения электродвигателя определяется

перепадом давления между давлением в трубопроводе выхода паров из колонны 66 и в трубопроводе всаса насосов 65, величина которого определяется датчиком перепада давления PDT который, подает сигнал 4-20 мА в систему управления насосами поз. Н-65, то есть контроллер, управляющий электроприводом насоса.

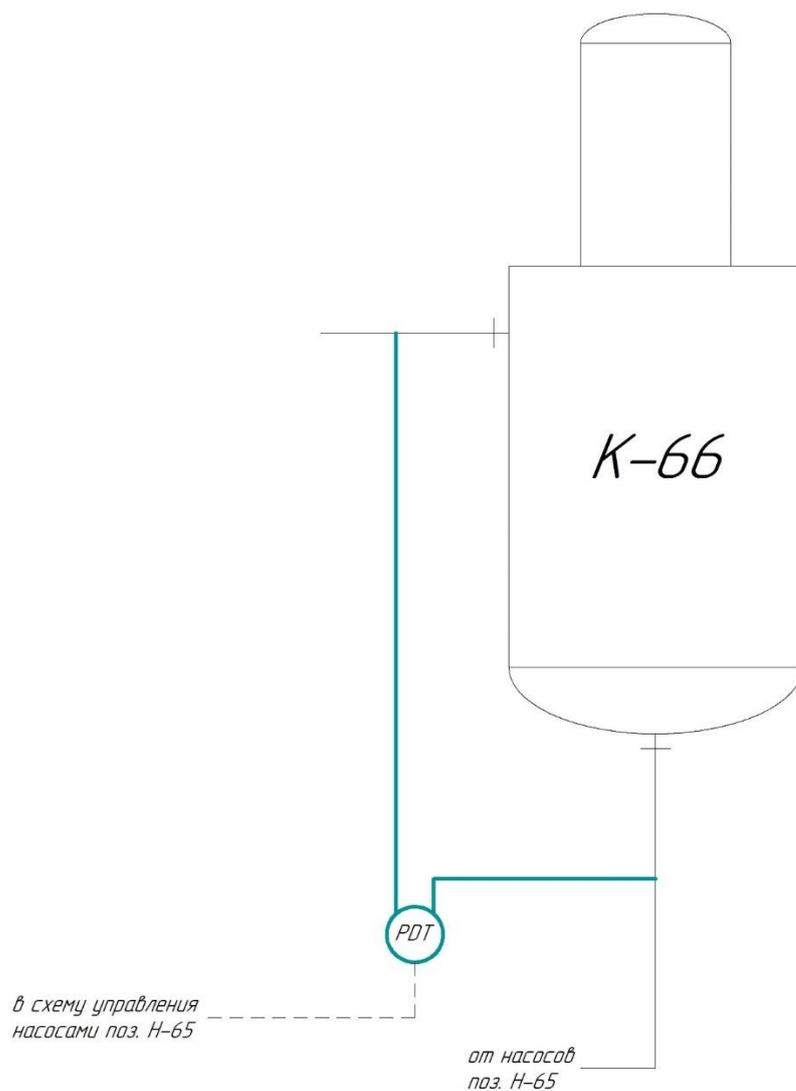


Рисунок 1 – Упрощенная технологическая схема процесса

По технологии предусматривается регулирование подачи частично дегазированного латекса в колонну 66. Расход продукта в трубопроводе нагнетания насосов 65 в колонну 66 составляет  $24 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

## 1.2 Основные типы преобразователей частоты

В соответствии с классификацией Белова М.П. и Новикова А.Д. «преобразователи частоты делятся на два класса в зависимости от структуры и принципа работы.

1 класс. Преобразователи частоты с непосредственной связью (без промежуточного звена постоянного тока).

2 класс. Преобразователи частоты с явно выраженным промежуточным звеном постоянного тока» [4].

Рассмотрим отдельно каждый класс преобразователей частоты.

### 1.2.1 Преобразователи частоты с непосредственной связью

Данный класс преобразователей частоты с непосредственной связью появился первым, когда «силовая часть представляет собой управляемый выпрямитель и выполнена на запираемых тиристорах (рисунок 2). Система управления поочередно отпирает группы тиристоров и подключает статорные обмотки двигателя к питающей сети» [15].

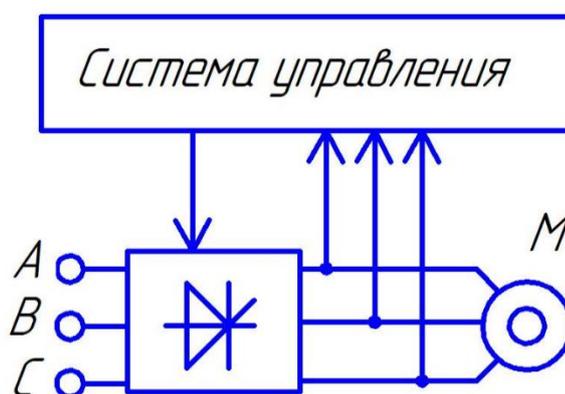


Рисунок 2 – Структурная схема преобразователя частоты с непосредственной связью

«Выходное напряжение преобразователя формируется из «вырезанных» участков синусоид входного напряжения (рисунок 3). Поэтому выходное напряжение имеет несинусоидальную «пилообразную» форму, которую условно можно аппроксимировать синусоидой (жирная линия на рисунке 3). В этом случае частота выходного напряжения не может быть равна или выше частоты питающей сети, и находится в диапазоне 0...30 Гц. Т.е. в этом классе характерен малый диапазон управления частоты вращения двигателя (изменение не более 1:10). Это ограничение не позволяет применять преобразователи этого класса в современных электроприводах, где требуется широкий диапазон регулирования технологических параметров» [14].

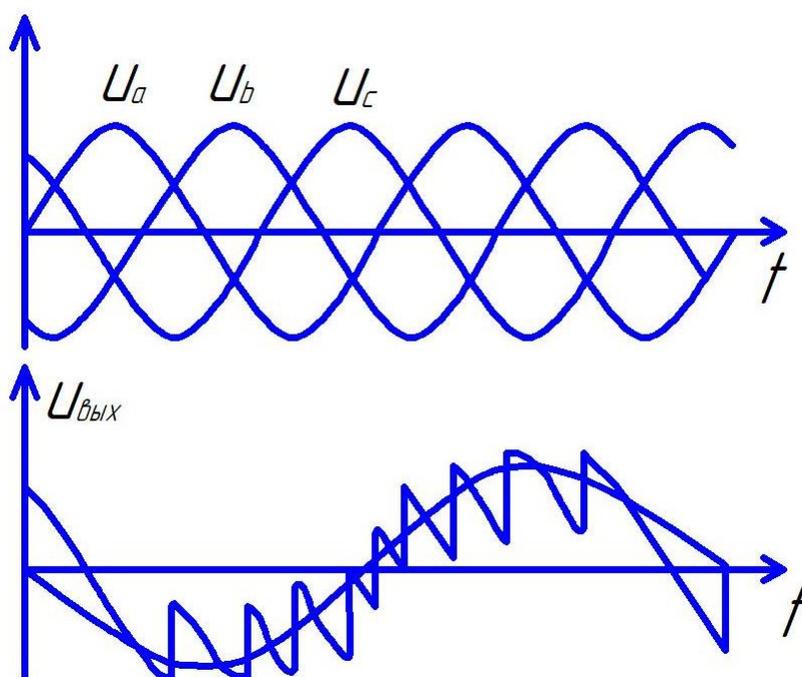


Рисунок 3 – Пример формирования выходного напряжения для одной из фаз нагрузки

Также следует отметить, что «резанная» синусоида напряжения на выходе преобразователя является источником высших гармонических напряжения и тока, которые оказывают деструктивное влияние на сам

электродвигатель и на питающую сеть. Поэтому необходима дополнительная установка фильтров высших гармоник.

К достоинствам данного класса относятся:

- высокий КПД (98,5 % и выше);
- возможность использовать в мощных высоковольтных приводах;
- относительная дешевизна несмотря на дополнительное устанавливаемое оборудование [11], [12].

### 1.2.2 Преобразователи частоты с явно выраженным промежуточным звеном постоянного тока

Данный класс преобразователей нашел широкое применение из-за возможности регулирования частоты как вверх, так и вниз от частоты питающей сети и имеет высокий КПД (около 0,96).

Структурная «схема преобразователя частоты с явно выраженным промежуточным звеном постоянного тока» [22] представлена на рисунке 4.

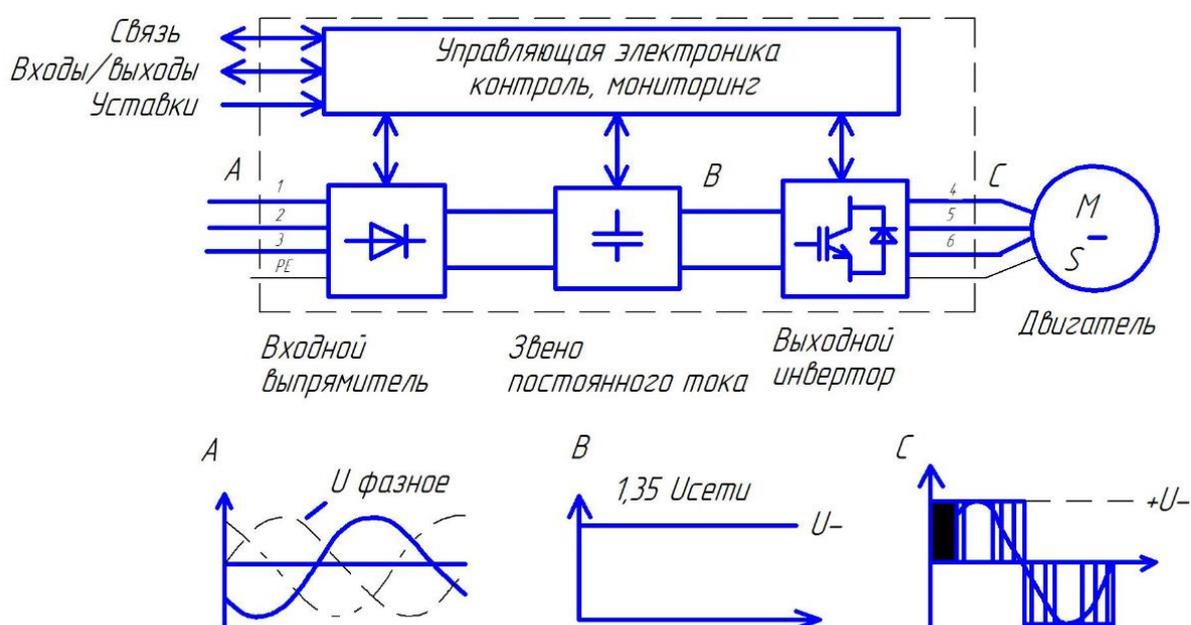


Рисунок 4 – Структурная схема преобразователя частоты с явно выраженным промежуточным звеном постоянного тока

В схеме на рисунке 1.4 в ПЧ входят:

- входной выпрямитель (неуправляемый);
- звено постоянного тока;
- выходной инвертор.

Асинхронный двигатель М получает трехфазное питание напряжения регулируемой частоты и амплитуды.

На входе ПЧ напряжение нерегулируемое, на выходе – регулируемой частоты и амплитуды, причем регулирование частоты и амплитуды происходит отдельно по заданному закону управления.

Входной выпрямитель выполнен на мощных диодах на напряжение до 1000В, токи могут иметь значения несколько десятков и даже сотен ампер.

«Выходной инвертор напряжения – транзисторный, основан на использовании мощных транзисторов на напряжение до 1000В и на ток в несколько десятков и даже сотен ампер» [23].

«Управляющая цепь транзистора может плавно изменять сопротивление и ток главной цепи, а управляющая цепь тиристора может только открыть главную цепь (как ключ), но не может ее закрыть. Хотя это различие в схемах инверторов сглаживается, потому что в инверторах транзисторы, как правило, применяют в ключевом режиме с целью максимального использования допустимой мощности вентиля.

Так как состояние транзисторов непрерывно, т.е. во всех точках оси времени зависит от сигнала управления, то последний в транзисторных инверторах должен иметь вид прямоугольной волны напряжения. Соответственно двум возможным значениям сигнала транзистор занимает одно из двух крайних положений на характеристике» [19].

Условия работы транзистора в ПЧ показаны на рисунке 5.

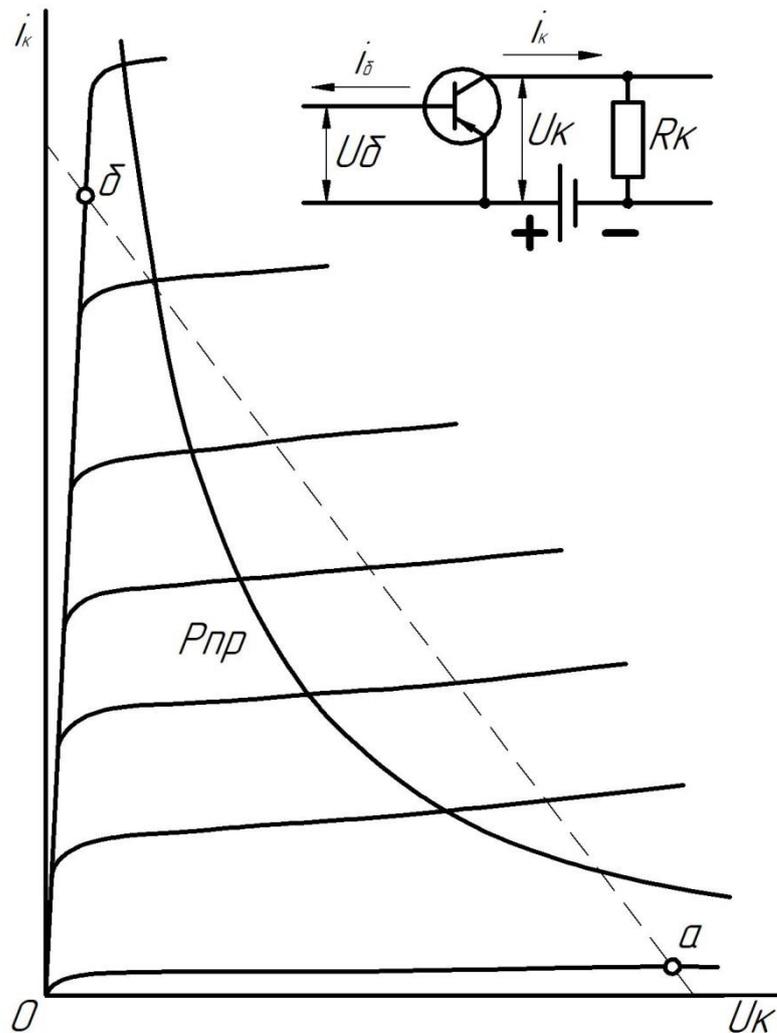


Рисунок 5 – Условия работы транзистора в ПЧ

Такие «преобразователи частоты являются более перспективными, чем тиристорные, т.к. более экономичны и надежны из-за меньшего числа переключающихся элементов» [37].

Управление преобразователем частоты осуществляет управляющая электроника.

Принципиальная электрическая схема преобразователя частоты с явно выраженным промежуточным звеном постоянного тока представлена на рисунке 6 [32].

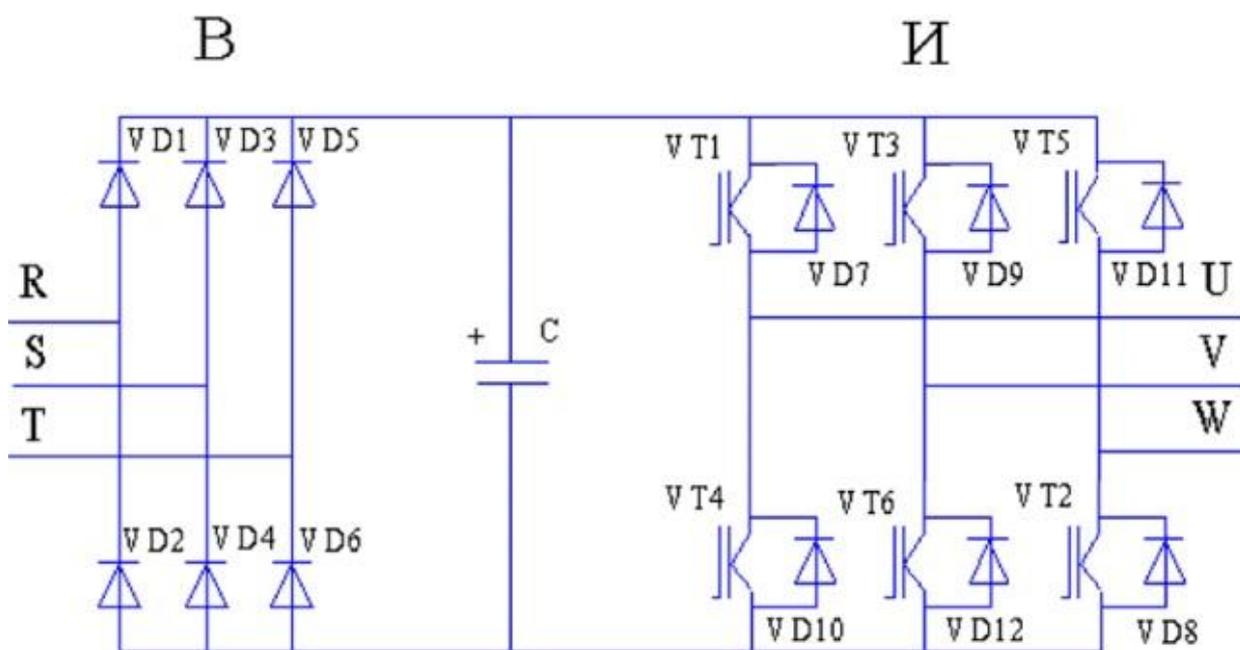


Рисунок 6 – Принципиальная электрическая схема преобразователя частоты с явно выраженным промежуточным звеном постоянного тока

В соответствии с рисунком 1.6 «Управляемый инвертор И питается от сети через неуправляемый выпрямитель В, шунтированный конденсатором С. Выпрямитель выполнен на шести диодах VD1, VD2, VD3, VD4, VD5, VD6, включенных по мостовой схеме. Инвертор, выполненный по мостовой схеме, состоит из шести транзисторов VT1, VT2, VT3, VT4, VT5, VT6, шунтированных диодами VD7, VD8, VD9, VD10, VD11, VD12 для пропускания обратного тока. В качестве электронных ключей в управляемом инверторе И используются запираемые транзисторы и биполярные транзисторы с изолированным затвором IGBT, которые отличаются от тиристоров полной управляемостью, неэнергоемкой схемой управления и высокой рабочей частотой» [32].

### **1.3 Способы регулирования частоты вращения асинхронных двигателей**

Рассмотрим требования к техническим параметрам и режимам регулируемых асинхронных электроприводов, установленные ГОСТ Р 51137-98 Электроприводы регулируемые асинхронные для объектов энергетики. Общие технические условия (п.5.3):

«5.3.1 Номинальные токи на выходе преобразователей частоты должны выбираться из ряда по ГОСТ 28167: 4,0; 5,0; 6,3; 10,0; 16,0; 20,0; 25,0; 31,5; 40,0; 50,0; 63,0; 80,0; 100; 125; 160; 200; 250; 315; 400; 500; 630; 800; 1000; 1250; 1600; 2000; 2500 А.

5.3.2 Номинальные напряжения на выходе преобразователей частоты должны выбираться из ряда: 380; 660; 6000; 10000 В. По согласованию с заказчиком допускается применение значений напряжения, отличающихся от указанных. При коротких линиях допускается за номинальное выходное напряжение преобразователей частоты принимать номинальное напряжение двигателей, входящих в состав электроприводов.

5.3.3 Рабочий диапазон изменения выходного напряжения преобразователей частоты должен быть от 0 до 100 % номинального напряжения.

5.3.4 Рабочие диапазоны регулирования частоты вращения двигателя должны выбираться из ряда: 1:2; 1:5; 1:10; 1:20; 1:30; 1:50; 1:100.

5.3.5 Номинальные частоты на выходе преобразователей частоты должны выбираться из ряда по ГОСТ 25953: 5; 10; 12,5; 16,66; 25; 50; 60; 100 Гц.

5.3.6 Электроприводы должны обеспечивать:

- частотный пуск и регулирование частоты вращения электродвигателей;
- работу при изменении момента нагрузки от 0 до номинального;

- максимальный момент двигателя, определяемый допустимой кратностью перегрузки преобразователя частоты по току» [8].

Рассмотрим требования к системам управления электроприводов, установленные ГОСТ Р 51137-98 Электроприводы регулируемые асинхронные для объектов энергетики. Общие технические условия (п.5.4):

«5.4.1 В электроприводах должна быть предусмотрена возможность местного или дистанционного управления, в том числе и частотой вращения двигателя. Электроприводы должны иметь возможность управления от автоматической системы управления технологическими процессами (АСУ ТП).

5.4.2 Системы управления электроприводов должны обеспечивать:

- разгон и торможение двигателей с заданным ускорением в пределах допустимой перегрузки преобразователя частоты;

- диапазон времени изменения частоты от минимальной до максимальной в заданных пределах;

- статическую точность поддержания частоты вращения, определяемую наклоном механической характеристики двигателя. Замкнутые системы управления электроприводов должны обеспечивать:

- заданное статическое отклонение частоты вращения;

- возможность автоматического регулирования значений ускорения и замедления с заданной точностью;

- заданные значения перерегулирования частоты вращения при изменении задания и время отработки сигнала;

- ограничение значений тока двигателя в динамических режимах и при перегрузках на заданном уровне с заданной точностью» [8], [13].

## 1.4 Требования к автоматизированной системе частотного регулируемого привода

Автоматизированная система частотного регулируемого привода (АС ЧРП) должна соответствовать следующим требованиям:

а) Конструктивно-разрабатываемая система должна состоять из силовой части и системы управления. В силовую часть должна войти:

- автоматические выключатели для защиты от перегрузки и короткого замыкания электродвигателей;
- преобразователи частоты.

б) В состав системы управления проектируемой АС ЧРП должны войти:

- задатчики частоты вращения двигателя (ЗЧВД), размещаемые в помещении операторных;
- пост управления по месту.

Требования к режиму функционирования автоматизированной системы частотного регулируемого привода:

в) Система должна иметь два режима управления: автоматический и ручной. В системе:

- управление насосами в автоматическом режиме должно предусматривать их запуск, регулирование частоты вращения по датчикам обратной связи.

- управление частотой вращения в ручном режиме должно осуществляться из помещения операторной цеха вручную пуск-стоп с поста местного управления, обратная связь в этом случае не действует.

- исчезновение сигнала обратной связи (обрыв датчика), если работа проводится в автоматическом режиме должно вызвать фиксирование текущей скорости вращения электродвигателя с выдачей аварийного предупредительного сигнала оператору; при восстановлении сигнала должно продолжиться регулирование.

- если обратная связь не восстанавливается, а двигателю требуется дальнейшее регулирование, оно должно осуществляться вручную с ЗЧВД.

- обрыв обратной связи при ручном режиме игнорируется, но информация об обрыве должна поступать на ЗЧВД [9].

По технологии в производстве сополимерных бутадиен-стирольных каучуков предусматривается регулирование подачи частично дегазированного латекса в колонну 66. Расход продукта в трубопроводе нагнетания насосов 65 в колонну 66 составляет  $24 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

С помощью регулирование частоты можно обеспечить постоянное поддержания перепада между давлением в трубопроводе выхода паров из колонну 66 и в трубопроводе всаса насосов Н-65. При увеличении параметра  $\Delta P=0,6-0,75 \text{ кгс/см}^2$  увеличивается число оборотов двигателя насосов.

Зависимость скорости вращения от величины перепада давления насосов Н-65 можно представить в следующем табличном виде:

$\Delta P$ (кгс/см <sup>2</sup> )	n (об/мин)
0	0
0,65	$1 \times 10^3$
0,7	$2 \times 10^3$
0,75	$3 \times 10^3$ .

Зависимость скорости вращения в об/мин от величины перепада давления насосов Н-65 в кгс/см<sup>2</sup> можно представить также графической линейной зависимостью  $n = f(\Delta P)$  (рисунок 7).

Применение в преобразователе частоты энергоэффективного двигателя даст повышение КПД на 1-10%. Можно привести следующий известный факт, что для крупных ЭД КПД повысится на 1-2%, а для ЭД малой мощности эффект будет значительней и составит 8-10%.

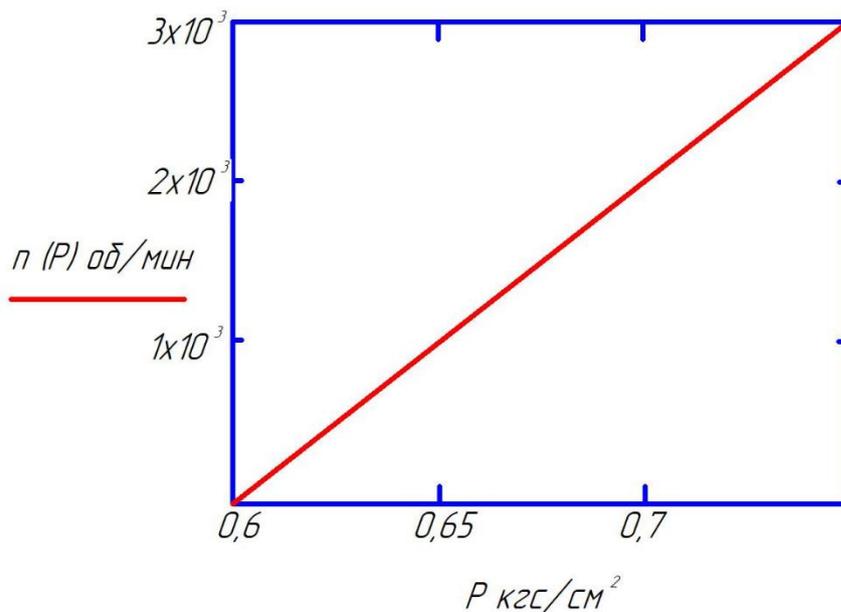


Рисунок 7 – Зависимость скорости вращения в об/мин от величины перепада давления насосов Н-65 в кгс/см<sup>2</sup>

Высокий КПД в двигателях достигается за счет:

- «- увеличения массы активных материалов – меди и стали;
- применения более тонкой и высококачественной электротехнической стали;
- использования меди вместо алюминия в качестве материала обмоток ротора;
- уменьшения воздушного зазора между ротором и статором с помощью высокоточного технологического оборудования;
- оптимизации зубцово-пазовой зоны магнитопроводов и конструкции обмоток;
- применения подшипников высокого качества;
- дооснащения двигателей преобразователями частоты» [1].

Рассмотрим в следующих разделах ВКР возможность дооснащения электродвигателей насосов поз. Н-65 преобразователями частоты. При этом экономия электроэнергии в производстве сополимерных бутадиен-стирольных каучуков может составить до 25% [10], [16].

## **Выводы по разделу 1**

Выбран объект исследования - асинхронный двигатель насоса Н-65 в производстве сополимерных бутадиен-стирольных каучуков ООО «Тольяттикаучук».

Рассмотрены типы преобразователей частоты. Самым оптимальным способом регулирования частоты АД в производстве сополимерных бутадиен-стирольных каучуков ООО «Тольяттикаучук» будет частотное регулирование привода насоса с помощью преобразователя частоты с промежуточным контуром постоянного тока.

Рассмотрены требования к автоматизированной системе частотного регулируемого привода. При изучении компонент системы регулирования АД построена зависимость скорости вращения от величины перепада давления насосов Н-65.

## **2 Разработка схемы управления электродвигателем с устройством частотного регулирования и оценка электрических параметров системы**

### **2.1 Разработка схемы частотного регулирования электродвигателя**

Наиболее подходящей системой электропривода для насоса Н-65 в соответствии с рекомендациями [30] была выбрана система «ПЧ-АД (преобразователь частоты - асинхронный двигатель), включающая преобразователь частоты со звеном постоянного тока и асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором» [30]. «Такая система позволяет регулировать скорость вращения двигателя насоса в пределах от 0 до 3000 об/мин» [40] в зависимости от показателя разности давления в ёмкости и трубопроводе.

На рисунке 8 представлена схема подключения электродвигателя насоса через частотный преобразователь к промышленной сети переменного тока в соответствии с требованиями ПУЭ [24] и «Правилами технической эксплуатации электроустановок потребителей» [25].

Электродвигатель насоса подключается к сети трехфазного напряжения 380 В с защитой через предохранители. Требуемая скорость двигателя устанавливается с помощью потенциометра, подключённого к клеммам 50, 53, 55. Пуск и останов выполняются выключателем, подсоединенным к клемме 18. Основным компонентом системы являются двигатель, характеристики которого будут рассмотрены далее и преобразователь частоты, подбираемый по техническим параметрам двигателя и сети.

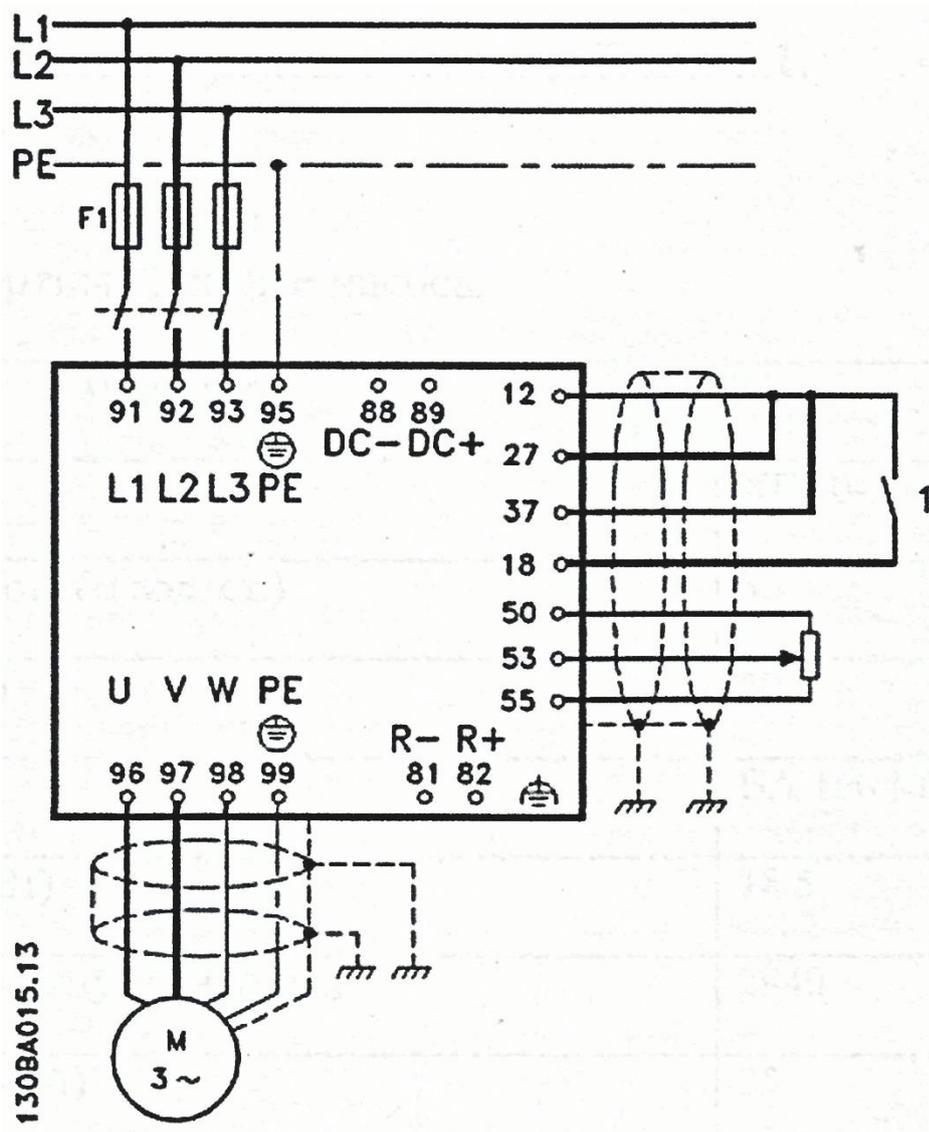


Рисунок 8 – Схема подключения электродвигателя насоса через частотный преобразователь

## 2.2 Характеристики двигателя насоса

Выбранный для исследования насос перекачивает частично дегазированный латекс из колонны К-62 предварительной дегазации латекса в колонны К-66.1,2 для отгонки незаполимеризованных мономеров латекса. Паспортные данные насоса представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Паспортные данные насоса

Параметр	Характеристика
Марка	ХЕ 80-50-200К-СДУ2
Производительность (м.вод.ст.)	50
Напор (м.вод.ст.)	50
Тип ЭД	ВА 160 М2
Мощность ЭД (кВт)	18,5
Число оборотов в минуту (об/мин)	2940
Номинальный ток (А)	35
КПД (%)	90
Коэффициент мощности	0,88
Исполнение	ВЗГ

Электродвигатель насоса взрывозащищенный с короткозамкнутым ротором серии ВА предназначен для работы во взрывоопасных средах химической, нефтеперерабатывающей, газовой и других областей промышленности с уровнем защиты 1ExdIIВТ4. Двигатели предназначены для работы в режиме S1 от сети переменного тока 50Гц, напряжением 380V. Стандартная степень защиты - IP54, исполнение по взрывозащите 1ExdIIВТ4, климатическое исполнение и категория размещения - У2 (УХЛ2, Т2).

Паспортные данные электродвигателя ВА 160 М2 приведены в [6]:

- «номинальная мощность  $P_H = 18,5$  кВт,
- синхронная частота вращения ротора  $n_0 = 3000$  об/мин,
- номинальная частота вращения ротора  $n_H = 2940$  об/мин,
- номинальное питающее напряжение  $U_H = 380$  В,
- номинальная частота питающего напряжения  $f_H = 50$  Гц,
- номинальный ток статора  $I_{1H} = 35$  А,
- момент инерции двигателя  $J = 0,045$  кг·м<sup>2</sup>,
- номинальный КПД  $\eta = 0,91$ ,
- номинальный коэффициент мощности  $\cos\varphi = 0,88$ ,
- отношение пускового тока к номинальному  $K_I = 7,5$ ,
- отношение пускового момента к номинальному  $M_{п}/M_H = 2$ ,
- отношение максимального момента к номинальному  $M_{кр}/M_H = 1$ ,
- число пар полюсов  $p=1$ » [6].

### 2.3 Выбор преобразователя частоты

Выбор преобразователя частоты производим из условия:

$$I_{\text{выч.пч}} \geq I_{1H} \quad (1)$$

$$U_{\text{выч.пч}} \geq U_{1H} \quad (2)$$

Условиям (1) и (2) удовлетворяет модульный преобразователь частоты VLT Automation Drive FC 300, производитель Danfoss [18].

VLT Automation Drive FC 300 имеет режим работы с переменным и постоянным крутящим моментами.

«Привод VLT® Automation Drive представляет собой концепцию единого привода, применимого для широкого спектра операций - от простых до серво приложений - на любом агрегате или производственной линии. VLT Automation Drive разработан на основе открытой модульной платформы, что

делает его исключительно адаптируемым и программируемым приводом. Удобный и настраиваемый пользовательский интерфейс поддерживает целый ряд языков, в том числе русский.

Серия VLT Automation Drive предлагает интеллектуальную технологию автоматической настройки при подключении и превосходную надежность, что делает взаимодействие с приводом легкой задачей» [17].

Блок-схема преобразователя частоты VLT Automation Drive FC 300 показана на рисунке 9 [18]. На рисунке 9 обозначены:

- 1 – питающая трехфазная сеть
- 2 – неуправляемый выпрямитель
- 3 – шины постоянного тока
- 4 - реакторы постоянного тока
- 5 – конденсатор
- 6 – управляемый инвертор
- 7 – двигатель
- 8 – схема управления

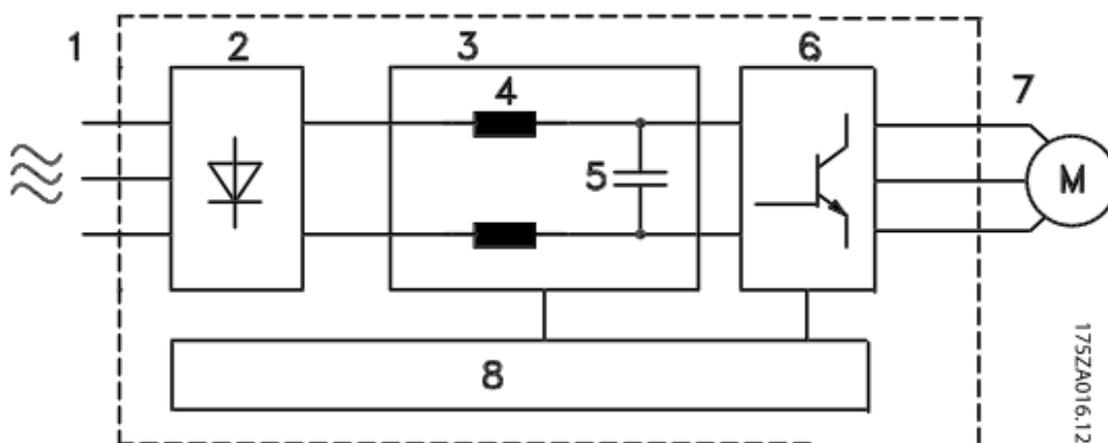


Рисунок 9 – Блок-схема преобразователя частоты VLT Automation Drive FC 300

Функция АОЭ регулирует выходное напряжение преобразователя частоты в зависимости от нагрузки в любых режимах работы.

Функция АОЭ увеличивает КПД двигателя, оптимизируя его намагничивание (регулируется реактивная составляющая тока), и дополнительно экономит от 5 до 15% потребляемой электроэнергии в зависимости от режима работы (относительно преобразователей частоты, не имеющих такой возможности). Более низкий ток также существенно снижает акустический шум двигателя.

Упрощается ввод в эксплуатацию, т.к. не требуется дополнительного программирования для однодвигательных HVAC-приложений. Для оптимизации тока намагничивания двигателя на разных скоростях сейчас используется значение  $\cos\phi$ , рассчитанное функцией Автоматической Адаптации Двигателя.

Перед первым пуском привода рекомендуется выполнить процедуру Автоматической Адаптации Двигателя.

Процедура выполняется без вращения вала двигателя (что очень удобно, т.к. не всегда имеется возможность пускать весь агрегат в таком режиме). Во время этой процедуры преобразователь частоты измеряет и запоминает актуальные параметры двигателя, чтобы затем использовать их в эквивалентной схеме замещения (модели) двигателя в алгоритме управления.

Встроенный каскадный контроллер.

«Каскадный контроллер используется в насосных приложениях, где определённое давление (напор) или уровень необходимо поддерживать в широком динамическом диапазоне. Работа одного большого насоса с переменной скоростью в широком диапазоне не является идеальным решением из-за низкого КПД насоса и ещё потому, что нижняя граница скорости, как правило, ограничена 25% от номинального значения» [28].

Функция базового каскадного контроллера.

Эта функция уже встроена в программное обеспечение приводов VLT 1\QUA Drive и VLT HVAC Drive (стандарт, используются 2 встроенных реле) [27].

В базовом варианте «каскадного управления привод регулирует скорость вращения одного ведущего двигателя и подключает (через устройства плавного пуска или по схеме «звезда-треугольник») по мере необходимости ещё два дополнительных двигателя, работающих с постоянной скоростью. Переменная скорость всей системы обеспечивается регулированием скорости ведущего ротора. Таким образом, поддерживается постоянное давление, в результате его снижается нагрузка на систему и шум работающей установки» [17].

Базовый каскадный контроллер может управлять тремя насосами одного размера с чередованием ведущего для равномерной загрузки и износа всех насосов.

Технические характеристики преобразователя частоты VLT Automation Drive FC 300 приведены в соответствии с руководством по эксплуатации:

- «- номинальная выходная мощность 18,5 кВт,
- номинальный ток нагрузки (непрерывный) 37,5 А,
- прерывистый ток нагрузки 41,3 А,
- номинальное напряжение на входе 3x380-440 (+10%-10%) В,
- максимальный входной ток 34 А,
- прерывистый входной ток 37,4 А,
- потери мощности при номинальной макс. нагрузке 465 кВт,
- диапазон регулирования напряжения 0 -  $U_{\text{сети}}$ ,
- частота питающей сети 50/60 Гц,
- разрешающая способность выходной частоты в интервале 0-1000 Гц,
- диапазон регулирования скорости (разомкнутый контур) 1:100 синхронной скорости вращения,
- диапазон регулирования скорости вращения (замкнутый контур) 1:1000 синхронной скорости вращения,
- точность регулирования скорости вращения (разомкнутый контур) 30–4000 об/мин: погрешность  $\pm 8$  об/мин,

- точность регулирования скорости (в замкнутом контуре) в зависимости от разрешающей способности устройства в обратной связи 0–6000 об/мин: погрешность  $\pm 0,15$  об/мин,

- точность регулирования крутящего момента (обратная связь по скорости) макс. погрешность  $\pm 5\%$  от номинального крутящего момента,

- коэффициент мощности в номинальном режиме 0,98» [18].

## 2.4 Характеристика статических режимов работы электропривода

Алгоритм расчета скоростных характеристик электропривода приведен в таблице 2.

Таблица 2 – Алгоритм расчета скоростных характеристик электропривода

Алгоритм	Рассчитываемая величина	Номер формулы
$x_k = \sqrt{\frac{R_2^2}{S_k^2} - R_1^2} = \sqrt{\frac{0,507^2}{0,12^2} - 0,507^2} = 4,19 \text{ Ом}$	индуктивное фазное сопротивление короткого замыкания	(3)
$S(f) = \frac{\omega_0 \cdot f^* - \omega}{\omega_0 \cdot f^*},$	скольжение на заданной частоте	(4)
$f^* = \frac{f_i}{f},$	относительная частота	(5)
$I_2 = \frac{U_\phi(f)}{\sqrt{\left[ \left( R_1 + \frac{R_2 \cdot \omega_{0H} \cdot f^*}{\omega_{0H} \cdot f^* - \omega} \right)^2 + (x_k \cdot f^*)^2 \right]}}$	скоростная характеристика	(6)

Скоростная характеристика для различной частоты питающего напряжения рассчитывалась по приведенному выше алгоритму и представлена в таблице 3.

Таблица 3 – Скоростная характеристика для различной частоты питающего напряжения

50 Гц		40 Гц		30 Гц		20 Гц		10 Гц	
$\omega$ ,рад	ток,А								

Продолжение таблицы 3

50 Гц		40 Гц		30 Гц		20 Гц		10 Гц	
$\omega$ ,рад	ток,А								
0	238,39		274,65	0	318,13	0	365,89	0	407,46
30	236,69	10	273,64	10	315,27	20	355,16	6	399,18
60	234,59	25	271,95	20	313,64	40	340,22	10	392,91
90	231,91	50	268,59	40	308,03	50	330,32	20	372,87
120	228,37	70	265,24	60	300,82	60	318,02	25	359,95
150	223,53	100	258,62	80	291,23	70	302,37	30	344,20
180	216,50	130	248,87	100	277,89	80	281,80	36	320,08
220	200,37	160	233,26	120	258,17	90	253,70	42	287,45
250	176,48	180	211,08	140	226,48	100	213,30	48	240,91
280	123,81	220	142,08	160	169,07	110	151,19	54	169,49
307	5,72	245	10,52	180	47,20	120	47,33	60	47,40

Скоростные характеристики двигателя приведены на рисунке 10.

Таким образом, исходя из графика (рисунок 10) следует, по мере уменьшения частоты питающего напряжения  $f$  от 50 до 10 Гц, т. е. при увеличении скольжения, уменьшается скорость ротора, ток возрастает за счет

увеличения э. д. с. ротора, однако рост тока ограничивается увеличением индуктивного сопротивления ротора.

Механическая характеристика АД рассчитывается по выражению:

$$M = \frac{3 \cdot U_{\phi}^2(f) \cdot \frac{R_2}{S(f)}}{\omega_0(f) \cdot \left[ \left( R_1 + \frac{R_2}{S(f)} \right)^2 + x_k^2(f) \right]} \quad (7)$$

В формуле (7)  $U_{\phi}$  – входное напряжение питающей сети;  $s(f)$  – скольжение;  $R_1$  и  $R_2$  – активные сопротивления обмоток двигателя.

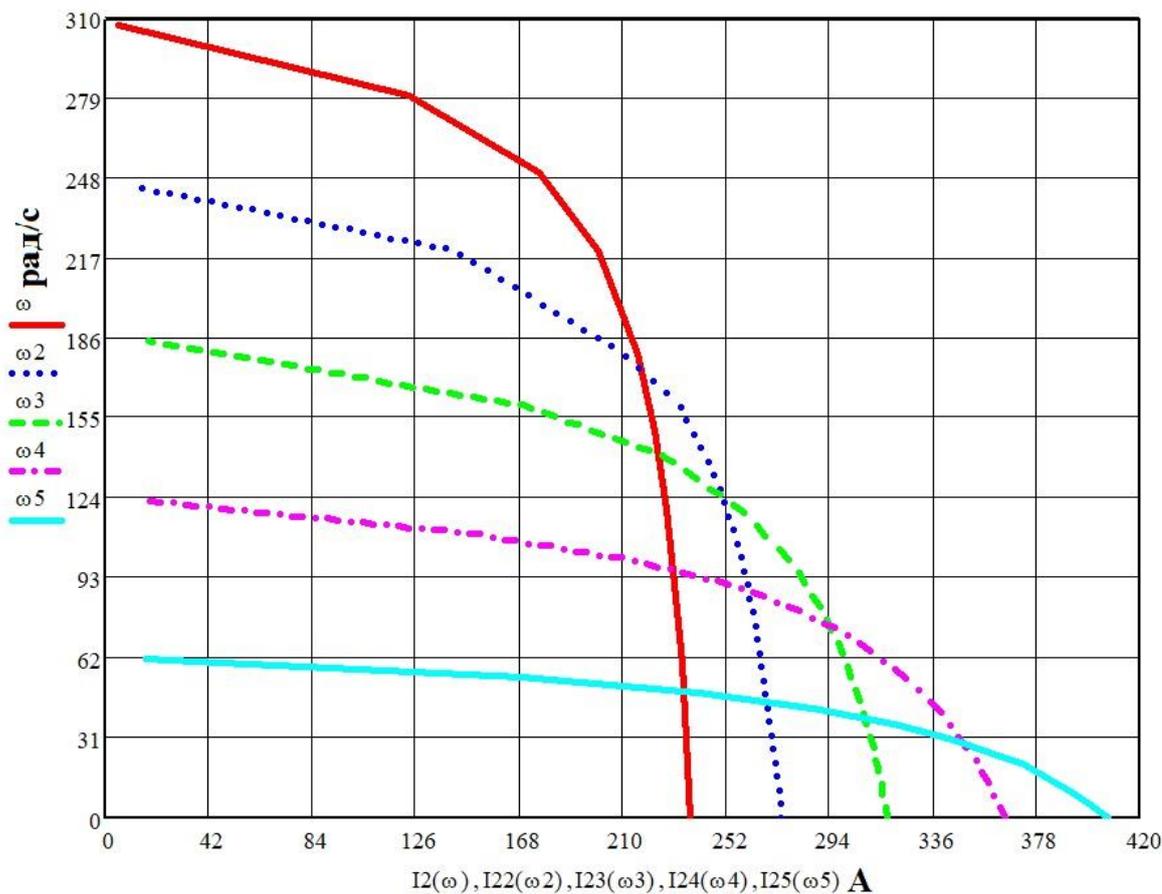


Рисунок 10 – Скоростные характеристики двигателя

Момент механических характеристик на различных частотах представлен в таблице 4.

Таблица 4 – Значения момента для механических характеристик при различных частотах

50 Гц		40 Гц		30 Гц		20 Гц		10 Гц	
$\omega$	M	$\omega_2$	M2	$\omega_3$	M3	$\omega_4$	M4	$\omega_5$	M5
0	188,376	0	188,641	0	188,906	0	198,173	0	198,44

Продолжение таблицы 4

50 Гц		40 Гц		30 Гц		20 Гц		10 Гц	
$\omega$	M	$\omega_2$	M2	$\omega_3$	M3	$\omega_4$	M4	$\omega_5$	M5
30	199,67	10	193,212	10	194,417	20	208,657	6	200,749
60	212,134	25	200,434	20	201,534	40	231,46	10	208,929
90	225,824	50	213,498	40	215,612	50	244,03	20	231,73
120	240,673	70	224,906	60	231,191	60	257,065	25	244,293
150	256,309	100	243,504	80	248,085	70	269,88	30	257,317
180	271,617	130	263,08	100	265,461	80	280,919	36	272,533
220	285,625	160	280,507	120	280,713	90	286,644	42	284,349
250	278,333	180	286,315	140	286,019	100	288,659	48	284,547
280	218,131	220	235,213	160	256,08	110	235,301	54	248,852
307	12,11	245	22,072	180	92,442	120	92,444	60	92,445

По таблице 4 построены механические характеристики и статический момент АД – рисунок 11.

Исходя из результатов, приведенных в таблице 4 и на графике механических характеристик двигателя (рисунок 11), можно заключить, что при изменении частоты питающего напряжения  $10 \leq f \leq 50$  и как следствие

изменения скорости вращения ротора от 0 до  $\omega_0=f$  момент в рабочем диапазоне не изменяется. Это значит, что при снижении скорости вращения электродвигателя насоса до оптимальной, его нагрузочная способность не снижается.

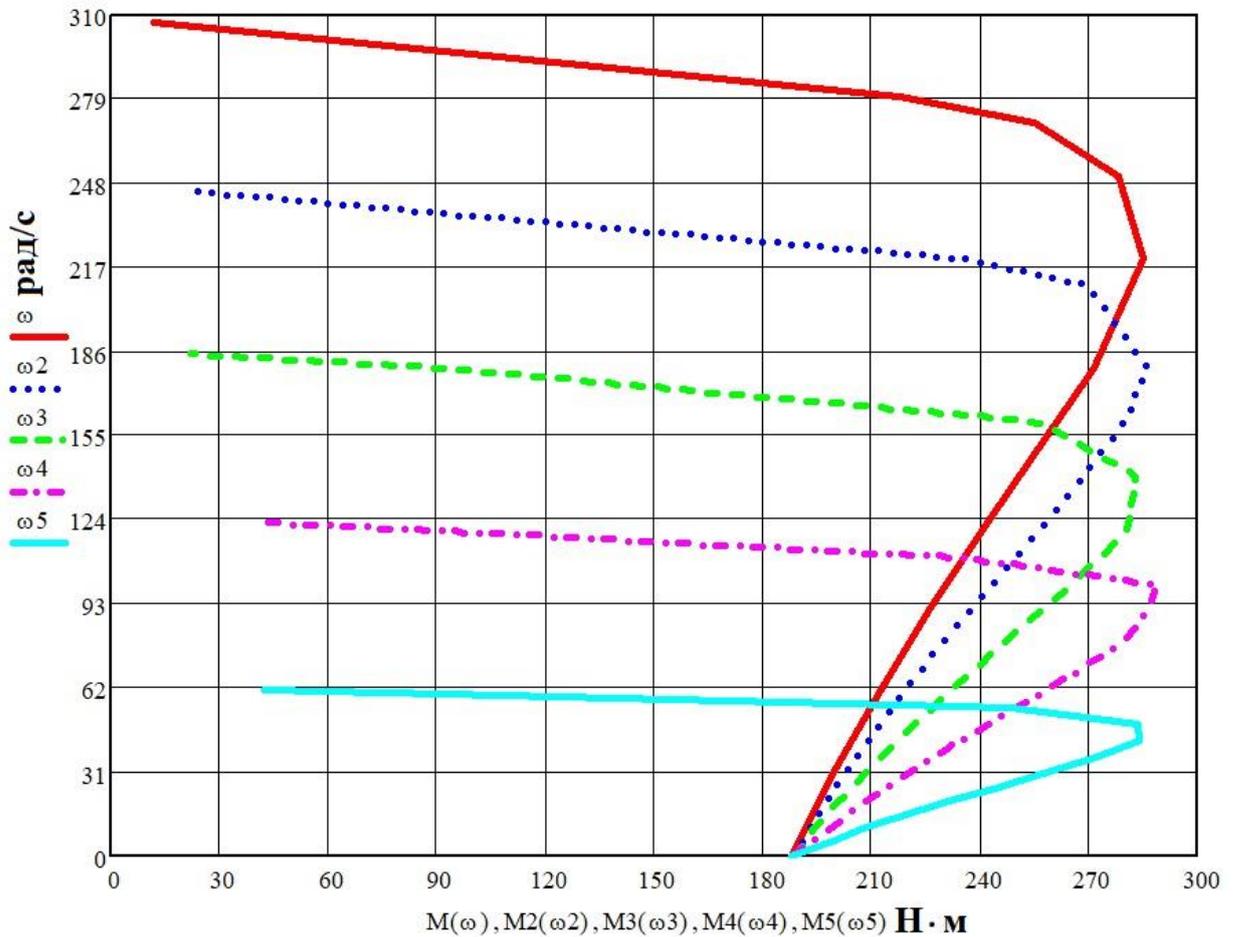


Рисунок 11 – Механические характеристики и статический момент  $M_c(f)=0,45M_{кр}(f)$

## 2.5 Энергетические характеристики электропривода

К энергетическим характеристикам электропривода относятся потери мощности, которые состоят из постоянной  $\Delta P_{\text{пост}}$  и переменной  $\Delta P_{\text{перем}}$  составляющих, КПД и коэффициент мощности. Постоянные потери – это механические потери, потери меди в статоре АД; переменные потери определяются режимом работы электропривода.

Алгоритм расчета потерь мощности и КПД сведен в таблицу 5.

Таблица 5 – Алгоритм расчета потерь и КПД

Алгоритм	Рассчитываемая величина	Номер формулы
$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_{\text{пост}} + \Delta P_{\text{перем}}$	суммарные потери	(8)
$\Delta P_{1,м} = 3 \cdot I_{\mu}^2 \cdot R_1 = 3 \cdot 7,3^2 \cdot 0,507 = 81 \text{ Вт}$	потери в меди статора	(9)
$\Delta P_{\text{пер}} = M_n \cdot \omega_0 \cdot S(f) \cdot \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) + 3 \cdot I_1^2 \cdot R_1$	переменные потери	(10)
$\eta = \frac{M \cdot \omega}{M \cdot \omega + \Delta P_{\Sigma}}$	КПД	(11)

Где механические потери:

$$\Delta P_{\text{мех}} = \Delta P_{\text{мех.н}} \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2 = k_{\text{мех}} \cdot P_n \cdot \frac{1 - S(f)}{1 - S_n} = 0,015 \cdot 7500 \cdot \frac{1 - \frac{\omega_0 \cdot f^* - \omega}{\omega_0 \cdot f^*}}{1 - 0,029}. \quad (12)$$

В таблице 5 приняты обозначения:

$P_n$  – номинальная паспортная мощность двигателя;

$M$  – момент нагрузки;

$\omega$  – скорость.

Результаты расчетов КПД занесем в таблицу 6.

Таблица 6 – Значения КПД при различных частотах

50 Гц		40 Гц		30 Гц		20 Гц		10 Гц	
$\omega$	$\eta$	$\omega 2$	$\eta$	$\omega 3$	$\eta$	$\omega 4$	$\eta$	$\omega 5$	$\eta$
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30	0,665	10	0,389	10	0,389	20	0,565	6	0,275
60	0,809	25	0,621	20	0,565	40	0,73	10	0,389
90	0,871	50	0,775	40	0,73	50	0,775	20	0,565
120	0,906	70	0,834	60	0,809	60	0,809	25	0,621
150	0,927	100	0,885	80	0,855	70	0,834	30	0,665
180	0,942	130	0,914	100	0,885	80	0,855	36	0,707
220	0,954	160	0,933	120	0,906	90	0,871	42	0,74
250	0,959	180	0,942	140	0,921	100	0,885	48	0,767
280	0,953	220	0,954	160	0,933	110	0,896	54	0,79
307	0,552	245	0,958	180	0,942	120	0,906	60	0,809

Из формулы (11) следует, что при изменении скорости электрической машины ее КПД изменяется, как показано на рисунке 12. Анализируя рисунок 12 можно сделать вывод, что с увеличением частоты и скорости вращения ротора увеличиваются суммарные потери за счет потерь на перемагничивание стали, этим можно объяснить нелинейность графика. График КПД имеет вид ломанной линии, у каждой линии разный угол наклона. Наибольший угол наклона характерен для первого участка, что можно также объяснить явлением перемагничиванием стали.

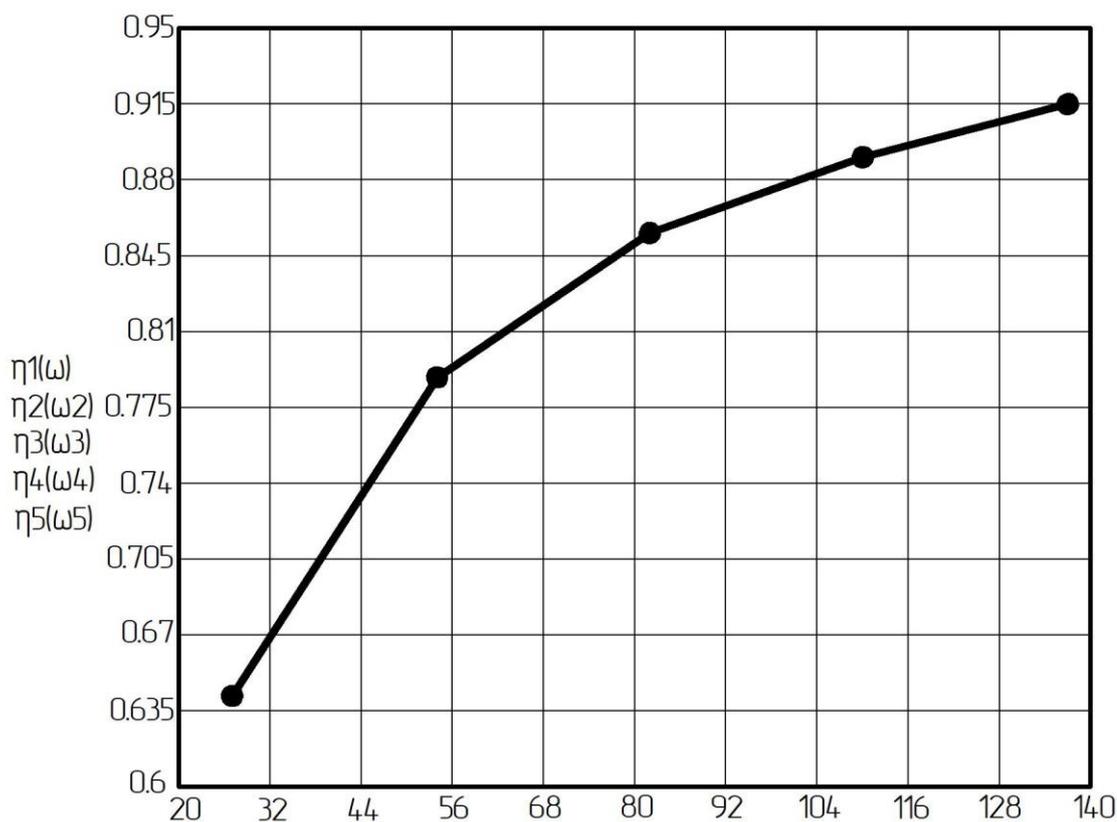


Рисунок 12 – Зависимость КПД= $f(\omega)$  при  $M_c(f)=0,45M_{кр}(f)$

Рассчитаем коэффициент мощности по формуле (12) и занесем полученные данные в таблицу 7.

$$\cos \varphi = \frac{M \cdot \omega}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_n \cdot f^*} \cdot \eta \quad (12)$$

Таблица 7 – Коэффициент мощности при различных нагрузках

50 Гц		40 Гц		30 Гц		20 Гц		10 Гц	
$\omega$	$\cos\varphi$	$\omega 2$	$\cos\varphi$	$\omega 3$	$\cos\varphi$	$\omega 4$	$\cos\varphi$	$\omega 5$	$\cos\varphi$
0	0	0	0,578	0	0,603	0	0,159	0	0
307	0,292	245	0,578	180	0,603	120	0,65	60	0,8

График зависимости  $\cos\varphi$  от скорости вращения ротора при  $M_c(f)=0,45M_{кр}(f)$  представлен на рисунке 13.

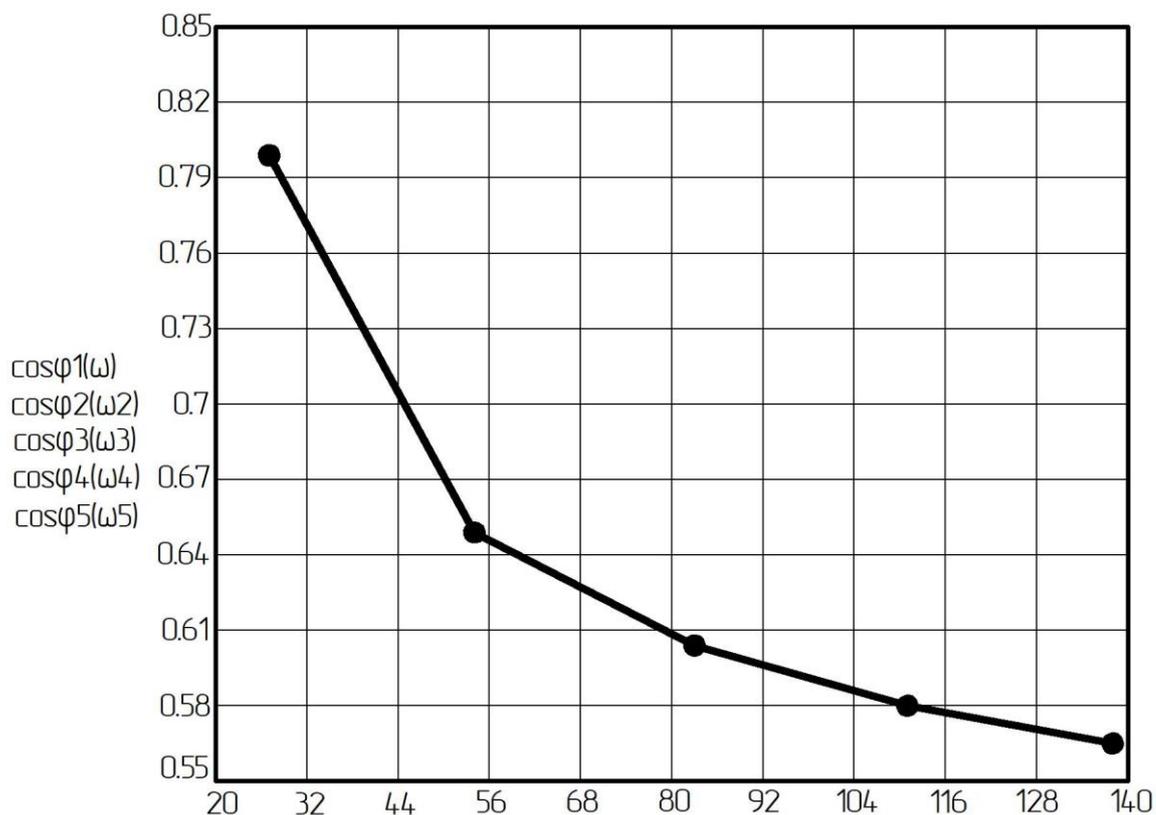


Рисунок 13 – Зависимость  $\cos\varphi$  при  $M_c(f)=0,45M_{кр}(f)$

Из графика зависимости  $\cos\varphi$  на рисунке 13 от скорости вращения ротора, которая меняется при изменении частоты  $f$ , можно сделать вывод, что при меньших значениях частоты  $\cos\varphi$  увеличивается. Происходит это по причине уменьшения индуктивной составляющей сопротивления статора и соответственно роста активной составляющей сопротивления статора АД.

## 2.6 Разработка расчетной модели электродвигателя в среде MatLab

Для моделирования выполним расчет механических характеристик электродвигателя, расчет выполнен в таблице 8 в соответствии с рекомендациями работ [29], [31], [33], [34], [36], [41].

Таблица 8 – Алгоритм расчета механических характеристик ЭД

Алгоритм	Рассчитываемая величина	Номер формулы
$n_1=3000$	частота вращения магнитного поля (синхронная частота вращения), об/мин	-
$S_n = \frac{n_1 - n_2}{n_1} = \frac{3000 - 2940}{3000} = 0,02$	скольжение ЭД, о.е.	(13)
$S_k = S_n \cdot (M_{max} + \sqrt{M_{max}^2 - 1}) = 0,02 \cdot (3,2 + \sqrt{3,2^2 - 1}) = 0,125$	критическое скольжение, о.е.	(14)
$\omega_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_n}{p} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 50}{1} = 314$	угловая частота вращения магнитного поля (синхронная частота), рад/мин	(15)
$\omega_n = \frac{\pi \cdot n_n}{30} = \frac{3,14 \cdot 2940}{30} = 307,876$	номинальная угловая частота вращения ротора, рад/мин	(16)
$M_n = \frac{P_n}{\omega_n} = \frac{18500}{307,876} = 60,089$	номинальный момент, Н·м	(17)
$M_{max} = M_{max} \cdot M_n = 3,2 \cdot 60,089 = 192,285$	максимальный момент, Н·м	(18)

$M_n = m_n \cdot M_n = 2 \cdot 60,089 = 120,178$	пусковой момент, Н·м	(19)
--	----------------------	------

Продолжение таблицы 8

Алгоритм	Рассчитываемая величина	Номер формулы
$P_m = 0,05 \cdot P_n = 0,05 \cdot 18500 = 925$	механические потери (Вт)	(20)
$C_p = 1,019$	расчетный коэффициент	-
$R_p = \frac{1}{2} \cdot \frac{P_n + P_m}{I_{1n}^2 \cdot \frac{1 - S_n}{S_n}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{18500 + 925}{35^2 \cdot \frac{1 - 0,02}{0,02}} = 0,108$	приведенное активное сопротивление ротора, Ом	(21)
$R_c = \frac{U_\phi \cdot \cos \varphi \cdot (1 - \eta)}{I_{1n}} - C_p^2 \cdot R_p - \frac{P_m}{3 \cdot I_{1n}^2} =$ $= \frac{220 \cdot 0,88 \cdot (1 - 0,6)}{35} - 1,019^2 \cdot 0,108 - \frac{925}{3 \cdot 35^2} =$ $= 0,409$	активное сопротивление статора, Ом	(22)
$L_{pc} = \frac{U_\phi}{4 \cdot \pi \cdot f_n \cdot (1 - C_p^2) \cdot K_u \cdot I_{1n}} =$ $= \frac{220}{4 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot (1 - 1,019^2) \cdot 7,5 \cdot 35} =$ $= 6,526 \cdot 10^{-4}$ $L_{pp} = L_{pc} = 6,526 \cdot 10^{-4}$	приведенная индуктивность рассеяния статора и ротора, Гн	(23)
$L_{pc} = \frac{U_\phi}{2 \cdot \pi \cdot f_n \cdot I_{1n} \cdot \sqrt{1 - \cos^2 \varphi} - \frac{2}{3} \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot f_n \cdot M_{max} \cdot S_n}{P \cdot U_\phi} \cdot \frac{S_n}{S_k}} =$ $= \frac{220}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 35 \cdot \sqrt{1 - 0,88^2} - \frac{2}{3} \cdot \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 192,285}{1 \cdot 220} \cdot \frac{0,02}{0,125}} =$ $= 0,042$	индуктивность статора, Гн	(24)

$L_M = L_c - L_{pc} = 0,042 - 6,526 \cdot 10^{-4} = 0,042$	индуктивность цепи, Гн	(25)
--	---------------------------	------

Продолжение таблицы 8

Алгоритм	Рассчитываемая величина	Номер формулы
$C_{p1} = 1 + \frac{L_{pc}}{L_M} = 1 + \frac{6,526 \cdot 10^{-4}}{0,042} = 1,016$	расчетный коэффициент для сравнения с $C_p$	(26)
$F_m = \frac{P_M}{2 \cdot \omega_n^2} = \frac{925}{2 \cdot 307,876^2} = 4,879 \cdot 10^{-3}$	коэффициент трения, (Н·м·с)	(27)

Модель работы электродвигателя в среде MatLab приведена на рисунке 14. В исследуемую модель вошли элементы:

- «Asynchronous Machine SI Unit – модель асинхронного двигателя параметрами, соответствующими номинальным паспортным данным двигателя В А 160 М2;

- три источника синусоидального напряжения AC Voltage Source с номинальными параметрами:  $f=50$  Гц,  $U_m=311$  В; сдвинутые по фазе друг относительно друга на  $120^\circ$ , моделируют трехфазную систему напряжений с номинальными значениями:  $U_\phi=220$  В,  $U_\Delta=380$  В.

- Three-Phase V-I Measurement – трехфазный мультиметр для осуществления замеров сетевого тока и напряжения.

- три элемента типа Scope – модели осциллографов для просмотра графиков сетевых тока и напряжения, а также изменения во времени частоты вращения ротора двигателя и момента на его валу.

- два элемента типа Display для контроля установившегося значения

тех же параметров.

- Step – элемент, с помощью которого, возможно смоделировать наброс нагрузки на вал двигателя в определенный момент времени» [35].

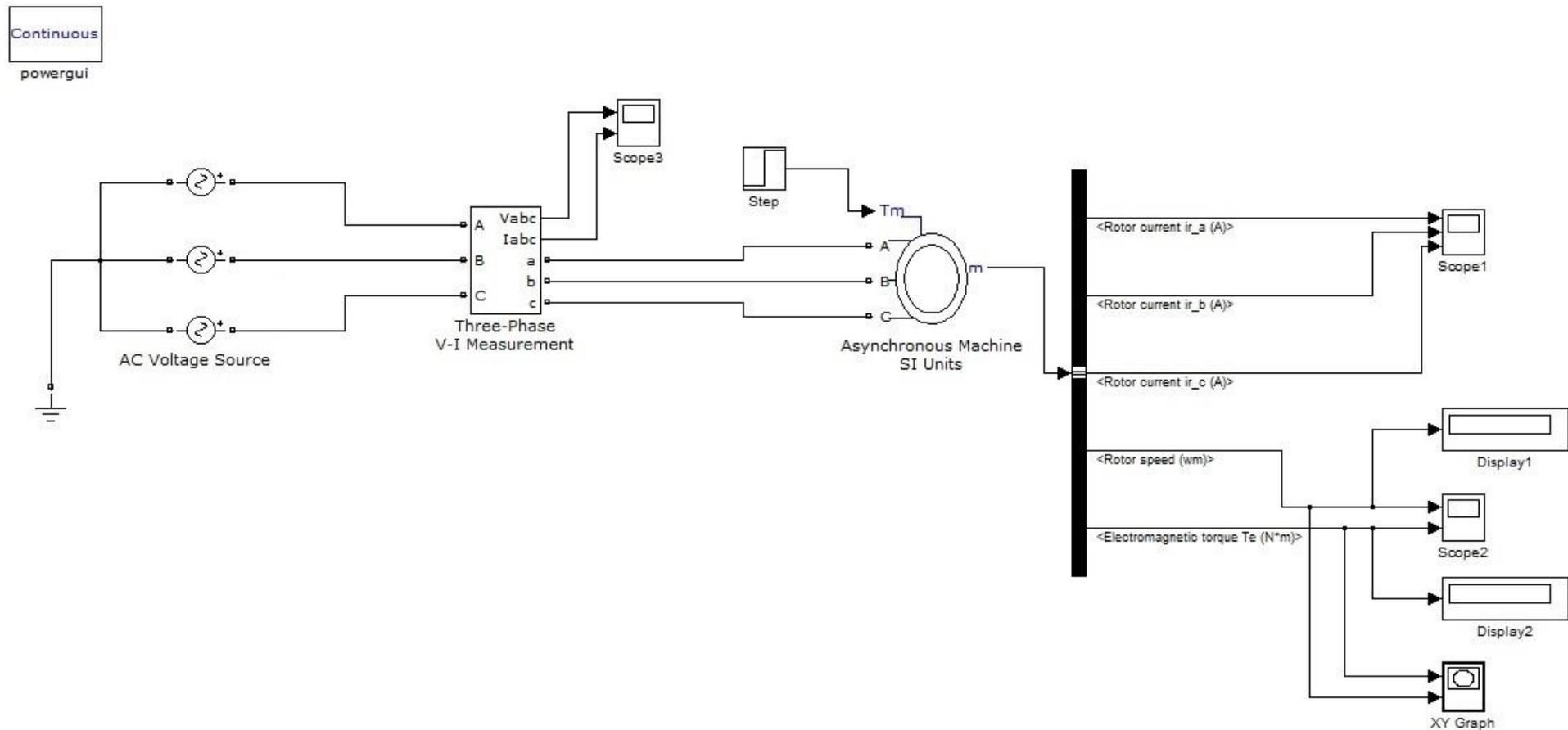


Рисунок 14 – Модель работы электродвигателя в среде MatLab

Для начала расчета модели необходимо инициализировать модель работы электродвигателя: выполнить расчет балансов токов в расчетных узлах модели. «Инициализация осуществляется инструментом Load Flow and Machine Initialization блока Powergui» [2]. «Для выполнения инициализации необходимо ввести исходные данные в правой части окна ввода параметров, которое было модифицировано» [39] и представлено на рисунке 15.

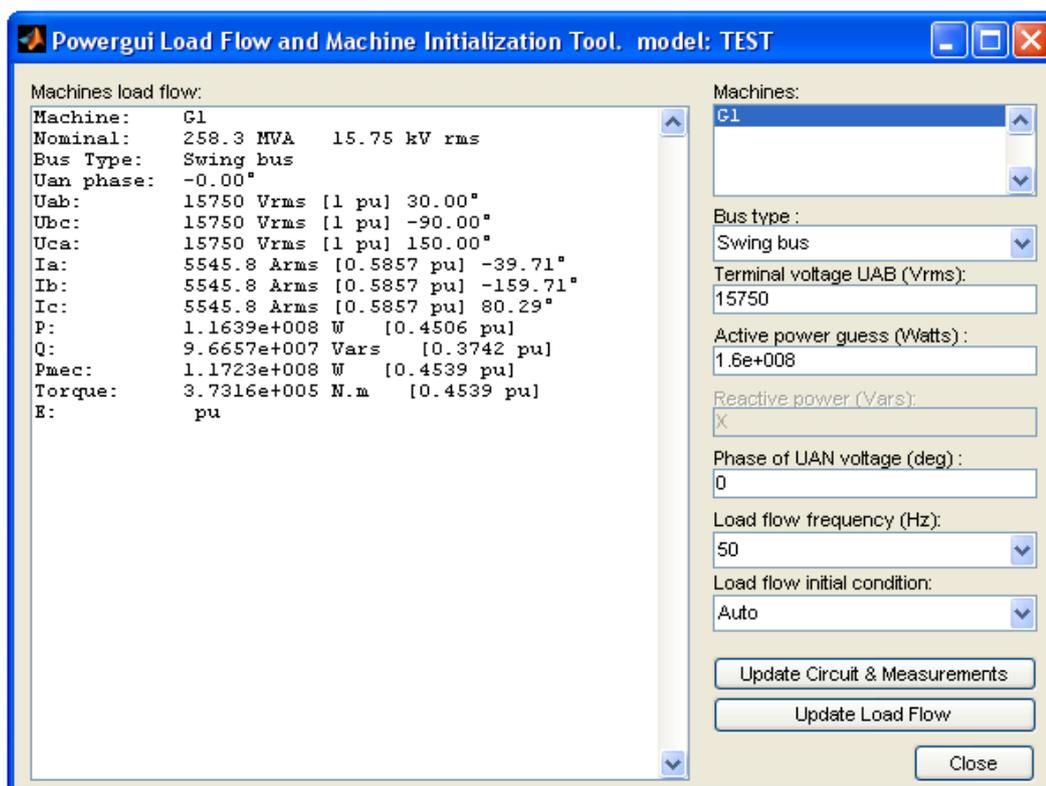


Рисунок 15 – Окно ввода параметров инструмента Load Flow and Machine Initialization

Состав, как указано в [5] исходных данных расчетной модели может меняться:

- «а) Machines – список электрических машин, имеющих в модели;
- б) Bus type – параметр определяет перечень задаваемых параметров машины. Значение выбирается из списка;

в) Terminal voltage  $U_{AB}$  – задается действующее значение напряжения между фазами статорной обмотки машины;

д) Active power – задается активная мощность, вырабатываемая машиной;

е) Reactive power – задается реактивная мощность, вырабатываемая машиной;

ж) Phase of UAN voltage – задается начальная фаза напряжения UAN;

и) Load flow frequency – задается частота;

к) Load Flow initial condition – значение параметра выбираются из списка:

1) Auto – начальные условия расчета определяются автоматически;

2) Start from previous solution – результаты предыдущего расчета являются начальными условиями для следующего.

При внесении изменений в схему пересчет начальных условий необходимо выполнить нажатием кнопки Update circuit & measurements.

После нажатия кнопки Update Load Flow произойдет автоматическая запись рассчитанных начальных условий в параметры блоков электрических машин.

В левой части окна Load Flow and Machine Initialization отображаются результаты расчетов требуемых характеристик электродвигателя. Результаты расчета выводятся в именованных единицах, а в скобках указываются их значения в относительных единицах» [5].

В расчетной модели библиотека приводов включает три типа двигателей: «двигатели постоянного тока, асинхронные машины и семейство, представляющее синхронные машины с постоянными магнитами, синхронные реактивные машины и переключаемые реактивные машины (SRM)» [41]. Это делает расчетную модель удобной для проведения численных исследований.

## 2.7 Моделирование механических характеристик и тока электродвигателя в среде MatLab

Полученные в результате моделирования в среде MatLab кривые электродвигателя угловой скорости  $\omega=f(t)$  и момента  $M_B=f(t)$ , наброса нагрузки  $M_{с.доп}=0.3M_H$ , тока электродвигателя при изменении частоты ( $f_1=50$  Гц,  $f_2=37,5$  Гц,  $f_3=25$  Гц) приведены на рисунках 16 – 28.

Для указанных значений частоты, используя «закон частотного регулирования» [20]  $\frac{U}{\sqrt{f}} = const$ , найдем напряжения:

$$f_1=50 \text{ Гц}, U_{л}=380 \text{ В},$$

$$f_2=37,5 \text{ Гц}, U_{л}=329 \text{ В},$$

$$f_3=25 \text{ Гц}, U_{л}=269 \text{ В}.$$

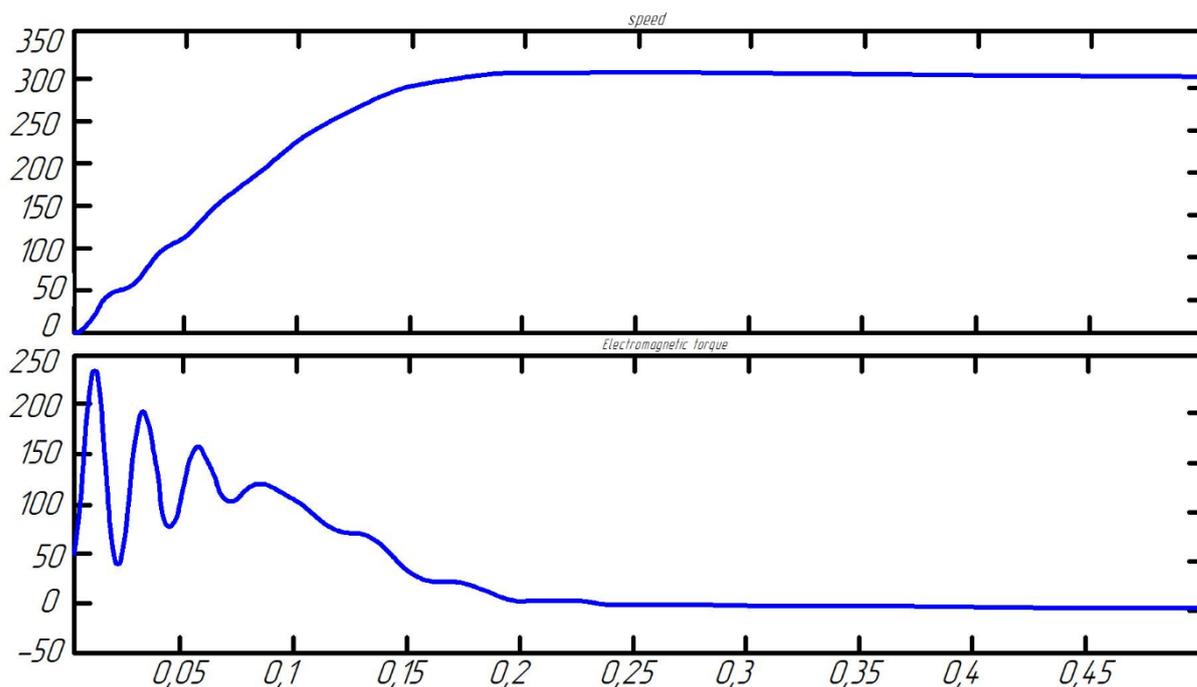


Рисунок 16 – Графики  $\omega=f(t)$  и  $M_B=f(t)$  при  $f=50$  Гц (фрагмент)

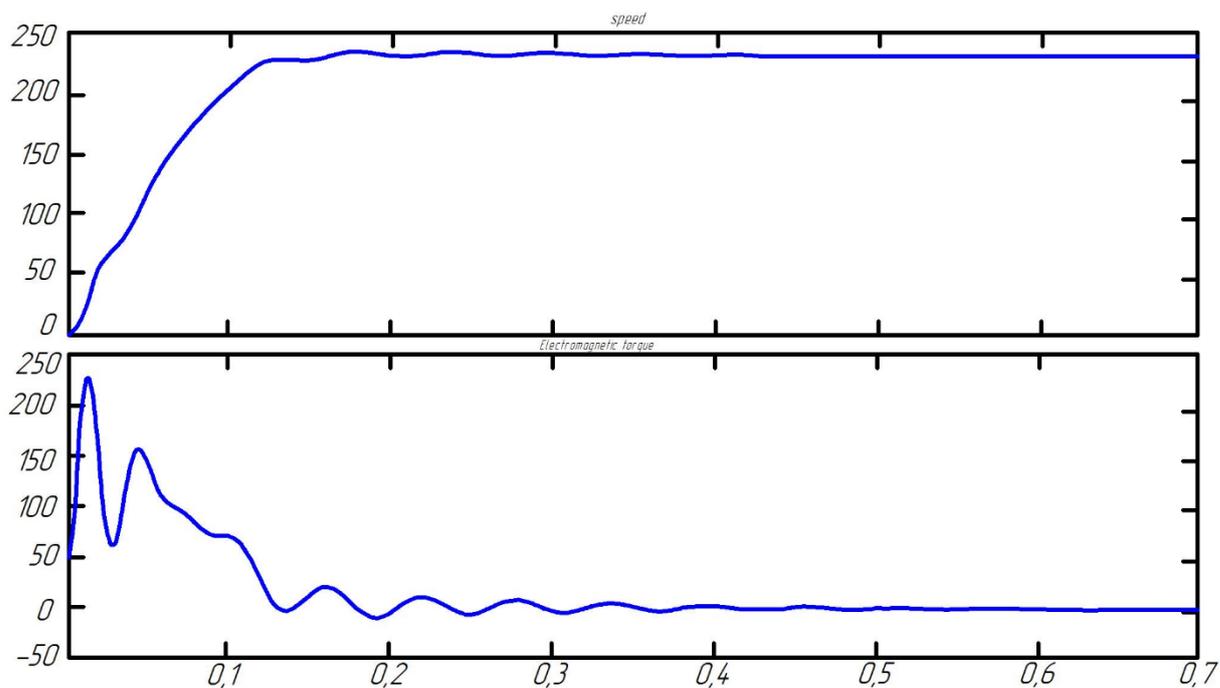


Рисунок 17 – Графики  $\omega=f(t)$  и  $M_B=f(t)$  при  $f=37,5$  Гц (фрагмент)

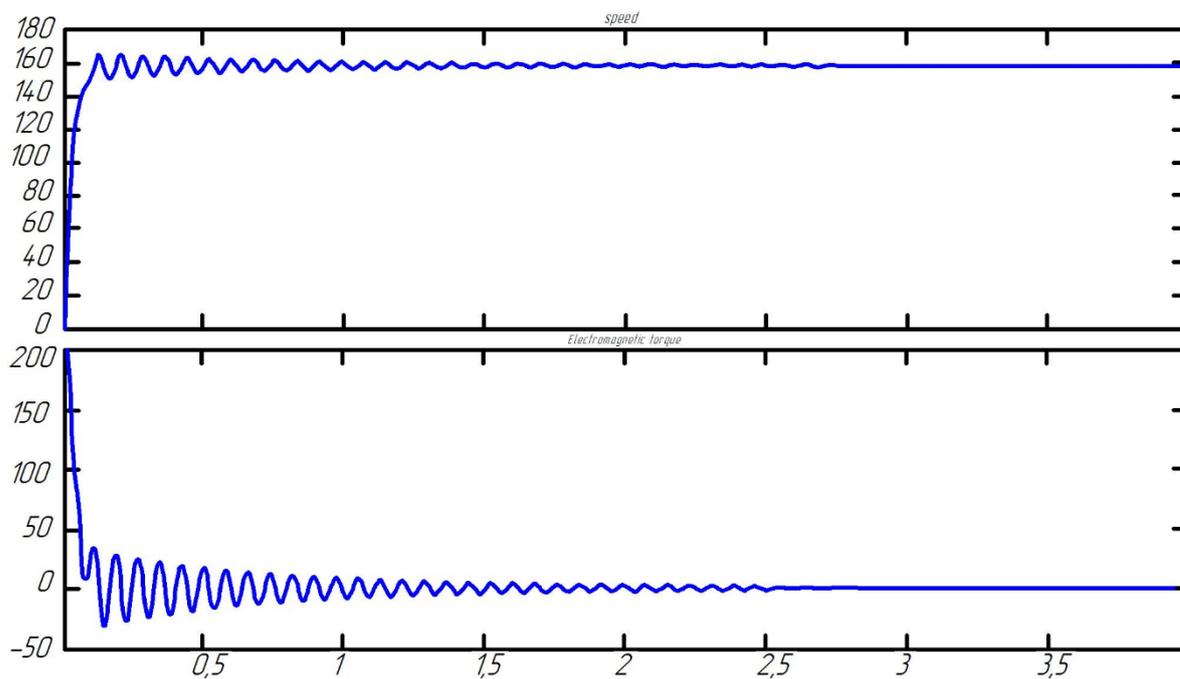


Рисунок 18 – Графики  $\omega=f(t)$  и  $M_B=f(t)$  при  $f=25$  Гц (фрагмент)

Таким образом, получили при частоте питающей сети  $f=50; 37,5; 25$  Гц и линейном напряжении  $U_n= 380, 329, 269$  В графики переходных процессов  $\omega=f(t)$  (рад/с) и  $M_B=f(t)$  (Н·м) (рисунки 16 – 18).

Для примера приведены рассчитанные в среде MatLab фазовые диаграммы угловой скорости и момента:

- при набросе нагрузки  $M_{с.доп}=0.3M_H$  и при  $f=50$  Гц (рисунок 19), после окончания переходного процесса получаем такие установившиеся значения:

$\omega=313,5$  рад/с;

- при набросе нагрузки  $M_{с.доп}=0.3M_H$  и при  $f=37,5$  Гц (рисунок 20), после окончания переходного процесса получаем такие установившиеся значения:

$\omega=235$  рад/с;

- при набросе нагрузки  $M_{с.доп}=0.3M_H$  и при  $f=25$  Гц (рисунок 21), после окончания переходного процесса получаем такие установившиеся значения:

$\omega=157$  рад/с.

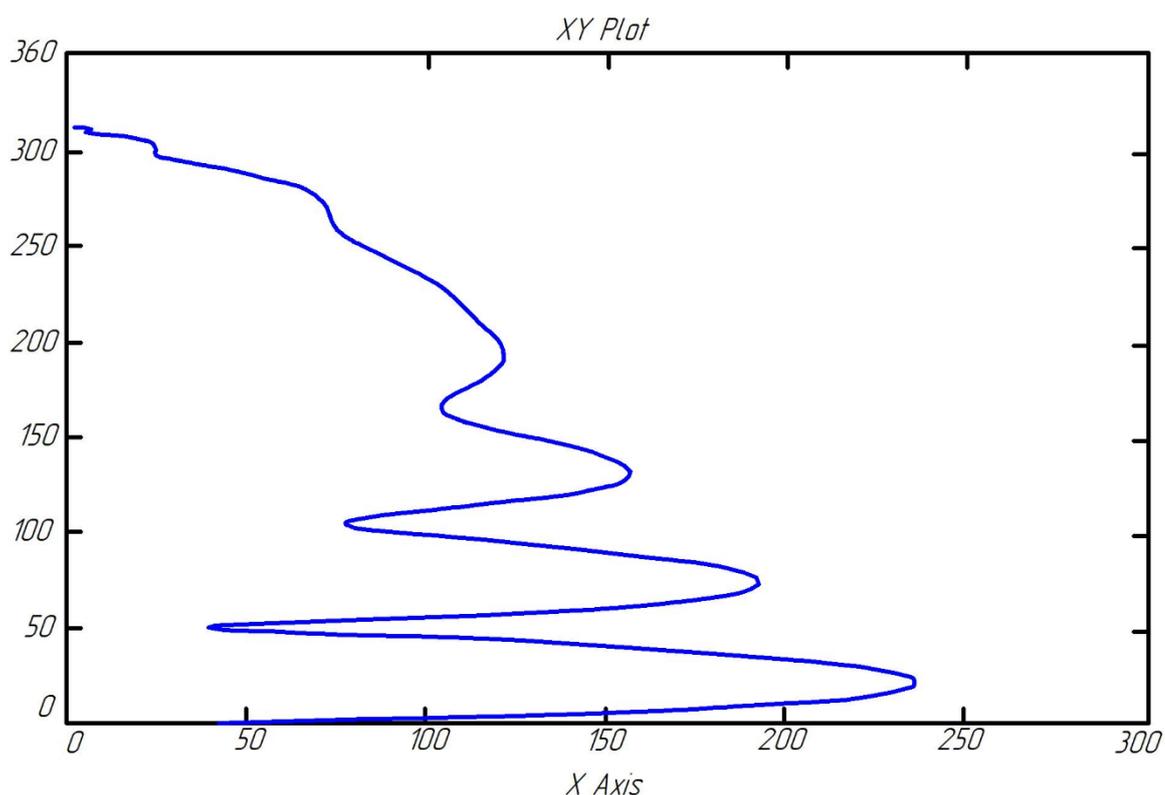


Рисунок 19 – Фазовая диаграмма угловой скорости и момента при  $f=50$  Гц

При частоте питающей сети  $f=50; 37,5; 25$  Гц и линейном напряжении  $U_L=380, 329, 269$  В моделируем в среде MatLab переход системы из одного установившегося состояния ( $M_B=M_H=60$  Н□м) в другое после наброса

нагрузки на вал двигателя ( $M_{с.доп}=0.3M_n=20 \text{ Н}\cdot\text{м}$ ) – рисунки 22 – 24, фазовая диаграмма угловой скорости – момента при  $f=50 \text{ Гц}$ , наброс нагрузки  $M_{с.доп}=0.3M_n$  (рисунок 25).

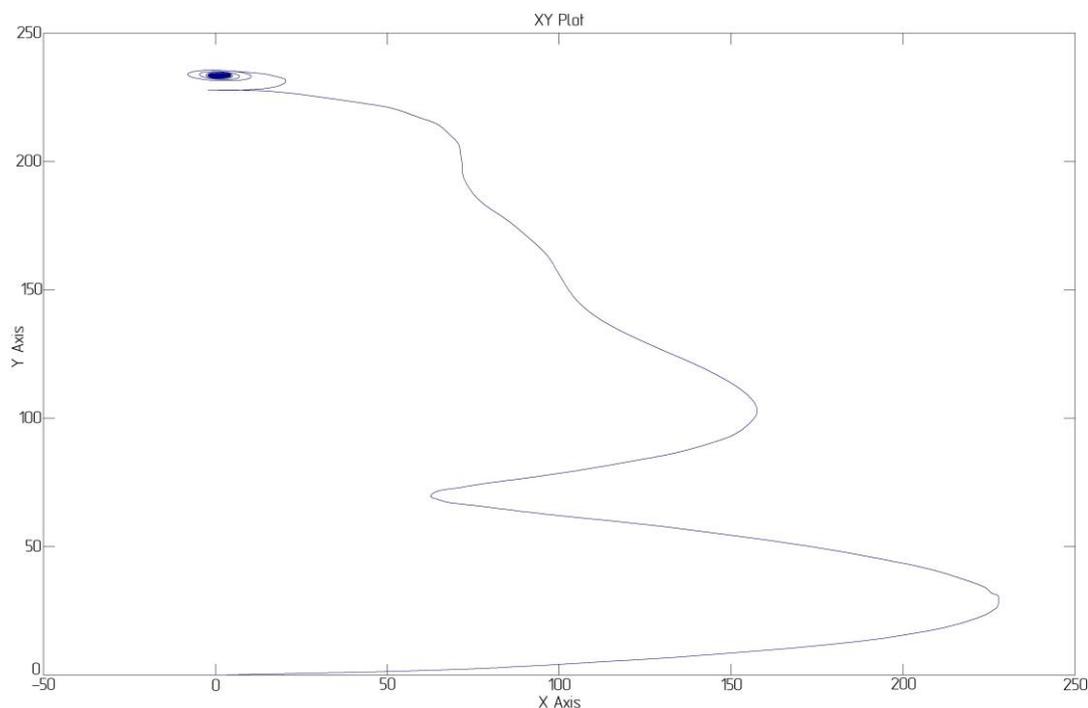


Рисунок 20 – Фазовая диаграмма угловой скорости и момента при  $f=37,5 \text{ Гц}$

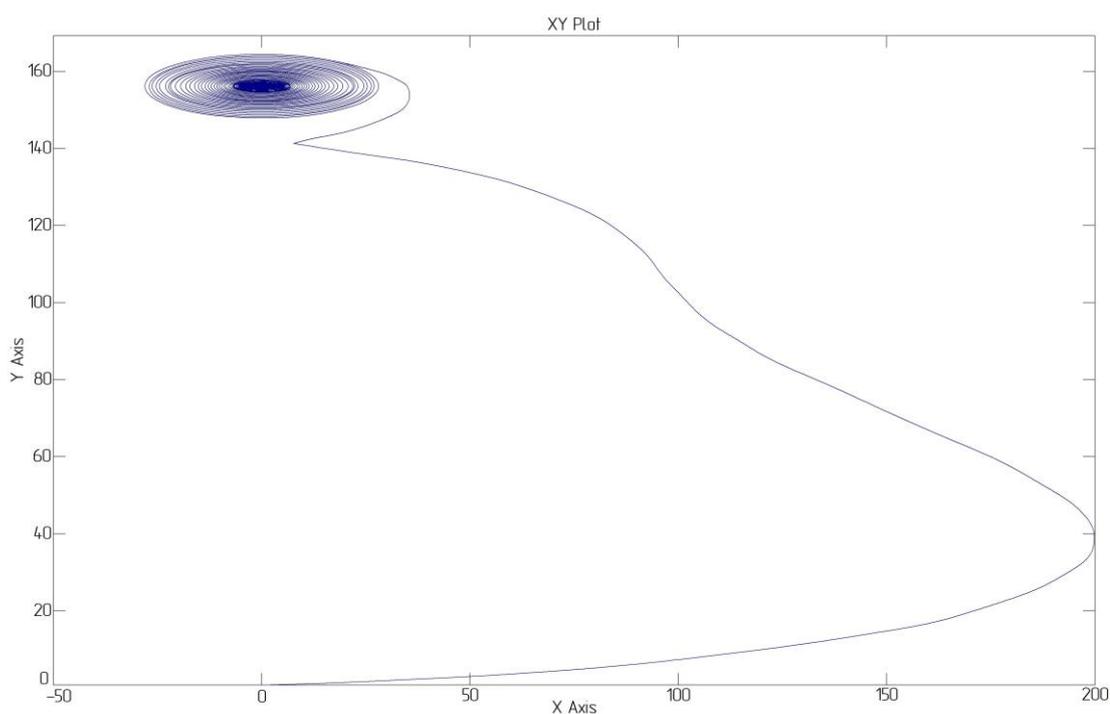


Рисунок 21 – Фазовая диаграмма угловой скорости и момента при  $f=25 \text{ Гц}$

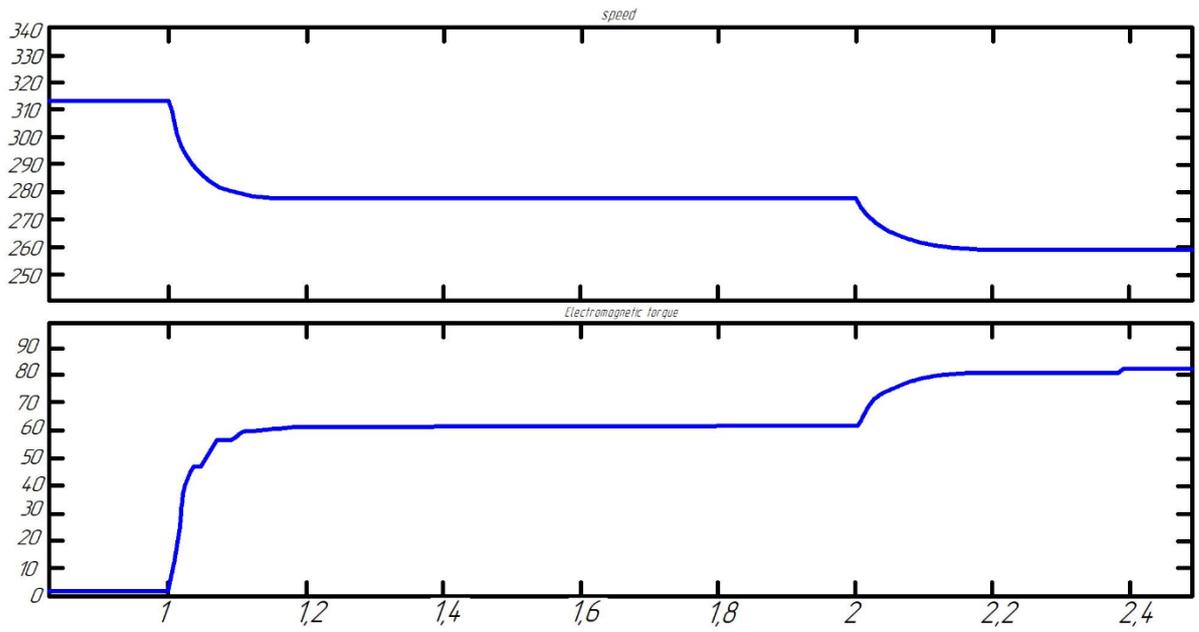


Рисунок 22 – Наброс нагрузки  $M_{с.доп}=0.3M_n$  при  $f=50$  Гц (фрагмент)

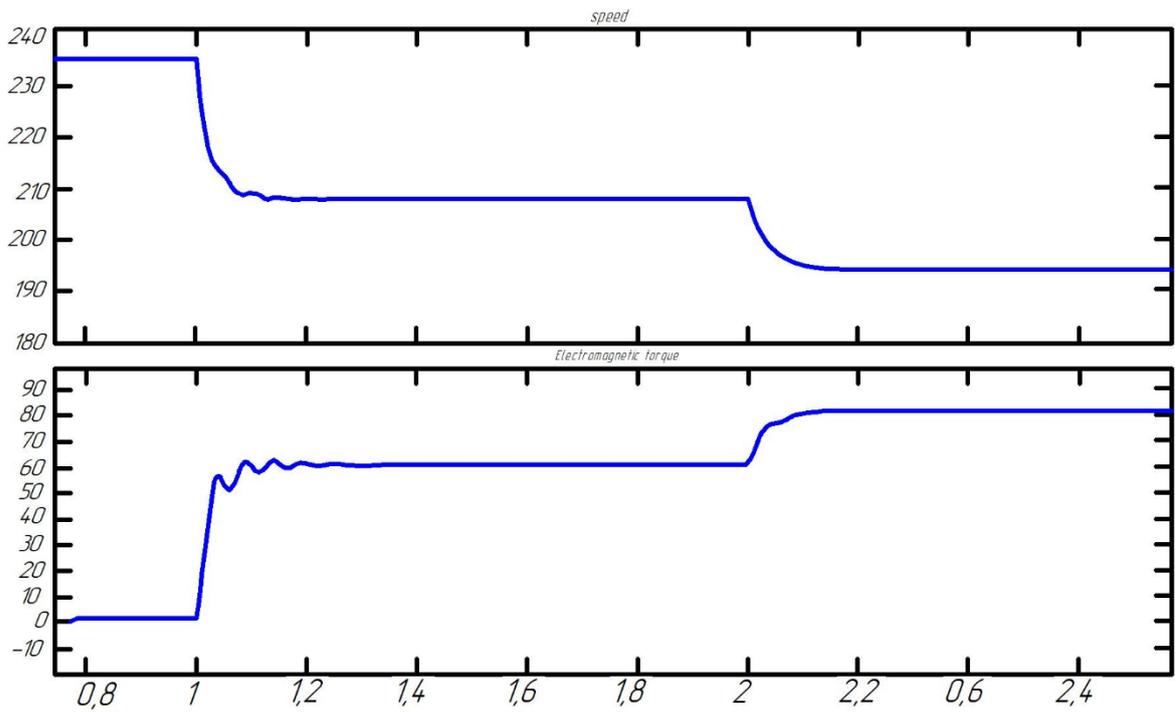


Рисунок 23 – Наброс нагрузки  $M_{с.доп}=0.3M_n$  при  $f=37,5$  Гц (фрагмент)

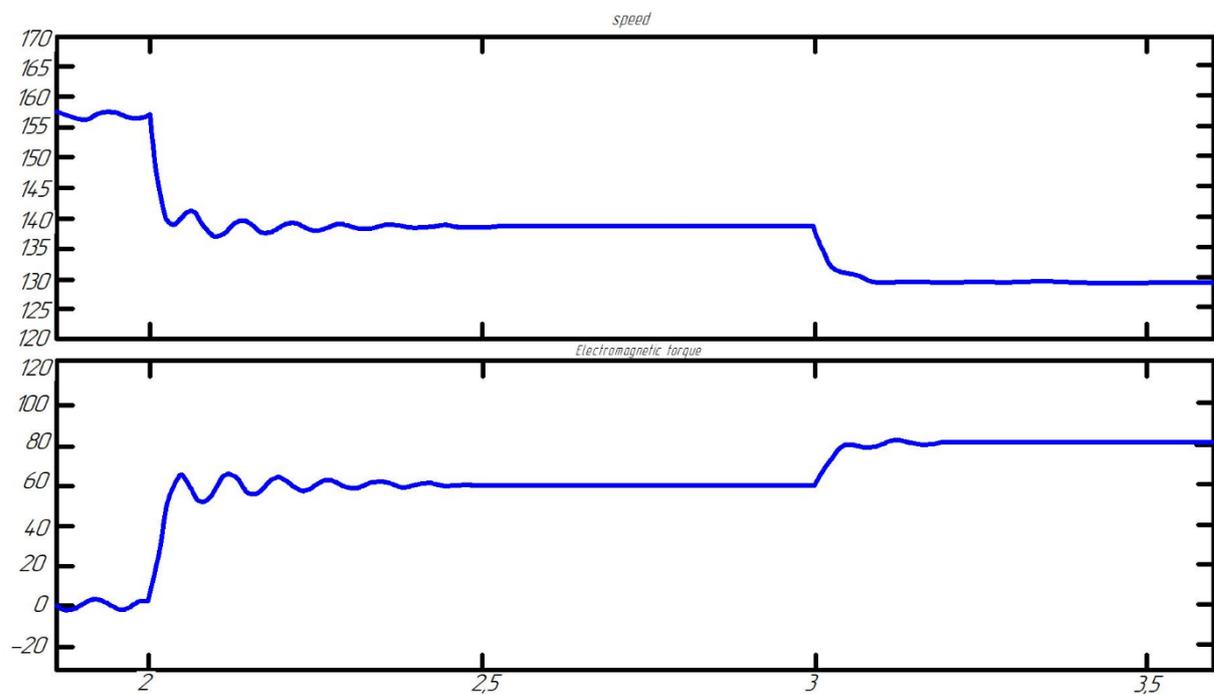


Рисунок 24 – наброс нагрузки  $M_{с.доп}=0.3M_n$  при  $f=25$  Гц (фрагмент)

Для примера при набросе нагрузки  $M_{с.доп}=0.3M_n$  был проведен численный эксперимент для фазовой диаграммы угловой скорости и момента при  $f=50$  Гц (рисунок 25) и после окончания переходного процесса получены такие установившиеся значения  $\omega=258$  рад/с,  $M_b=81,26$  Н·м.

Аналогичные численные эксперименты при набросе нагрузки  $M_{с.доп}=0.3M_n$  были проведены для фазовой диаграммы угловой скорости и момента при  $f=37,5$  Гц и после окончания переходного процесса получены такие установившиеся значения  $\omega=194$  рад/с,  $M_b=80,95$  Н·м. Для фазовой диаграммы угловой скорости и момента при  $f=25$  Гц после окончания переходного процесса получены такие установившиеся значения  $\omega=129,2$  рад/с,  $M_b=80,63$  Н·м.

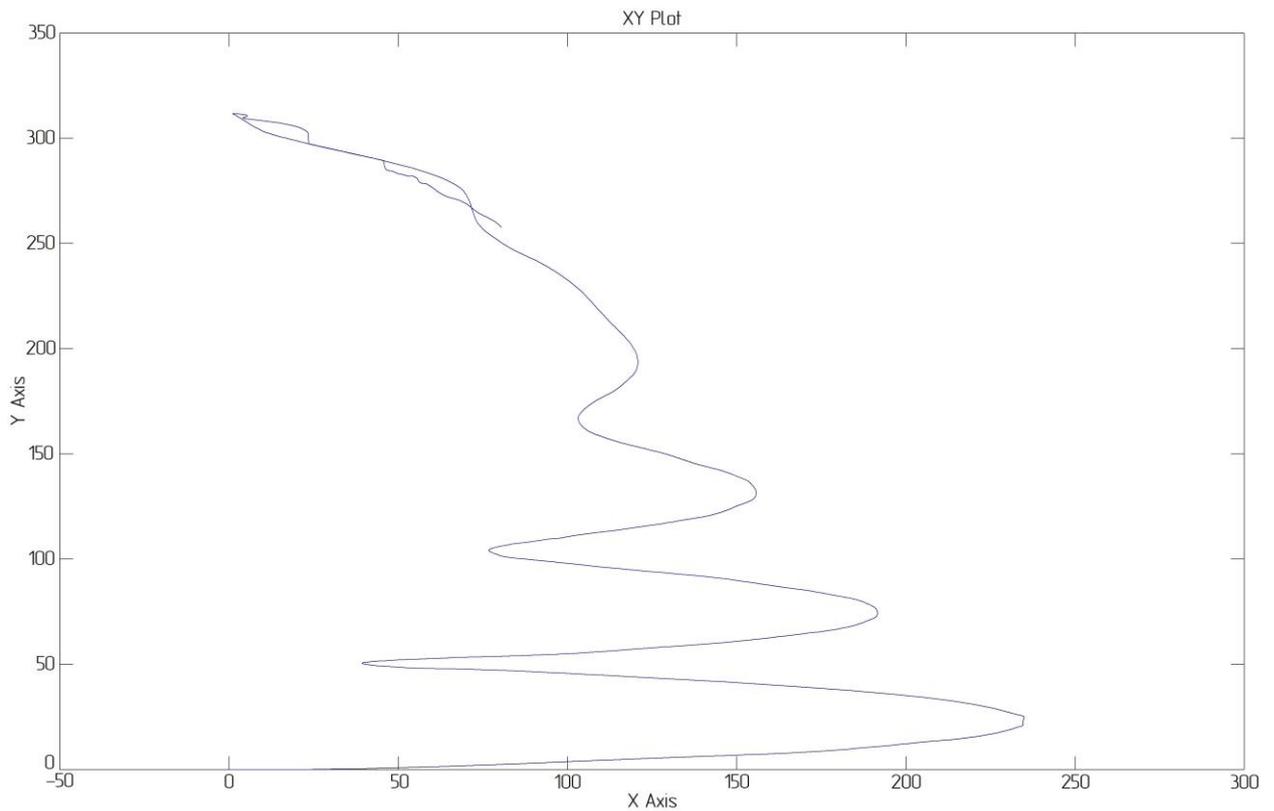


Рисунок 25 – Фазовая диаграмма угловой скорости – момента при  $f=50$  Гц наброс нагрузки  $M_{с.доп}=0.3M_H$

При частоте питающей сети  $f=50; 37,5; 25$  Гц и линейном напряжении  $U_{л}=380, 329, 269$  В моделируем в среде MatLab ток электродвигателя – рисунки 26 – 28. Моделирование выполнено на интервале времени  $0 - 0,5$  с. Из приведенных результатов численного эксперимента видно, что при уменьшении частоты идет более быстрое затухание переходного процесса для тока электродвигателя. Также результаты моделирования позволяют сделать вывод об уменьшении значений пусковых токов при снижении частоты питающей сети  $f$  и линейном напряжении  $U_{л}$ . Как известно высокие значения пусковых токов отрицательно влияют на обмотки двигателя, за счет чего уменьшают срок службы оборудования.

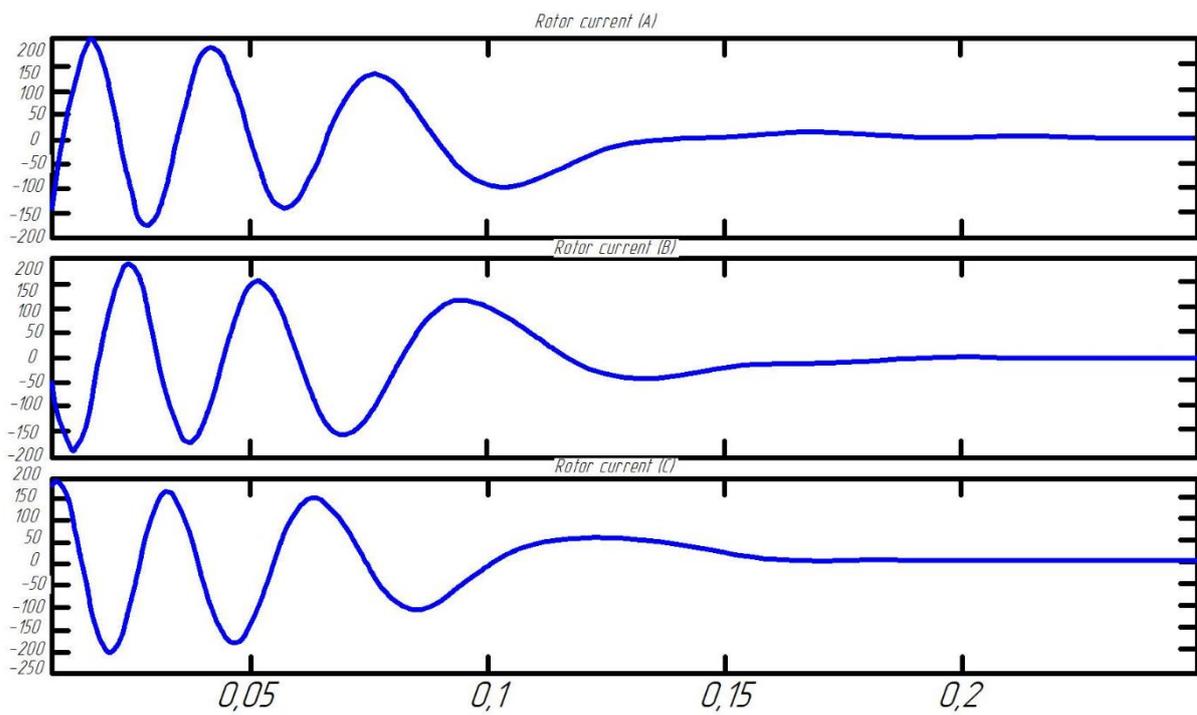


Рисунок 26 – Ток электродвигателя при  $f=50$  Гц

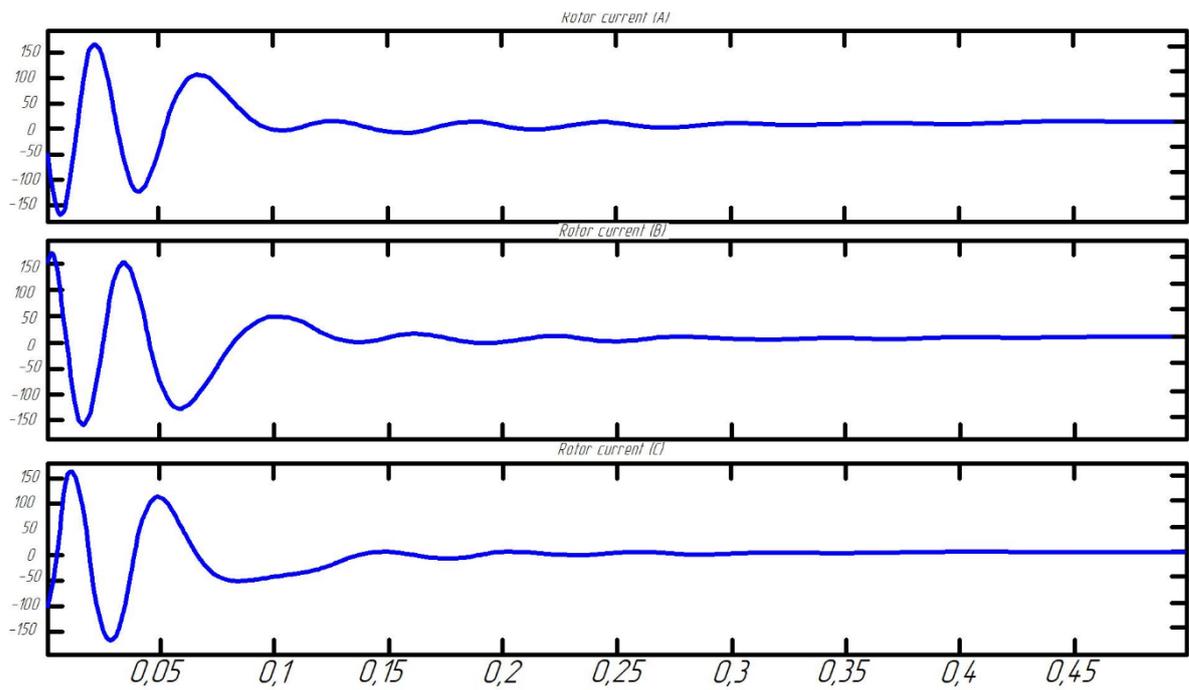


Рисунок 27 – Ток электродвигателя при  $f=37,5$  Гц

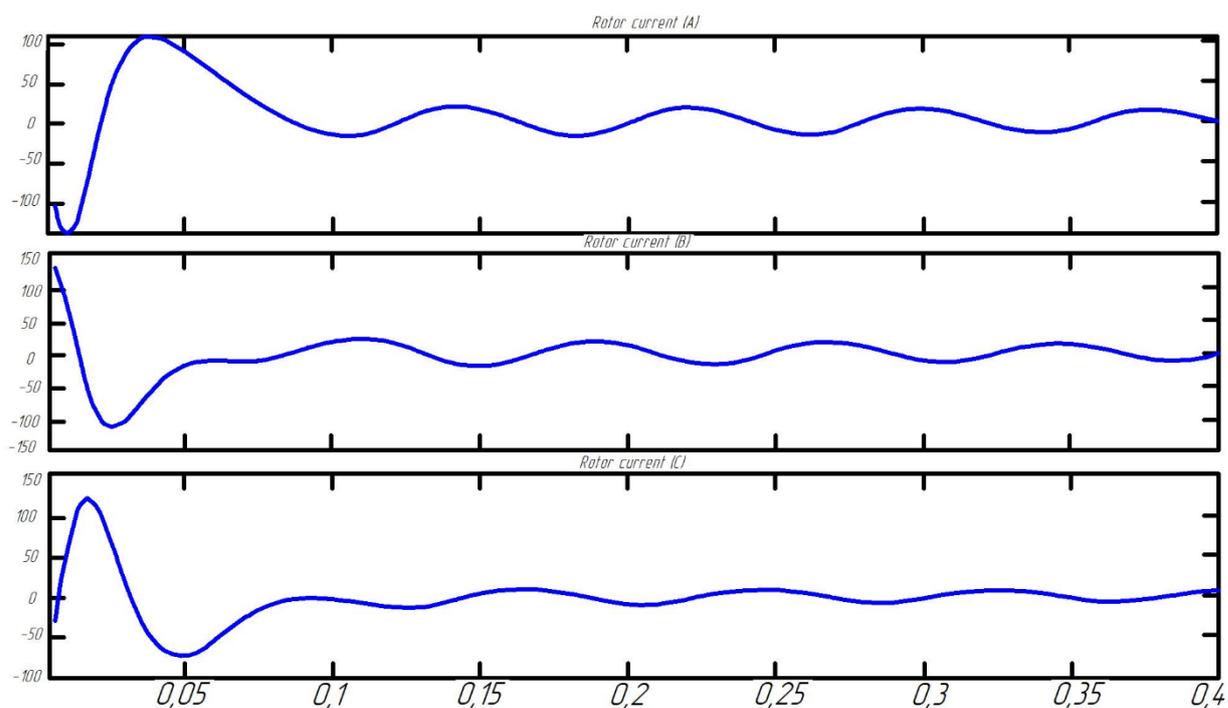


Рисунок 28 – Ток электродвигателя при  $f=25$  Гц

Таким образом, разработана модель управления электродвигателя в среде MatLab и выполнена оценка электрических параметров системы. На основе полученных графиков тока был сделан вывод, что частотное регулирование позволяет обеспечить плавный пуск электродвигателя, устраняя броски тока, которые плохо влияют на срок службы оборудования и снять ударные нагрузки, что позволяет снять ограничения по количеству пусков.

## Выводы по разделу 2

После проведенного анализа рассчитанных характеристик статических режимов работы электропривода можно сделать вывод, что регулирование частоты вращения асинхронного двигателя насоса влияет на скоростные характеристики двигателя, а именно:

1) по мере уменьшения частоты питающего напряжения  $f$  от 50 до 10 Гц, т.е. при увеличении скольжения, уменьшается скорость ротора, ток возрастает за счет увеличения э. д. с. ротора, однако рост тока ограничивается увеличением индуктивного сопротивления ротора;

2) исходя из результатов, приведенных на графике механических характеристик двигателя, можно заключить, что при изменении частоты питающего напряжения  $10 \leq f \leq 50$  и как следствие изменения скорости вращения ротора от 0 до  $\omega_0=f$  момент в рабочем диапазоне не изменяется. Это значит, что при снижении скорости вращения электродвигателя насоса до оптимальной, его нагрузочная способность не снижается;

3) рассчитав потери и КПД двигателя можно заключить, что при изменении скорости электрической машины её КПД изменяется, то есть с увеличением частоты и скорости вращения ротора увеличиваются суммарные потери за счет потерь на перемагничивание стали, этим можно объяснить нелинейность графика;

4) из графика зависимости  $\cos\varphi$  от скорости вращения ротора, которая меняется при изменении частоты  $f$ , можно сделать вывод, что при меньших значениях частоты  $\cos\varphi$  увеличивается. Происходит это по причине уменьшения индуктивной составляющей сопротивления статора.

Была разработана модель управления электродвигателя в среде MatLab и оценка электрических параметров системы.

Были смоделированы графики переходных процессов  $\omega=f(t)$  (рад/с) и  $M_b=f(t)$  (Н·м) при  $f=50$  Гц,  $f=37,5$  Гц,  $f=25$  Гц.

Были рассчитаны фазовые диаграммы угловой скорости и момента:

- при набросе нагрузки  $M_{с.доп}=0.3M_n$  и при  $f=50$  Гц, после окончания переходного процесса получили установившиеся значения:  $\omega=313,5$  рад/с;

- при набросе нагрузки  $M_{с.доп}=0.3M_n$  и при  $f=37,5$  Гц, после окончания переходного процесса получили установившиеся значения:  $\omega=235$  рад/с;

- при набросе нагрузки  $M_{с.доп}=0.3M_n$  и при  $f=25$  Гц, после окончания переходного процесса получили установившиеся значения:  $\omega=157$  рад/с.

Был смоделирован ток электродвигателя при  $f=50$  Гц,  $f=37,5$  Гц,  $f=25$  Гц и линейном напряжении  $U_{л}=380$  В,  $U_{л}=329$  В,  $269$  В.

На основе полученных графиков тока был сделан вывод, что частотное регулирование позволяет обеспечить плавный пуск электродвигателя, устраняя броски тока, которые плохо влияют на срок службы оборудования, и снять ударные нагрузки, что позволяет снять ограничения по количеству пусков.

### 3 Экономическое обоснование целесообразности внедрения частотного регулируемого привода

Главная проблема при проведении расчётов экономической эффективности от внедрения частотного привода - это невозможность достоверно рассчитать экономический эффект, т.к. существуют устоявшиеся методики расчета экономии электроэнергии, которые не как крупных, так и малых бесспорны. Электроэнергия постоянно дорожает, и в масштабах предприятий внедрение частотного привода дает хорошие экономические результаты. Поэтому адекватно можно оценить только эффект при экономии электроэнергии [7].

#### 3.1 Алгоритм расчета экономии электроэнергии при применении метода частотного регулирования двигателя относительно дросселирования

Алгоритм расчета экономии электроэнергии при данном методе приведен в таблице 9.

Таблица 9 – Алгоритм расчета

Алгоритм	Рассчитываемая величина	Номер формулы
$P = f(Q)$	Мощность, потребляемая насосом	(28)
$P_{нас} = Q \cdot H \cdot \frac{9,8}{\eta}$	Мощность центробежного насоса	(29)
$\frac{P_{нас1}}{P_{нас2}} = \frac{n_1^2}{n_2^2}$	Связь мощности, напора с частотой вращения	(30)
$\frac{H_1}{H_2} = \frac{n_1^2}{n_2^2}$		(31)

Продолжение таблицы 9

Алгоритм	Рассчитываемая величина	Номер формулы
$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{n_1^2}{n_2^2}$	Связь производительности с частотой вращения	(32)
$\frac{M_1}{M_2} = \frac{n_1^2}{n_2^2}$	Связь момента с частотой вращения	(33)
$M = \frac{P}{n}$	Момент на валу двигателя	(34)
$P = f(n)^3$	Потребляемая мощность	(35)
$P = Q_{\text{нас}}^3$	Зависимость мощности в функции $Q_{\text{нас}}$	(36)

В таблице 9 для формул (30) – (33) имеются индексы 1 и 2 для 1-го и 2-го режимов работы насоса. Зависимость  $P_{\text{нас}}$  в функции  $Q_{\text{нас}}$  может быть выражена графиком в виде прямой. Значения представлены в таблице 10.

Таблица 10 – Зависимость  $P_{\text{нас}}$  в функции  $Q_{\text{нас}}$  при дросселировании, %

$Q/Q_{\text{НОМ}}$	$P/P_{\text{НОМ}}^*$	$P/P_{\text{НОМ}}^{**}$
0	55	0
10	60	1
20	64	2
30	69	3
40	73	6
50	78	13
60	82	22
70	87	34
80	91	51

Продолжение таблицы 10

$Q/Q_{\text{ном}}$	$P/P_{\text{ном}}^*$	$P/P_{\text{ном}}^{**}$
90	96	73
100	100	100

В таблице 10 обозначены:

$Q/Q_{\text{ном}}$  – отношение фактического расхода жидкости относительно номинального расхода;

$P/P_{\text{ном}}^*$  – относительная величина потребляемой мощности от расхода жидкости при дроселировании;

$P/P_{\text{ном}}^{**}$  – относительная величина потребляемой мощности от расхода при частотном регулировании.

### 3.2 Расчет годовой экономии электроэнергии

Первоначально определяется фактический расход жидкости  $Q$  и его доля относительно номинального расхода  $Q/Q_{\text{ном}}$ .

Для дроселирования зависимость относительной потребляемой мощности от расхода определяется выражением:

$$\frac{P_{\sigma}}{P_{\text{ном}}} = A + B \cdot \left(\frac{Q}{Q_{\text{ном}}}\right), \quad (37)$$

$$P_{\sigma} = P_{\text{ном}} \cdot \left(A + B \cdot \left(\frac{Q}{Q_{\text{ном}}}\right)\right) = 18,5 \cdot \left(0,55 + 0,45 \cdot \left(\frac{12}{50}\right)\right) = 7,629 \text{ кВт}. \quad (38)$$

где  $A=0,55$ ;

$B=0,45$  – угол наклона напорной характеристики насоса.

Для частотного преобразователя зависимость относительной потребляемой мощности от расхода определяется выражением:

$$\frac{P_q}{P_{ном}} = \left(\frac{Q}{Q_{ном}}\right)^3, \quad (39)$$

$$P_q = P_{ном} \cdot \left(\frac{Q}{Q_{ном}}\right)^3 = 18,5 \cdot \left(\frac{12}{50}\right)^3 = 256 \text{ Вт}. \quad (40)$$

Тогда полученная экономия определяется выражением:

$$P_{экон} = A + B \cdot \left(\frac{Q}{Q_{ном}}\right)^3 - \left(\frac{Q}{Q_{ном}}\right)^3 = 0,55 + 0,45 \cdot \left(\frac{12}{50}\right)^3 - \left(\frac{12}{50}\right)^3 = 7,373 \text{ кВт}. \quad (41)$$

График для расчета экономии электроэнергии представлен на рисунке 29.

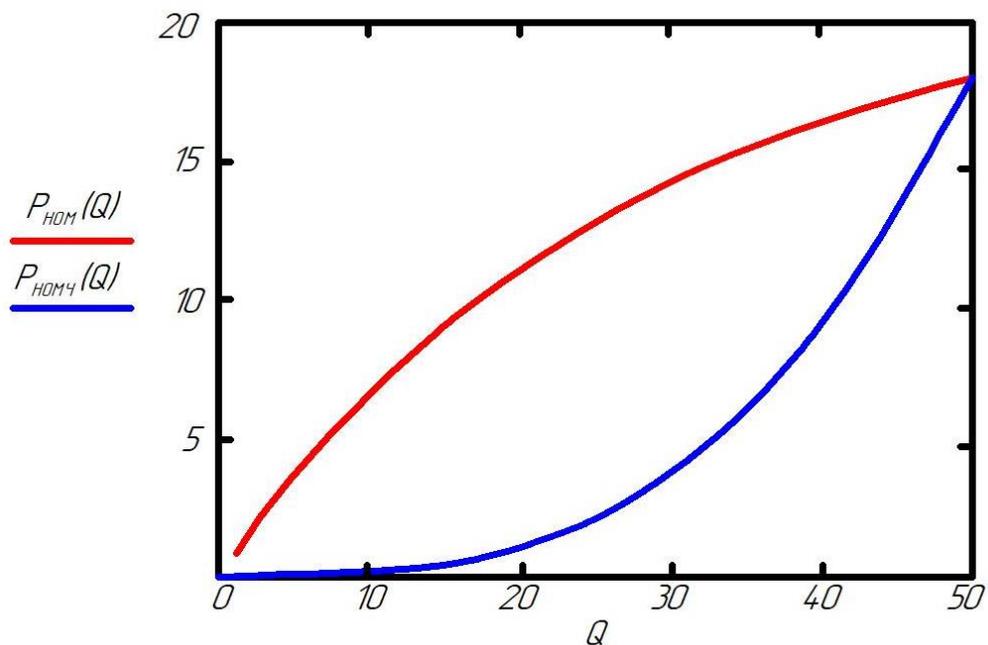


Рисунок 29 – График, поясняющий получение экономии электроэнергии, для частного преобразователя электропривода насоса

Разница между кривыми на рисунке 3.1 равна экономии мощности  $P_{экон}$  при частотном регулировании.

Годовой расход электроэнергии при работе насоса с номинальной мощностью:

$$W_{\text{экон}} = P_{\text{экон}} \cdot T \cdot K_{\text{н}}, \quad (42)$$

$$W_{\text{экон}} = 7,373 \cdot 8760 \cdot 0,8 = 51670 \text{ кВт} \cdot \text{ч}, \quad (43)$$

где  $T$  – количество часов работы, ч;

$K_{\text{н}}$  – коэффициент использования.

В расчетах принята цена на электроэнергию Сэ для ООО «Тольяттикаучук» 1,92 рубля за 1 кВт·ч без НДС. НДС равен 20% от суммы. Следовательно, в год экономии  $\Delta Z$  в рублях составит:

$$\Delta Z = W_{\text{экон}} \cdot 1,92 \cdot 0,2 + W_{\text{экон}} \cdot 1,92; \quad (44)$$

$$\Delta Z = 51670 \cdot 1,92 \cdot 0,2 + 51670 \cdot 1,92 = 117063,55 \text{ руб.} \quad (45)$$

Таким образом, выполнен расчет годовой экономии электроэнергии при внедрении системы частотного регулирования электропривода в производстве сополимерных бутадиен-стирольных каучуков ООО «Тольяттикаучук», которая при принятых расчетных условиях – цене на электроэнергию и ставке НДС, составляет 117 063,55 рублей в год.

### 3.3 Расчет экономической эффективности для цеха

При оценке и расчетах по формулам (28 – 41) режимов работы насосов перекачки и вакуумных насосов установлено, что в целом для оборудования средняя экономия электроэнергии при внедрении частотных преобразователей приблизительно составит 15%.

Существующая технологическая схема предусматривает 15 однотипных насосов. Насосы объединены в группы по три насоса, два из которых находятся в работе и один в резерве. Определим цену преобразователей частоты, результаты приведем в таблице 11. При расчете цены примем, что 1 евро = 90 рублей.

Таблица 11 – Цены на преобразователи частоты с НДС

Количество	Тип	Мощность электродвигателя, кВт	Ток, А	Цены, руб.
3 (2 в работе, 1 резерв)	VLT AutomationDrive FC 300	18,5	35	3x13642
3 (2 в работе, 1 резерв)	VLT AutomationDrive FC 300	18,5	35	3x13642
3 (2 в работе, 1 резерв)	VLT AutomationDrive FC 300	18,5	35	3x13642
3 (2 в работе, 1 резерв)	VLT AutomationDrive FC 300	18,5	35	3x13642
3 (2 в работе, 1 резерв)	VLT AutomationDrive FC 300	18,5	35	3x13642
3x5=15	Итого 2046330			

### 3.4 Расчет пусконаладочных работ и обслуживания оборудования

Пусконаладочные работы включают в себя установку частотных преобразователей, подключение преобразователей к двигателям, программирование преобразователей, подключение двигателей.

Стоимость данных работ для отдельных агрегатов приведена в таблице 12, и включает в себя плату за работу одного инженерно-технического работника и двух электриков. Приблизительная стоимость пусконаладочных работ (на 1 преобразователь) равна 3-5% от стоимости оборудования.

Таблица 12 – Оплата пусконаладочных работ

Количество установленных преобразователей	Приблизительная стоимость пусконаладочных работ на 1 преобразователь, руб.	Стоимость пусконаладочных работ в целом, руб.
15	5456,88	81853,2

В дальнейшем обслуживание будет производить один инженерно-технический работник.

Обслуживание включает в себя проверку программируемых параметров преобразователя и электрических соединений, а также чистку от пыли. Обслуживание производится 1 раз в 6 месяцев, стоимость обслуживания всех 15 преобразователей составляет 2500 рублей (стоимость обслуживания 1 преобразователя равна 166 рублям вместе со всеми налоговыми отчислениями).

### 3.5 Затраты на амортизацию

В паспорте частотных преобразователей указан срок службы, равный 8 годам. Амортизируемое имущество со сроком полезного использования 8 лет (96 месяцев) в соответствии с Налоговым кодексом РФ относится «к 5 группе (срок полезного использования 7-10 лет)» [21]. Для данного оборудования возможно применение как линейного, так и нелинейного метода амортизации. Для удобства в расчетах будем использовать линейный метод. В соответствии со статьей 259 Налогового кодекса РФ «При применении линейного метода сумма начисленной амортизации за один месяц определяется как произведение первоначальной стоимости объекта основных средств и соответствующей нормы амортизации, которая определяется по формуле (46)» [21]:

$$K = \left[ \frac{1}{n} \right] \cdot 100\% \quad (46)$$

где « $K$  – норма амортизации в процентах к первоначальной (восстановительной стоимости);

$n$  – срок полезного использования данного объекта, выраженный в месяцах» [21].

Подставив необходимые значения в формулу (46), получим:

$$K = \left[ \frac{1}{96} \right] \cdot 100\% = 1,04\% \quad (47)$$

Налог на имущество взимается ежегодно со ставкой 2,2% от среднегодовой стоимости амортизируемого имущества.

Для удобства примем следующие условия. Монтаж преобразователей начинается 1 декабря, через 21 рабочий день они вводятся в эксплуатацию (29-30 декабря). Амортизация начисляется с января.

График денежного потока в рублях при использовании частотных преобразователей представлен в таблице 13.

Таблица 13 – График денежного потока

Период, месяцы	Приток денежных средств (CF), руб.	Отток денежных средств (J), руб.
1-12-2012-29.12-2012	-	Стоимость ЧП: 2046330 Монтаж: 81853,2
1.1.2013-31.12.2013	Ежегодная экономия: 117063,552 Амортизация за месяц: 21281,832 Амортизация за год: 255381,984	Налог на имущество: 33782,452 Обслуживание: 2500
1.1.2014-31.12.2014	Ежегодная экономия: 117063,552 Амортизация за год: 255381,984	Налог на имущество: 28164 Обслуживание: 2500
1.1.2015-31.12.2015	Ежегодная экономия: 117063,552 Амортизация за год: 255381,984	Налог на имущество: 22545,644 Обслуживание: 2500
1.1.2016-31.12.2016	Ежегодная экономия: 117063,552 Амортизация за год: 255381,984	Налог на имущество: 16927,262 Обслуживание: 2500
1.1.2017-31.12.2017	Ежегодная экономия: 117063,552 Амортизация за год: 255381,984	Налог на имущество: 11308,88 Обслуживание: 2500
1.1.2018-31.12.2018	Ежегодная экономия: 117063,552 Амортизация за год: 255381,984	Налог на имущество: 39400,85 Обслуживание: 2500
1.1.2019-31.12.2019	Ежегодная экономия: 117063,552 Амортизация за год: 255381,984	Налог на имущество: 5690,52 Обслуживание: 2500
1.1.2020-31.12.2020	Ежегодная экономия: 117063,552 Амортизация за год: 255381,984	Налог на имущество: 5690,52 Обслуживание: 2500
Итого	2979564,288	2224149,608

### 3.6 Экономический эффект от использования частотно-регулируемого привода насосов и вентиляторов на предприятии относительно дросселирования

Для расчета экономического эффекта от использования частотно-регулируемого привода насосов и вентиляторов на предприятии относительно дросселирования определим чистый дисконтированный доход по формуле из [16]:

$$\mathcal{E} = \sum CF_t \cdot W(r, t) - \sum J_t \cdot W(r, t) \quad (48)$$

где « $J_t$  – отток денежных средств (инвестирование, техническое обслуживание системы и налог на имущество);

$CF$  – приток денежных средств в связи с экономией электроэнергии и  $t$  амортизацией;

$W(r, t)$  – коэффициент дисконтирования ( $t$  – текущее время):

$$W(r, t) = (1 + r)^{-t}, \quad (49)$$

где  $r$  – ставка дисконтирования на месяц;

$T$  – период учета денежного потока по инвестиционному проекту (Т=98 месяцев)» [16].

Сроки окупаемости использования частотно-регулируемого привода насосов и вентиляторов на предприятии относительно дросселирования:

$$T_{cp} = \frac{J_t}{CF_t} \quad (50)$$

Результаты расчета экономического эффекта от использования частотно-регулируемого привода насосов и вентиляторов на предприятии относительно дросселирования приведены в таблице 14.

Таблица 14 – Экономический эффект от использования частотно-регулируемого привода насосов и вентиляторов на предприятии относительно дросселирования

Вариант ожиданий перспектив развития экономики	Чистый дисконтированный доход, рублей	Срок окупаемости инвестиций, годы
Оптимистический (ставка дисконта по проекту – 10%)	176011,62	0,616 года
Наиболее вероятный (ставка дисконта по проекту – 15%)	117064,31	0,746 года
Пессимистический (ставка дисконта по проекту – 20%)	81358,19	0,842 года

В результате можно сделать вывод, что внедрение частотного привода на предприятии оказывает значительный экономический эффект и окупится менее чем за год.

### **Выводы по разделу 3**

Произведен расчет экономической эффективности спроектированной системы управления технологическим процессом. Для этого определена цена на преобразователи частоты VLT AutomationDrive FC 300, которая составила 2046330 руб. Определены затраты на пусконаладочные работы - 81853,2 руб., определены затраты на амортизацию, на расход электроэнергии без установки преобразователей частоты и при их установке.

Выяснено, что внедрение системы частотного регулирования электропривода:

- при оптимистическом варианте позволит сэкономить 176011,62 руб. и окупится за 0,616 года;

- при наиболее вероятном варианте позволит сэкономить 117064,31

руб. и окупится за 0,746 года;

- при пессимистическом варианте позволит сэкономить 81358,19 руб. и окупится за 0,842 года.

## Заключение

Анализ основных способов регулирования частоты вращения асинхронных электродвигателей позволил определить, что самый оптимальный способ регулирования частоты вращения для электродвигателя насоса поз. Н-65 в производстве сополимерных бутадиен-стирольных каучуков ООО «Тольяттикаучук» – частотное регулирование привода насоса с помощью преобразователя частоты с промежуточным контуром постоянного тока. Подробно изучены компоненты системы регулирования и проведен расчет характеристик статических режимов работы электропривода.

После проведенного анализа рассчитанных характеристик статических режимов работы электропривода можно сделать вывод, что регулирование частоты вращения асинхронного двигателя насоса влияет на скоростные характеристики двигателя, а именно:

1) по мере уменьшения частоты питающего напряжения  $f$  от 50 до 10 Гц, т. е. при увеличении скольжения, уменьшается скорость ротора, ток возрастает за счет увеличения э. д. с. ротора, однако рост тока ограничивается увеличением индуктивного сопротивления ротора;

2) исходя из результатов, приведенных на графике механических характеристик двигателя, можно заключить, что при изменении частоты питающего напряжения  $10 \leq f \leq 50$  и как следствие изменения скорости вращения ротора от 0 до  $\omega_0=f$  момент в рабочем диапазоне не изменяется. Это значит, что при снижении скорости вращения электродвигателя насоса до оптимальной, его нагрузочная способность не снижается;

3) рассчитав потери и КПД двигателя можно заключить, что при изменении скорости электрической машины её КПД изменяется, как показано на рис. то есть с увеличением частоты и скорости вращения ротора увеличиваются суммарные потери за счет потерь на перемагничивание стали, этим можно объяснить нелинейность графика;

4) из графика зависимости  $\cos\varphi$  от скорости вращения ротора, которая меняется при изменении частоты  $f$  можно сделать вывод, что при меньших значениях частоты  $f$   $\cos\varphi$  увеличивается. Происходит это по причине уменьшения индуктивной составляющей сопротивления статора.

Была разработана модель управления электродвигателя с в среде MATLAB и оценка электрических параметров системы. На основе полученных графиков тока был сделан вывод, что частотное регулирование позволяет обеспечить плавный пуск электродвигателя, устраняя броски тока, которые плохо влияют на срок службы оборудования и снять ударные нагрузки, что позволяет снять ограничения по количеству пусков.

Был произведен расчет экономической эффективности спроектированной системы управления технологическим процессом и выяснено, что внедрение системы частотного регулирования электропривода позволяет экономить 117064,31 рубля в год. Сама же система, установленная на 15 однотипных насосов в цехе, окупится за срок 0,746 лет.

На основании чего можно сказать, что внедрение системы управления позволит повысить эффективность функционирования установки частично дегазированного латекса за счет оптимального режима работы насосов, повышения производительности оборудования и оперативности управления технологическим процессом, снижения потребления энергоресурсов, а также снизить аварийность и увеличить срок службы оборудования, уменьшить влияние человеческого фактора в производственном процессе и, одновременно, повысить культуру производства.

## Список используемой литературы и используемых источников

1. Анучин А.С. Системы управления электроприводов: Учебник для вузов. М.: Издательский дом МЭИ, 2017. 373. с.
2. Анучин А.С. Разработка метода быстрого и точного моделирования электроприводов / А.С. Анучин, Ю.М. Ханова, И.В. Гуляев // Промышленная энергетика. 2018. № 4. С. 28-33.
3. Бабокин Г.И., Колесников Е.Б., Малков С.Б., Федоров О.В. Повышение эффективности и надежности электропривода насосов : сборник трудов IX международной конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2015. Саранск, 2015. С. 275-277.
4. Белов М.П, Новиков А.Д. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов. М.: Академия, 2017. 576 с.
5. Вахнина В.В. Разработка основ теории функционирования систем электроснабжения потребителей при воздействии геоиндуцированных токов. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. М.: МЭИ, 358 с.
6. ВРД 39-1.10-052-2001. Методические указания по выбору и применению асинхронного частотно-регулируемого привода мощностью до 500 кВт : введ. 2001.22.11.
7. Горбунов А.В. Современный электропривод – универсальное решение задачи управления электродвигателями // Электромеханика. Известия вузов. 2016. №5. С.32-37.
8. ГОСТ Р 51137-98 Электроприводы регулируемые асинхронные для объектов энергетики. Общие технические условия : введ. 1998-19-02. М.: Издательство стандартов, 1998.
9. ГОСТ 24607-88 Преобразователи частоты полупроводниковые. Общие технические требования (с Изменением № 1, утвержденное и введенное в действие Постановлением Государственного комитета СССР по

управлению качеством продукции и стандартам от 05.02.91 N 102 с 01.08.91):  
введ. 1990-01-01. М.: Издательство стандартов, 1989.

10. Государственная программа Российской Федерации «Энергосбережение и повышение энергетической эффективности на период до 2020 года», утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 27 декабря 2010 г. № 2446-р. URL: <https://rg.ru/2011/01/25/energoberejenie-site-dok.html/> (дата обращения 25.04.2021).

11. Доманов В.И., Мишин Н.В., Доманов А.В. Синтез электроприводов с низкой чувствительностью к параметрическим возмущениям // Электроника и электрооборудование транспорта. 2019. №1. С. 41-43.

12. Доманов В.И., Мишин Н.В., Халиуллов Д.С. Анализ электропривода автономного объекта // Известия самарского научного центра российской академии наук. 2018. Том 16, № 4(3). С. 600-602.

13. Евдокимов И.Г., Ложкин П.И. Способы регулирования частоты асинхронных двигателей // Энергоэффективность и энергобезопасность производственных процессов: сборник трудов V Всероссийской научно-технической конференции студентов, магистрантов, аспирантов (г. Тольятти, ноябрь 2019 г.). Тольятти: ТГУ. 2019. С. 34-36.

14. Елисеева В.А., Швинянский А.В. Справочник по автоматизированному электроприводу. М.: Энергия, 2017. 616 с.

15. Зимин Е.Н., Яковлев В.И. Автоматическое управление электроприводами: учеб, пособие для студентов вузов. М.: Высш, школа, 2016. 318 с.

16. Инструкция по расчетам экономической эффективности применения частотно-регулируемого привода. М.: АО ВНИИЭ и МЭИ, 2017. 69 с.

17. Инструкция по эксплуатации приводов Danfoss VLT AutomationDrive. URL: <https://>

files.danfoss.com/download/Drives/doc\_MG33AE50.pdf/ (дата обращения 25.04.2021).

18. Каталог продукции Danfoss. URL: <https://www.danfoss.com/ru-ru/products/ac-drives/dds/vlt-and-vacon-legacy-drives/vlt-fcd-300/> (дата обращения 25.04.2021).

19. Ковчин С.А., Сабинин Ю.А. Теория электропривода: учебник для вузов. СПб.: Энергоатомиздат, 2017. 496 с.

20. Ложкин П.И., Евдокимов И.Г. Анализ электрических сетей 10 кВ Автозаводского района города Тольятти // Энергоэффективность и энергобезопасность производственных процессов: сборник трудов V Всероссийской научно-технической конференции студентов, магистрантов, аспирантов (г. Тольятти, ноябрь 2019 г.). Тольятти: ТГУ. 2019. С. 95-96.

21. Налоговый кодекс Российской Федерации (НК РФ) [Электронный ресурс]. URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_19671/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_19671/) (дата обращения 25.04.2021).

22. Онищенко Г.Б., Аксенов М.И., Грехов В.П., Зарицкий М.Н., Куприков А.В., Нитиевская А.И. Автоматизированные электроприводы промышленных установок / Под общей редакцией Г.Б. Онищенко. М.: РАСХИ, 2016. 328 с.

23. Остриров В.Н. Анализ особенностей эксплуатации частотнорегулируемого электропривода компрессора вагона метро / В.Н. Остриров, А.С. Анучин, А.А. Габидов, Д.В. Репецкий // Промышленная энергетика. 2017. № 9. С. 14-16.

24. Правила устройства электроустановок (ПУЭ). 7-е изд. с изм. и доп. М.: КНОРУС, 2010. 488 с.

25. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей : введ. в действие с 01.07.03 (в ред. Приказа Минэнерго России от 13.09.2018 № 757). М.: ЗАО «Энергосервис», 2003. 160 с.

26. Романов А.В. Перспективы применения автоматизированного электропривода //Электротехника. 2015. №11. С. 11-16.

27. Руководство по программированию Привод VLT® HVAC Basic Drive. URL: [https://www.mege.ru/upload/DANFOSS/docs/руководство 20%по программированию%20HVAC%20Basic%20Drive.pdf](https://www.mege.ru/upload/DANFOSS/docs/руководство%20по%20программированию%20HVAC%20Basic%20Drive.pdf) (дата обращения 25.04.2021).

28. Руководство по эксплуатации преобразователя частоты VLT Automation Drive FC 300. URL: [http://en-el.ru/files/File/danfoss/instructions\\_FC300.pdf/](http://en-el.ru/files/File/danfoss/instructions_FC300.pdf) (дата обращения 25.04.2021).

29. Сандлер А.С., Сорбатов Р.С. Автоматическое частотное управление асинхронными двигателями. М.: Энергия, 2015. 328 с.

30. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием: учебник для студ. высш. уч. завед. М.: Академия, 2015. 272 с.

31. Справочная книга электрика / под ред. В.И. Григорьева. М.: Колос, 2016. 746 с.

32. Терехов В.М., О.И. Осипов. Системы управления электроприводов : учебник для студентов вузов. М.: Издательский центр «Академия», 2016. 304 с.

33. Усынин Ю.С. Системы управления электроприводов : учеб. пособие для вузов: Челябинск: ЮУРГУ, 2017. 358 с.

34. Хачатурян В.А. Управление электроснабжением нефтеперерабатывающих предприятий в условиях массового применения регулируемого электропривода. М.: Академия, 2020. 164 с.

35. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в Matlab, SimPowerSystems и Simulink. М.: ДМК Пресс, 2017. 288 с.

36. Энергоэффективность электропривода. Комплексный подход. «Круглый стол» в рамках ПТА-2016 [Электронный ресурс]. URL: <https://konstruktor.net/podrobnее-elekt/ehnergoehffektivnost-ehlektroprivoda-kompleksnyj-podxod.168.html> / (дата обращения 25.12.2020).

37. Fitzgerald A.E., Electric Machinery/ A.E. Fitzgerald, C. Kingsley, JR., S.D. Umans. McGraw-Hill, 2015. 608 p.

38. Kurian S., Nisha G. K. Torque ripple minimization of SRM using torque sharing function and hysteresis current controller // 2015 International Conference on Control Communication & Computing India (ICCC). 19-21 Nov. 2015. P. 149 - 154.
39. Lashkevich M., Anuchin A., Aliamkin D., Briz F. Control strategy for synchronous homopolar motor in traction applications // IECON 2017 - 43<sup>rd</sup> Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 29 Oct. 1 Nov. 2017, Beijing, China. P. 6607 - 6611.
40. Quang N. P., Dittrich J.-A. Vector Control of Three-Phase AC Machines. System Development in the Practice // Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2015. P. 364.
41. Savkin D., Anuchin A., et al. Real-time model of switched reluctance drive based on a LUT magnetization curve for educational purposes // 2017 15<sup>th</sup> International Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA), 1-3 June 2017, Sofia, Bulgaria. P. 480-483.
42. Sprake D., Vagapov Y., Lupin S., Anuchin A. Housing estate energy storage feasibility for a 2050 scenario // 2017 Internet Technologies and Applications (ITA), 12-15 Sept. 2017, Wrexham, UK. P. 137-142.
43. Sul S.-K. Control of Electric Machine Drive Systems. - IEEE Press/Wiley, 2016. 399 p.
44. Vagapov Y., Anuchin A. Low-cost photovoltaic emulator for instructional laboratories // 2016 51st International Universities Power Engineering Conference (UPEC), 2016. Coimbra, Portugal
45. Yan G., Rong Z., Guibin L., Kinoshita N. Research of measurement method about electric vehicle high voltage system isolation resistance // in Proc. IEEE Conf. and Expo on Transportation Electrification Asia-Pacific, Beijing, Aug. 31 - Sept. 3, 2014. P. 1-5.