



Некоммерческое акционерное общество  
«АЛМАТИНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ЭНЕРГЕТИКИ И СВЯЗИ»

Факультет Электротехнический  
Специальность ЭМФ 418 00 - Электротехника  
Кафедра Электротехника и автоматизация промышленного управления

**ЗАДАНИЕ**

на выполнение магистерской диссертации

Магистранту Алиш Айтжан Галимович  
(фамилия, имя, отчество)

Тема диссертации Математическое моделирование  
электроприводов постоянного тока  
утверждена Ученым советом университета № 10 от «30» августа 2016 года  
Срок сдачи законченной диссертации «4» август 2016 года  
Цель исследования разработка математического электропривода  
на базе двигателя постоянного тока с системой «четверный ток-  
фидбек» для вращающей и тормозной характеристик кат

Перечень подлежащих разработке в магистерской диссертации вопросов или краткое содержание магистерской диссертации:

- 1) Анализ технологии получения гармоничной кат
- 2) Анализ типов фидбэков постоянного тока и способы реализации их координат
- 3) Разработка математического электропривода для вращающей и тормозной характеристик кат на базе двигателя постоянного тока с системой «четверный ток-фидбек»
- 4) Расчет параметров и режимов четверного тока
- 5) Построение модели математического электропривода для вращающей и тормозной характеристик кат на базе фидбэка постоянного тока «четверный ток-фидбек»
- 6) Исследование статических и динамических характеристик электропривода

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей)

- 1) Технологическая схема производства барильных кистей на базе корса
- 2) Принципиальная схема системы, изготовляемая "фасетом"
- 3) Математическая модель микропривода (изготовлена от Ковалева Я.А.)
- 4) Структурная схема системы, изготовляемая "фасетом"

Рекомендуемая основная литература

1. Ильяшенко И.Р. Ковалев Я.А. Микроприводы, М.: МЭИ, 3-е издание, 2004г. - 224с.
2. Герман-Тамин С.Г. Конструирование и проектирование микроприводов кистей в Matlab 6.0. Учебное пособие - СПб.: Корпус-принт, 2001 - 300с.
3. Ковалев И.П. Математическое проектирование механических машин. Учебник - М.: Аванта, 2007.

### ГРАФИК подготовки магистерской диссертации

Наименование разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю	Примечание
Микроприводы координатного тока и способы регулирования	21.01.2015	выполнено
Технология получения барильных стержневых материалов	11.03.2015	выполнено
Микроприводные барильные корсы корса в исполнении Ковалева Я.А.	08.04.2015	выполнено
Современные оборудование получения барильных материалов	13.05.2015	выполнено
Разработка и моделирование микропривода кисти для кисти	22.09.2015	выполнено
Изготовление кисти на базе системы "фасетом"		
Технология изготовления барильных кистей	20.11.2015	выполнено
Разработка микропривода кисти на базе системы, изготовляемая "фасетом"	30.11.2015	выполнено
Математическая модель микропривода кисти для кисти барильных кистей на базе системы "фасетом"	10.12.2015	выполнено
Изготовление кисти на базе системы "фасетом"		

Работы контрольные статистико хозяйственной ДПТ на базе системы, методика	20.12.2015	выдано
Тема - расчеты в рыночных условиях		
Компьютерное моделирование макроэкономики на базе системы, методика	29.12.2015	выдано
Тема - расчеты с помощью Excel		

Дата выдачи задания \_\_\_\_\_

Заведующий кафедрой \_\_\_\_\_ (подпись) \_\_\_\_\_ (Ф.И.О.)

Руководитель диссертации  (подпись) Андриенко Е.Т. (Ф.И.О.)

Задание принял к исполнению магистрант  (подпись) (Алиев О.Р.) (Ф.И.О.)

## АНДАТПА

Диссертациялық жұмыста базальтты жыныстардан базальттік жіптерді алудың технологиялық ерекшеліктері қарастырылды. Базальт жіптерін алудың технологиялық сұлбасы сипатталған.

Экспериментті түрде базальтті жіптің диаметрі оның тарту жылдамдығына тәуелді екенін анықталды, яғни бобиннің айналу жылдамдығына тәуелді екенін. Сондықтан, түрлі диаметрдегі жіптерді алу үшін реттелетін электржетек керек.

Тұрақты тоқ қозғалтқыш түрлеріне және олардың координаталарын реттеу жолдарына талдау жүргізілді. «Тоқ көзі – қозғалтқыш» жүйесіндегі тұрақты тоқ қозғалтқышының негізінде реттелетін электржетекті қолданудың тиімділігі ұсынылды және негізге алынды. Сиымдылық – индуктивті түрлендіргіш және басқарылатын түзеткіш негізіндегі тоқ көзі сұлбасы құрастырылды және оның негізгі элементтерінің параметрлері есептелді.

Тәуелсіз қозатын тұрақты тоқ қозғалтқышының математикалық моделі құрастырылды. Статистикалық сипаттамалары әр түрлі жүктемелерде есептелген және графиктері салынған.

«Тоқ көзі – қозғалтқыш» жүйесіндегі электржетегінің құрылымдық моделі құрылды және табыстама функцияларын анықтау үшін есептік формулалар келтірілді.

Matlab бағдарламасы көмегімен электрқозғалтқыштың компьютерлік моделі құрастырылды және жүктеме мен жылдамдықтағы динамикалық сипаттамаларына зерттеу жүргізілді.

## АННОТАЦИЯ

В диссертационной работе рассмотрены технологические особенности получения базальтовых нить из базальтовых пород. Описана технологическая схема получения базальтовых нить.

Экспериментально установлено, что диаметр базальтовой нити зависит от скорости ее вытяжки, т.е. от скорости вращения бобин для ее намотки. Поэтому для получения нитей с различными диаметрами, необходима регулируемый электропривод.

Проведен анализ типов двигателей постоянного тока и способов регулирования их координат. Предложено и обосновано целесообразность применения регулируемого электропривода на базе двигателя постоянного тока с системой «источник тока – двигатель» для вытяжки и намотки базальтовых нить. Разработана схема источника тока на базе емкостно-индуктивного преобразователя и управляемого выпрямителя и рассчитаны параметры его основных элементов.

Составлена математическая модель двигателя постоянного тока с независимым возбуждением. Рассчитаны и построены статические характеристики при различных нагрузках.

Разработана структурная модель электропривода по системе «источник тока – двигатель» и приведены расчетные формулы для определения передаточных функции.

Составлена компьютерная модель электродвигателя с помощью программы Matlab и произведены исследования его динамических характеристики при различных нагрузках и скоростях.

## ANNOTATION

In dissertation work technological features of receiving basalt a thread from basalt breeds are considered. The technological scheme of receiving basalt a thread is described.

It is experimentally established that diameter of a basalt thread depends on the speed of its extract, i.e. on the speed of rotation of reels for its winding. Therefore for receiving threads with various diameters, it is necessary the adjustable electric drive.

The analysis of types of engines of a direct current and ways of regulation of their coordinates is carried out. It is offered and proved a expediently of use of the adjustable electric drive on the basis of the engine of a direct current with system "a current source – the engine" for an extract and winding basalt a thread. It is developed the scheme of a source of current on the basis of the capacitor and inductive converter and the operated rectifier parameters of its basic elements are also calculated.

The mathematical model of the engine of a direct current with independent excitement is made. Static characteristics at various loadings are calculated and constructed.

The structural model of the electric drive on system "a current source – the engine" is developed and settlement formulas for definition transfer functions are given.

The computer model of the electric motor by means of the Matlab program is made and researches of its dynamic characteristics at various loadings and speeds are made.

## **Общая характеристика работы**

### **Актуальность проблемы.**

Развитие современной техники и технологий требует создание материалов, которые имеют малую объемную массу, хорошие прочностные характеристики, способные выдерживать температурные нагрузки, влияние агрессивных сред, а также высокую фильтрующую и поглощательную способности. Одним из видов таких материалов является базальтовые нити. Из них получают: армирующий материал для производства плат, корпусов электронной аппаратуры; материалы для фильтров сточных вод очистных сооружений, теплоизоляционные материалы для теплоизоляции.

Существующая технология по переработке базальтовых пород использует нерегулируемый электропривод для вытяжки и намотки базальтовых нить на базе асинхронного двигателя, которые не отвечают современным требованиям по энергосбережению и точности регулирования скорости в широком диапазоне.

В настоящее время в различных отраслях производства находит широкое применение регулируемые электроприводы, которые отличаются высокой надежностью, высокими технико-экономическими показателями и обладают широким диапазон регулирования координат.

В связи с этим разработка регулируемого электропривода для вытяжки и намотки базальтовых нить является актуальной.

**Целью работы** является разработка регулируемого электропривода на базе двигателя постоянного тока с системой «источник тока – двигатель» для вытяжки и намотки базальтовых нить, с использованием его математической и компьютерной моделей.

Указанная цель определила следующие **основные задачи** диссертационной работы:

- провести анализ технологии получения базальтовой нити;
- провести анализ типов двигателей постоянного тока и способов регулирования их координат;
- разработать регулируемый электропривод бобин для вытяжки и намотки базальтовых нить на базе двигателя постоянного тока с системой «источник тока - двигатель»;
- обоснованы параметры элементов источника тока;
- исследовать статические и динамические характеристики электропривода.

**Общая методика исследований.** Поставленные задачи решены на основе теоретического и практического анализа работы по намотке базальтовых нить с использованием фундаментальных положений теории автоматизированного электропривода, методов математического моделирования в программной среде Matlab.

**Научная новизна проведенных исследований в том, что впервые:**

- предложено и обосновано целесообразность применения регулируемого электропривода по системе «источник тока – двигатель» для вытяжки базальтовых нить различного диаметра;

– обоснованы параметры элементов источника тока: индуктивно – емкостного преобразователя и управляемого выпрямителя;

– получены статические и динамические характеристики регулируемого электропривода бобин для намотки базальтовых нить на базе двигателя постоянного тока с системой «источник тока – двигатель».

**Апробация работы.** Материалы диссертации обсуждены и доложены на ежегодной конференции магистрантов кафедры “Электропривод и автоматизация промышленных установок” Алматинского университета энергетики и связи (г.Алматы 2015, октябрь).

**Публикации.** По результатам исследования опубликована научная статья по теме «Моделирование электропривода по системе «источник тока - двигатель» в сборнике научные труды магистрантов АУЭС.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из аннотаций на трех языках, введения, трех разделов и заключения и списка литературы, содержит 73 страницы.



## Список сокращений

ДПТ – двигатель постоянного тока;  
ДПТПВ – двигатель постоянного тока с последовательным возбуждением;  
ДПТСВ – двигатель постоянного тока со смешанным возбуждением;  
БНВ – базальтовое непрерывное волокно;  
ЭМП – электромеханический преобразователь;  
МП – механический преобразователь;  
ИП – информационный преобразователь;  
ЭДС – Электродвижущая сила;  
ИЕП – индуктивно-емкостной преобразователь;  
ДТ – датчик тока;  
БО – блок ограничения;  
КПД – коэффициент полезного действия;  
МПТ – машина постоянного тока;  
ПЧ – преобразователь частоты;  
САУ – система автоматического управление;  
УВ – управляемые выпрямители;  
ЧРП – частотно-регулируемый привод;  
ЭП – Электроприводом;  
ЭМС – Электромеханическими системы;  
УУ – управляющее устройство;  
ЭДУ – электродвигательное устройство;  
ПУ – преобразовательное устройство;  
МПУ – механическое передаточное устройство.

Принятые в диссертации единицы измерения: А, В, Ом, рад/с, с, м/с, Н·м, кг, кг·м<sup>2</sup>, кДж.

## Содержание

Введение	12
Глава 1 Электроприводы постоянного тока	14
1.1 Развитие и современное состояние электроприводов постоянного тока	14
1.2 Способы регулирования частоты вращения двигателя постоянного тока	17
1.3 Регулируемый электропривод постоянного тока с независимым возбуждением. Область применения	24
1.4 Регулируемый электропривод постоянного тока с последовательным возбуждением. Область применения	29
1.5 Электропривод постоянного тока от источника тока	33
1.6 Системы подчиненного регулирования с двигателем постоянного тока	35
Вывод	38
Глава 2 Технология получения базальтовых строительных материалов	39
2.1 Месторождения базальтовых горных пород в Республике Казахстан	39
2.2 Строительные материалы из базальта и область их применения	40
2.3 Современные оборудования получения базальтовых материалов	41
Вывод	50
Глава 3 Разработка и моделирование электропривода бобин для получения базальтовых нить	50
3.1 Технология получения базальтовых нить	50
3.2 Разработка электропривода бобин для намотки базальтовых нить на базе системы «источник тока - двигатель»	53
3.3 Математическая модель электропривода бобин для намотки базальтовых нить на базе двигателя постоянного тока по системе «источник тока – двигатель»	56
3.4 Расчет и построение статических характеристик двигателя постоянного тока на базе системы «источник тока - двигатель» в различных магнитных потоках	62
3.5 Компьютерное моделирование электропривода бобин на базе системы «источник тока - двигатель» с помощью Matlab	68
Вывод	76
Заключение	77
Список литературы	78



## Введение

Эффективность средств производства, которыми располагает человеческое общество, в значительной степени определяется совершенством способов получения энергии, необходимой для выполнения механической работы в производственных процессах. Производственные механизмы, без которых нельзя в настоящее время представить себе ни одно производство прошли длительный путь своего развития, прежде чем приняли вид современного автоматизированного электропривода, приводящего в движение бесчисленное множество рабочих машин и механизмов в промышленности, транспорте, в сельском хозяйстве и в бытовой технике и автоматически управляющего их технологическими процессами.

Пределы использования по мощности современного электропривода весьма велики от десятков тысяч киловатт в единичном двигателе до долей ватта.

Современный автоматизированный электропривод представляет собой сложную электромеханическую систему, предназначенную для приведения в движение рабочего органа машины и управления её технологическим процессом. Он состоит из трёх частей: электрического двигателя, осуществляющего электромеханическое преобразование энергии, механической части, передающей механическую энергию рабочему органу машины, и системы управления, обеспечивающей оптимальное по тем или иным критериям управление технологическим процессом. В наше время невозможно обойтись без электропривода. Жизнь бы серьёзно осложнилась не будь в доме лифта. Без электропривода трудно себе представить системы охлаждения. Если переходить от общего к частному, то двигатели постоянного тока применяются в следующих устройствах и системах:

- Краны различных тяжёлых производств;
- Привод, с требованиями регулировки скорости в широком диапазоне и высоким пусковым моментом;
- Тяговый электропривод тепловозов, электровозов, теплоходов, карьерных самосвалов и пр.

Развитие современной техники и технологий требует создание материалов. Одним из видов таких материалов является базальтовые нити. Из них получают: армирующий материал для производства плат, корпусов электронной аппаратуры; материалы для фильтров сточных вод очистных сооружений, теплоизоляционные материалы для теплоизоляции.

Существующая технология по переработке базальтовых пород использует нерегулируемый электропривод для вытяжки и намотки базальтовых нить на базе асинхронного двигателя, которые не отвечают современным требованиям по энергосбережению и точности регулирования скорости в широком диапазоне.

В настоящее время в различных отраслях производства находит широкое применение регулируемые электроприводы, которые отличаются высокой

надежностью, высокими технико-экономическими показателями и обладают широким диапазоном регулирования координат.

Электропривода постоянного тока широко используются в промышленности, в частности может быть использована для привода бобин для вытяжки и намотки базальтовых нитей. Их существенные преимущества заключаются в простоте управления точности и непрерывности регулирования скорости в широком диапазоне высоком быстродействии.

В связи с этим разработка регулируемого электропривода для вытяжки и намотки базальтовых нитей является актуальной.

В диссертационной работе рассмотрены технологические особенности получения минеральных волокон из базальтовых пород и соединений.

Проведен краткий обзор существующих типов двигателей постоянного тока в различных областях промышленности.

Анализируются технологические свойства базальтовых руд с целью получения перспективных инновационных строительных материалов, таких как базальтовые нити. Описана технологическая схема получения базальтовых нитей. Обосновано целесообразность применения регулируемого электропривода на базе двигателя постоянного тока с системой «источник тока – двигатель». Данная система выполнена на базе емкостно-индуктивного преобразователя и управляемого выпрямителя.

Рассчитываются силовые элементы емкостно-индуктивного преобразователя и управляемого выпрямителя.

Составляется математическая модель двигателя постоянного тока с независимым возбуждением. Построены статические характеристики при различных нагрузках.

Составляется компьютерная модель электродвигателя с помощью Matlab и произведены исследования его динамических характеристики при различных нагрузках и скоростях.

Составлена структурная модель электропривода по системе «источник тока – двигатель».

Полученные статические и динамические характеристики и результаты моделирования показывают, что применение электропривода на базе системы «источник тока – двигатель» расширяет диапазон регулирования скорости вытяжки базальтовых нитей и тем самым обеспечивает получения нитей различных диаметров с высокими качествами.

## Глава 1 Электроприводы постоянного тока

### 1.1 Развитие и современное состояние электроприводов постоянного тока

Электрический привод – молодая отрасль науки и техники, насчитывающая более столетия с момента практического применения. С начала и почти до конца XIX века для приведения в движение станков и различных механизмов использовались паровые двигатели.

Появление электропривода (ЭП) в работе многих отечественных и зарубежных ученых, инженеров-электриков. Среди имен ученых, которые, как отмечает датчанин Н. Эрстед в 1820 году, показали возможность взаимодействия между магнитным полем и текущим дирижер А. Ампер французский применять математически этого взаимодействия в том же 1820 году в английский Майкл Фарадей, который построил экспериментальный двигатель тысячу восемьсот двадцать один национальный научный, академики Б. Якоби и Ленц Э., созданный в 1834 году, двигатель постоянного тока, и в 1837 году двигатель построенный в Дэвенпорт.

Америке с простого выключателя. 1838 BS Якоби улучшить дизайн ЭД, почти все современные электрические компоненты автомобилей были размещены, и который был использован на лодке. Поэтому 1838 год является годом рождения блока. В связи с тем, что обнаружен выгодный источник энергии для этих ЭД - гальванической батареи, были причиной того, что работа Якоби Б.С.и его последователей не получили немедленного практического применения.

Поэтому 1838 год является годом рождения привода. В связи с тем, что стоимость источника энергии обнаружен из этих ЭД для - гальваническая батарея, были причиной того, что Рабочая BS Якоби и его ученики не дали немедленного правоприменительной практики.

На основании открытого в 1833 академик Ленца Е.Н. принципа обратимости электрических машин, в 1870 году, французский Н. Грамм создали электрический генератор постоянного тока. Наш соотечественник инженер-электрик Н. В. Н. Чиколев создана в 1879 ЭП дуговых ламп, электрических швейных машин (1882) и вентилятор (1886).

Мощность между ткачества в Москве на текстильных фабриках. Мы начали использовать электрический толчок в общественном транспорте - трамвае линии в городе Казани, Нижнем Новгороде и Киеве (1892), Москве (1903) и Санкт-Петербурге (1907).

Анализ практического опыта в области использования и развития систематизации теоретических основ был инициирован для дальнейшего развития КМГ было сделано в научной работе высокий электрический Д. Лачинов в 1880 году в журнале "Электричество. Таким образом, 1880 год рождения науки о блоке.

Дальнейшее развитие ЭП связано с развитием силовой преобразовательной техники и комплектных микропроцессорных устройств для систем управления ЭП постоянного и переменного тока. Наиболее перспективным остается асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором – наиболее простой и дешевый преобразователь энергии. Такой ЭП с современными бесконтактными преобразователями частоты, являясь более простым, надежным в эксплуатации, может обеспечить регулирование скорости в большом диапазоне с хорошей динамикой переходных процессов.

Современный автоматизированный электропривод почти полностью удовлетворяет требованиям промышленности, сельского хозяйства и науки в необходимом диапазоне мощности, скорости и плавного регулирования. Пределы энергии используются в электрических автомобилях, очень широк - от киловатт до десятков тысяч ватт акций. Например, в прокатных станах, сталелитейные заводы и электрический автомобиль синхронные двигатели мощностью до 30 МВт.

Для привода подъемных установок горнодобывающей промышленности применяются синхронные электродвигатели мощностью свыше 5 МВт. В то же время разработаны и применяются микродвигатели с малым диаметром ротора (до 100 мкм) и частотой вращения до 50000 об/мин.

В настоящее время основной задачей единицу массы и электричества были недавно разработаны, прежде всего, на повышение надежности, снижение веса и стоимости размера, стоимости и выровнены. Наиболее важным развитие современных электроприводов проводятся на основе электрических машин переменного тока.

На 2002 год европейский рынок регулируемых электроприводов состоит: на 68% из электроприводов переменного тока; 15% - постоянного тока, 10% гидроприводов, 7 % - механических.

На сегодня мощности отдельных приводов составляют десятки МВт с регулированием частоты вращения от одного оборота в час до 150.000 оборотов в минуту.

Диапазон применения современного электропривод - от искусственного сердца до шагающего экскаватора.

Электропривод - это управляемая электромеханическая система, которая предназначена преобразовать электрическую энергию в механическую и обратно и управлять этим процессом.

Привод имеет два канала - канал и данных (рисунок 1.1). В первые транспорты к энергии второго новообращенного управляет потоком энергии и сбор и обработку информации о функционировании и статусе, диагностике неисправностей.

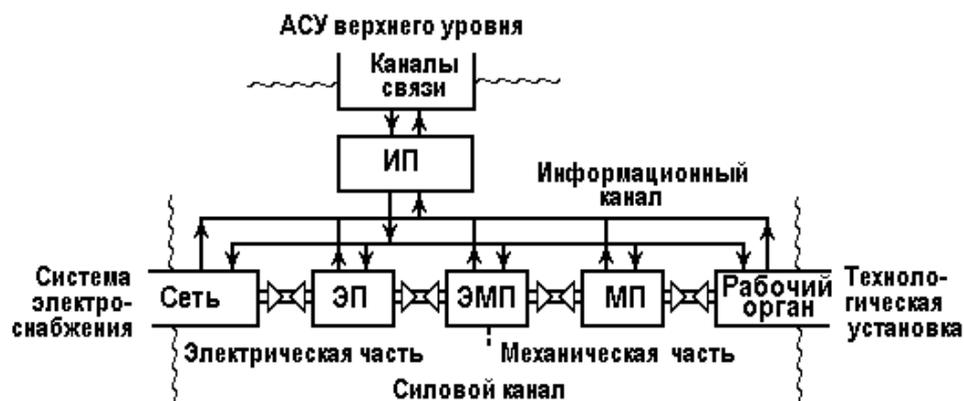


Рисунок 1.1 – Общая структура электропривода

Впускной канал в свою очередь состоит из двух частей - электрической и механической, и должен содержать ссылку - электромеханический преобразователь.

Электрическая часть канала подачи включает в себя оборудование ЭП передачи электрическую энергию от источника питания (силовые промышленные шины, автономного электрогенератора, батареи и т.д.) электромеханического преобразователя и противостоять ЭМП и, если это необходимо преобразование электрической энергии.

Механическая часть состоит из подвижного органа электромеханического преобразователя, механических передач и исполнительного органа установки, полезно механическая энергия преобразуется.

Сила взаимодействует с системой питания или источнику питания, с одной стороны, с процессом машины или, с другой стороны, и, наконец, через информацию преобразователь ИП с информационной системой является высокий уровень, часто с одним человеком - оператором, третьей странице (рисунок 1.1).

Можно сказать, что привод подсистемы, содержащиеся в этих систем, а часть из них.

Почти все процессы, связанные с механической энергией, перемещая устройство, сделанное. Исключение составляют лишь автономные транспортные средства (автомобили, самолеты, некоторые виды подвижного состава, используемого на небольшом количестве промышленных предприятий, реже гидравлический привод - привод.

Вездесущность привода из-за собственных характеристик электричества:

- возможность передавать на любое расстояние;
- всегда готов к использованию;
- простое преобразование в другие виды энергии.

На сегодня в приборных системах используются электроприводы, мощность которых составляет единицы микроватт; мощность электропривода

компрессора на перекачивающей газ станции - десятки мегаватт, этим можно сказать диапазон современных электроприводов по мощности превышает  $10^{12}$ . Такого же порядка и диапазон по частоте вращения: в установке, где выращиваются кристаллы полупроводников, вал двигателя должен делать 1 оборот в несколько десятков часов при очень жестких требованиях к равномерности движения; частота вращения шлифовального круга в современном хорошем станке может достигать 150 тыс. об/мин.

Но широкий диапазон применения современной электроприводом: от искусственного сердца прежде, чем идти экскаватор, от вентилятора к антенне радиотелескопа, от стиральной машины до гибкой производственной системы. Именно эта особенность - работает в тесном контакте с технологической сфере - была и на диске представляет собой мощный стимулирующий эффект. С тех растущие потребности блоков обработки определяют развитие электропривода, совершенствование основной элемент его методологии. В свою очередь, развитие положительного эффекта по технологии электрического поля открывает новые возможности.

С энергетической точки зрения, электрический - основной потребитель мощности в развитом мире потребляет более 60% от общего производства электроэнергии. Учитывая нехватку энергоресурсов, особенно остро стоит проблема энергосбережения в диске и его агентов.

Эксперты говорят, что сегодня, чтобы сэкономить энергетические ресурсы, такие как 1 тонну условного топлива в два раза дешевле, чем его экстракта. Легко заметить, что в будущем изменить это соотношение: в топливе становится все более сложно, и сохраняет все его принятия.

## **1.2 Способы регулирования частоты вращения двигателя постоянного тока**

Частота вращения двигателя постоянного тока:

$$n = \frac{U - I_a(\Sigma R_a + R_{доб})}{c_e \Phi} \quad (1.1)$$

Следовательно из формулы (1), он может быть установлен тремя способами:

- включение дополнительных резисторов в цепи обмотки якоря  $R_{доб}$ ;
- изменение магнитного потока  $\Phi$ ;
- изменение напряжения питания  $U$ .

Например, двигатель шунта можно посмотреть на основных черт, присущих этим методам регулирования.

### **1.2.1 Включение реостата в цепь якоря**

Если резисторов в цепи скорости якоря резко уменьшается с увеличением нагрузки, когда двигатель не реостат:

$$n = \frac{U - I_a(\Sigma R_a + R_{доб})}{c_e \Phi} = \frac{U}{c_e \Phi} - \frac{I_a(\Sigma R_a + R_{доб})}{c_e \Phi} = n_0 - \Delta n \quad (1.2)$$

Это показано на рисунке 1.2, что свидетельствует о скорости и механические характеристики двигателя с шунта 1 - естественно, если ( $R_{доб} = 0$ ); 2 - сопротивление ( $R_{доб} > 0$ ). Скорость без нагрузки для обоих свойств являются значения (уменьшение скорости под нагрузкой) различны. В то же тока якоря  $\Delta n_{ест} / \Delta n_{реост} = \Sigma R_a / (\Sigma R_a + R_{доб})$ . Чем больше  $R_{доб}$  дополнительное сопротивление, тем круче падает с увеличением скорости работает.

Механические характеристики  $n = f(M)$  двигателя с параллельным возбуждением можно получить из скоростных характеристик  $n = f(I_a)$  изменением масштаба на горизонтальной оси как двигатель такого типа  $M = SMFA \text{ CIA}$  (момент пропорционален току якоря).

Основным недостатком данного способа регулирования, возникновение больших потерь энергии в реостатом (особенно на низких скоростях), как видно из соотношения:

$$\frac{\Delta n}{n_0} = \frac{I_a(\Sigma R_a + R_{доб})}{U} = \frac{I_a^2(\Sigma R_a + R_{доб})}{U \cdot I_a} = \frac{\Delta P_{эл}}{P_1}, \quad (1.3)$$

где  $\Delta P_{эл}$  - электрические потери в цепи якоря;  
 $P_1$  - мощность, подведенная к якорю.

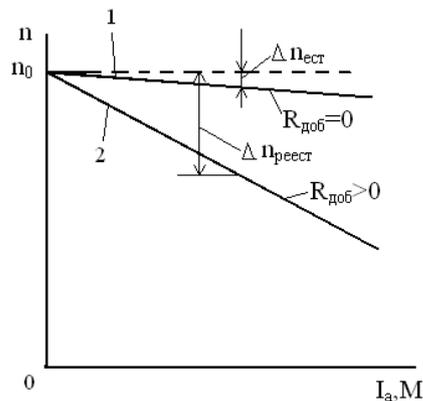


Рисунок 1.2 - Скоростные и механические характеристики двигателя с параллельным возбуждением при регулировании частоты вращения путем включения реостата в цепь якоря

Решая уравнение (1.3) относительно  $\Delta P_{эл}$ , получаем:

$$\Delta P_{\text{эл}} = \frac{P_1 \Delta n}{n_0} = \frac{P_1 (n_0 - n)}{n_0}, \quad (1.4)$$

т.е. с уменьшением частоты вращения якоря потери линейно возрастают.

Очевидно, что этот метод не может крыс (по сравнению с собственной частотой работы). Иногда важно, что, когда якорь кабель существенно прочностные свойства охлаждения двигателя (мягкой), так что небольшие изменения в момент нагрузки, в результате чего большие колебания в скорости.

Изменения в магнитном потоке. Чтобы изменить магнитный поток, необходимо регулировать ток двигателя. Если различные магнитные потоки  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$  определяет скорость формул:

$$n_1 = \frac{U - I_a \Sigma R_a}{c_e \Phi_1} = \frac{U}{c_e \Phi_1} - \frac{I_a \Sigma R_a}{c_e \Phi_1} = n_{01} - \Delta n_1, \quad (1.5)$$

$$n_2 = \frac{U - I_a \Sigma R_a}{c_e \Phi_2} = \frac{U}{c_e \Phi_2} - \frac{I_a \Sigma R_a}{c_e \Phi_2} = n_{02} - \Delta n_2$$

В двигателе, например, на холостом ходу, а сдвиг падение обратно пропорционально изменению магнитного потока:

$$\frac{n_{02}}{n_{01}} = \frac{\Delta n_2}{\Delta n_1} = \frac{\Phi_1}{\Phi_2} \quad (1.6)$$

Таким образом, высокая скорость 1 и 2 двигатель данных на различных магнитных потоков  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$  не параллельны (рисунок 3,а). Эти свойства априори скорость резки нулю, поскольку в этом случае ток течет независимо шага:

$$I_{ак} = \frac{U}{\Sigma R_a} \quad (1.7)$$

Он устанавливает величину напряжения и сопротивления цепи якоря. Значение тока  $I$  с  $p = 0$  определяют, что ток короткого замыкания.

Механические свойства силы шунта на основании следующих соображений. Каждый из механических свойств почти линейна (пренебрегая реакцию лодыжки), и может быть построена в двух точках: точка холостого хода, в котором время равна нулю, и точка короткого замыкания, в котором точка максимального.

Сравнивая моменты при коротком замыкании, соответствующие различным значениям магнитного потока, получаем:

$$\frac{M_{k1}}{M_{k2}} = \frac{c_M \cdot \Phi_1 \cdot I_{ak}}{c_M \cdot \Phi_2 \cdot I_{ak}} = \frac{\Phi_1}{\Phi_2}, \quad (1.8)$$

Таким образом, при изменении скорости потока магнитного холостом ходу увеличивается, и временем, когда уменьшается короткое замыкание. Следовательно, механические свойства, построенные для различных значений магнитного потока пересекаются в какой-то момент и скорость Маха, ниже скорости на холостом ходу, но больше нуля (Рисунок 1.3 б). Из анализа механических характеристик можно видеть, что при значениях крутящего момента нагрузки, ниже, Маха, уменьшение расхода приводит к увеличению скорости (смотреть пункт С1 и С2, когда крутящий момент нагрузки Мн1). Для значений момента нагрузки, большой Маха, уменьшая поток уменьшается скорость (море. Точка С'1 и с2, когда крутящий момент нагрузки Мп2).

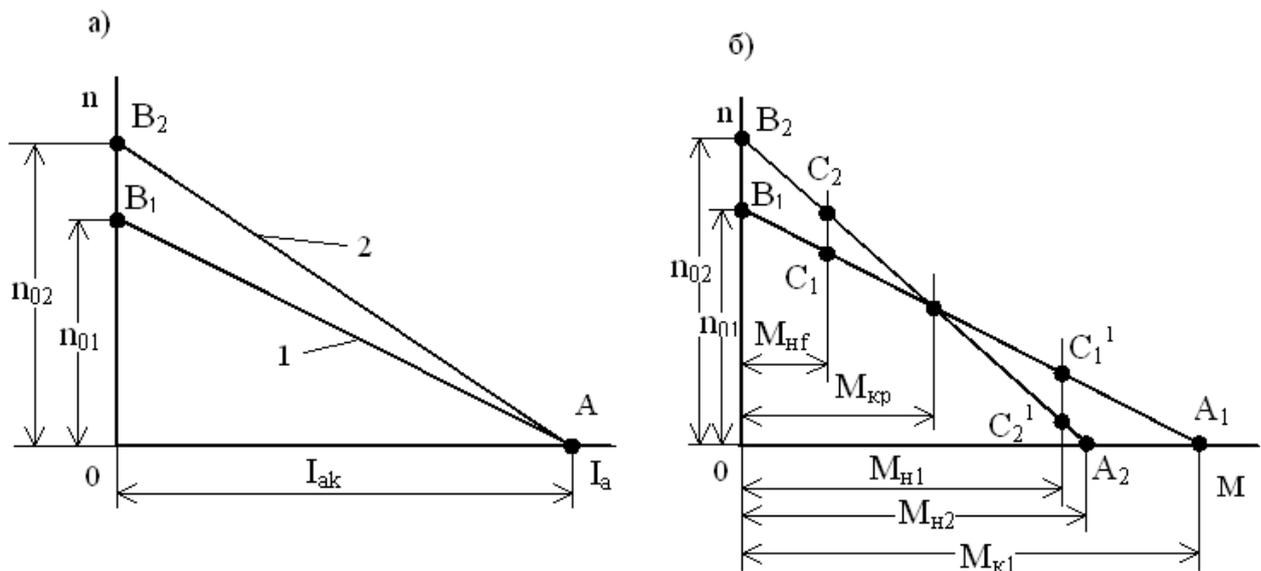


Рисунок 1.3 – Скоростные и механические характеристики двигателя с параллельным возбуждением при регулировании частоты вращения путем изменения магнитного потока

Для двигателей Шунт среду и снижение потока высокой мощности используется для увеличения скорости (рисунок 1.4,а). Микромотор, наоборот, магнитный поток уменьшается, чтобы уменьшить скорость.

Аналогичным образом, механические свойства и расположены последовательно обмоткой двигателя; Двигатели и высокая средняя мощность при одновременном снижении магнитные увеличивается потока скорости рисунок 1.4 б).

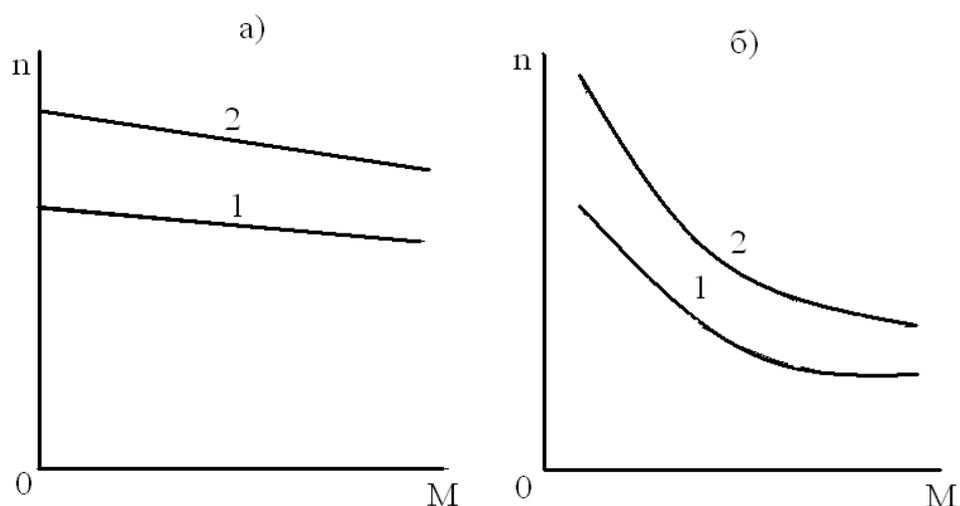
Снижение магнитного потока в двигателях последовательного возбуждения делается путем включения регулировки реостата Rpv

параллельно обмотке возбуждения ОВ (Рисунок 1.5) осуществляется таким образом, чтобы ток возбуждения:

$$I_B = \frac{I_a \cdot R_{pe}}{R_B + R_{pe}} = \beta \cdot I_a, \quad (1.9)$$

где  $R_{p.v}$  – сопротивление регулировочного реостата, включенного параллельно обмотке возбуждения;

$\beta = I_B/I_a$  - коэффициент регулирования возбуждения.



а - при нормальном возбуждении; б - при уменьшении магнитного потока  
Рисунок 1.4 – Механические характеристики двигателей

Когда реостат  $R_{p.v}$  параллельно возбуждения тока обмотки I-требуется распределение между катушкой и сопротивления предоставляется только в стационарном состоянии. Переходные, если ток  $I_a$  и  $I_c$  изменение обмотки возбуждения значительную ЭДС самоиндукции есть под действием тока  $I_c$  в уменьшается по сравнению с ее значением в установившемся состоянии, и ток поднимается  $I_{r.v}$ , т. Е. Существует значительное замедление в волнении. Самым опасным этот режим для электрифицированных транспортных двигателей (локомотивов, поездов, трамваев, троллейбусов). При отключении двигателя от сети питания, а затем включите (если разведены пантограф на контактный провод) впервые почти весь ток  $I_a$  является  $R_{p.v}$  мин ток  $I_c$  очень мало. Это приводит к значительному увеличению в текущем  $I_a$  через резкое снижение ЭДС  $E$ , индуцированного в обмотке якоря. На практике, при таких обстоятельствах, происходит резкое пусковой ток  $I_a$  сопровождается нарушением нормального переключения и округ пожарной форме.

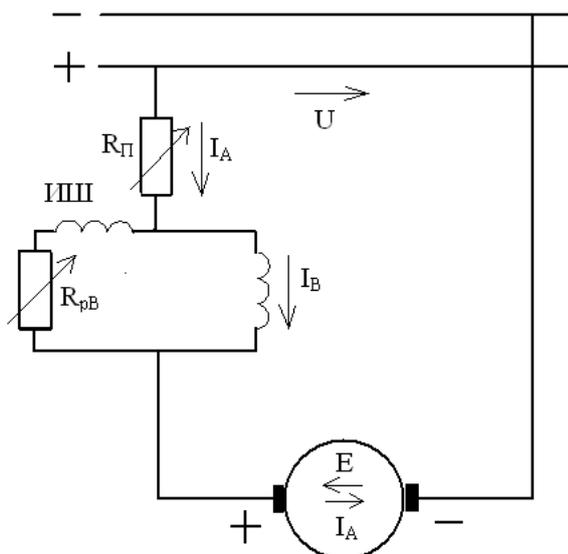


Рисунок 1.5 – Схема включения регулировочного реостата в двигателе с последовательным возбуждением

Чтобы убедиться, что переходные как SNA распределения тока между обмоткой и реостата кэВ, как в стационарном режиме с реостатом серии включают в себя индуктивный шунт ISH (катушки с ферромагнитным сердечником). Индуктивность выбирают таким образом, чтобы отношение индуктивности обмотки возбуждения и реостата был примерно равен отношению значений сопротивления.

В качестве способа управления является простым и экономичным, так что она используется многократно на практике. Тем не менее, управление скоростью может быть выполнена только в относительно небольшой площади; Правило  $N_{\max} / \min n = 2 \div 5$ . Нижний предел  $N_{\max}$  ограничивается насыщением магнитной цепи машины, которая не позволяет существенно увеличить магнитный поток.

Верхний предел  $n_{\max}$  определяется условиями устойчивости (при сильном уменьшении  $\Phi$  двигатель идет в «разнос»), а также тем, что при глубоком ослаблении возбуждения резко увеличивается искажающее действие реакции якоря и возрастает реактивная ЭДС, что повышает опасность возникновения искрения на коллекторе и появления кругового огня. Поэтому двигатели, предназначенные для работы в режимах глубокого ослабления возбуждения, должны иметь компенсационную обмотку и пониженное значение реактивной ЭДС при номинальном режиме.

Изменение напряжения на зажимах якоря. При изменении напряжения  $U_1$  на  $U_2$  скорости определяются по формулам:

$$n_1 = \frac{U_1 - I_a \Sigma R_a}{c_e \Phi} = \frac{U_1}{c_e \Phi} - \frac{I_a \Sigma R_a}{c_e \Phi} = n_{01} - \Delta n_1; \quad (1.10)$$

$$n_2 = \frac{U_2 - I_a \Sigma R_a}{c_e \Phi} = \frac{U_2}{c_e \Phi} - \frac{I_a \Sigma R_a}{c_e \Phi} = n_{02} - \Delta n_2. \quad (1.11)$$

Частота вращения двигателя на холостом ходу шунта пропорциональна изменению напряжения, то есть.  $n_{02} / n_{01} = U_2 / U_1$ , и снижение скорости из-за влияния нагрузки, с  $Mn = \text{Const}$  остается неизменной:  $n_1 = n_{01} - \Delta n_1$ ;  $n_2 = n_{02} - \Delta n_2$ ;  $n_3 = n_{03} - \Delta n_3$ . В связи с этим, скорость характеристик двигателя с шунтом представляют собой семейство параллельных прямых 1, 2 и 3 (рис 1.6а). Механические свойства  $N = F(M)$  получается из числа оборотов путем изменения масштаба по оси X., как пропорциональный крутящего момента к току якоря.

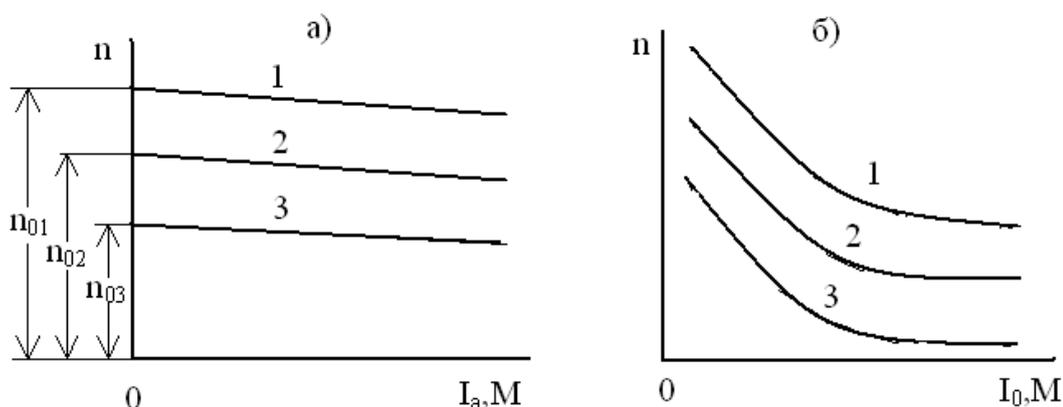


Рисунок 1.6 – Скоростные и механические характеристики двигателей при регулировании частоты вращения путем изменения напряжения на зажимах якоря

Скорость Встроенный и механические характеристики двигателя с выработки электроэнергии подобны (рисунок 1.6 б). Регулировка скорости вращения двигателя с помощью изменения напряжения на зажимах якоря, как правило, "вниз", то есть. E. напряжения и уменьшить скорость по сравнению с номинальным напряжением.

### 1.2.2 Изменение направления вращения

Чтобы изменить направление вращения двигателя, необходимо изменить направление электромагнитного момента  $M$ , действующего на якорь, которое показано на рисунке 1.7.

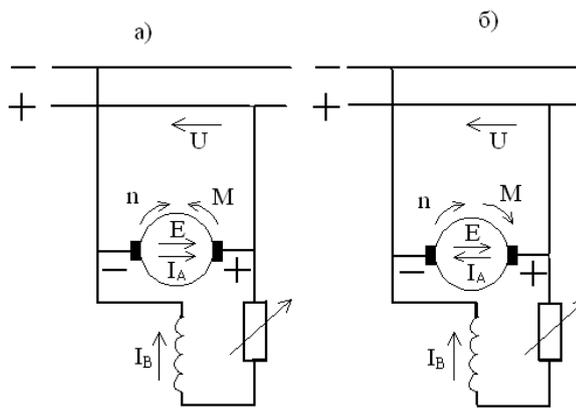


Рисунок 1.7 - Схемы работы машины постоянного тока в генераторном и двигательном режимах

$$M = c_M \Phi I_a \quad (1.12)$$

Как следует из уравнения (1.12), это может быть достигнуто двумя способами: путем изменения направления тока в обмотке якоря  $I_a$  или назад магнитного потока  $\Phi$ , т. е. ток возбуждения. Чтобы сделать это, в свою очередь провода с током в обмотке якоря и обмотки возбуждения.

### 1.3 Регулируемый электропривод постоянного тока с независимым возбуждением. Область применения

Для простейшей модели электрического тока, описывает стационарные (статическом режиме), и дает возможность получить основные свойства, мы используем схему на рисунке 1.8.

Мы подозреваем, что якорная цепь с помощью независимого источника с напряжением  $U^*$  является сопротивление цепи якоря  $R$  постоянно потока  $F$  только ток возбуждения, значения не определяется нагрузкой от (реакция якоря не происходит) индуктивных параметров цепей не считается, так как мы рассматриваем только устойчивый (статический режим).

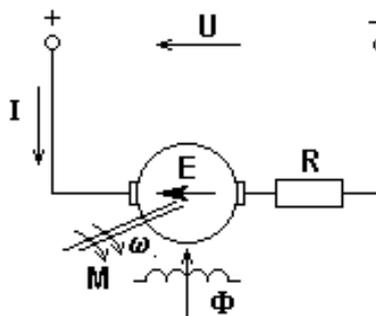


Рисунок 1.8 - Схема электропривода с двигателем постоянного тока

Взаимодействие тока  $I$  в обмотке якоря с магнитным потоком  $F$  генерируется катушками, расположенными на полюсах результатов машины в соответствии с законом Ампера и возникновению электромагнитных сил, действующих на активных проводников обмотки и, следовательно, электромагнитный момент  $M$ :

$$M = k\Phi I. \quad (1.13)$$

где  $k$  – конструктивный параметр машины.

При движении угловой скорости в магнитном поле под действием м проводников обмотки якоря в соответствии с законом Фарадея ЭДС вращения индуцированных  $E$ :

$$E = k\Phi\omega, \quad (1.14)$$

Направленная в рассматриваемом случае встречно по отношению к вызвавшей движение причине – ЭДС источника питания  $U$ .

В соответствие со вторым законом Кирхгофа для якорной цепи машины справедливо уравнение:

$$U - E = IR. \quad (1.15)$$

Уравнения (1.13) - (1.15) - Я извиняюсь, но достаточно, чтобы понять наиболее важные процессы в цепи постоянного тока модели для меня. Для того чтобы решить практические проблемы, они имеют из уравнения движения, из-за потери в  $M_c$  и уравнений цепи возбуждения, чтобы дополнить для конкретного контура привода

$$M - M_c = J \frac{d\omega}{dt}. \quad (1.16)$$

Конечно, в контексте каждой задачи должно быть строго оговорено, что множество, и вы знаете, что вы ищите.

Рассмотрим роль ЭМП  $E$  в процессе преобразования энергии, выполненной электрической машины. Если есть какие-либо стационарные  $M1 = MС1$ , а затем измененный женщина, например, увеличивается до значения  $Me2$  получить новое устойчивое состояние необходимо, инструмент, который будет изменять  $M$ , привести их в соответствие с новым значением  $\Gamma$ -жа  $B$  двигатель внутреннего сгорания, который выполняет роль оператора, чтобы увеличить подачу топлива; в паровой турбине - специальный контроль, который увеличивает подачу пара.

Электрическая машина выполнять эту роль ЭДС. В самом деле, при увеличении оборотов двигателя женщины начинают снижаться, затем восстанавливаются в соответствии с (1.14) и ЭДС (предположим для простоты, что  $F$  и  $U$  и  $R$  - постоянные) (1.15),

$$I = \frac{U - E}{R}. \quad (1.17)$$

Следовательно, нынешний рост будет определяться темпами роста в соответствии с (1.13). Двигатель автоматически и без внешних воздействий найти новое устойчивое состояние. Эти процессы могут быть найдены всех размеров, чтобы взять и подписать мс электродвижущая сила, используемые в качестве контроля в двигателе и тормозных режимах в машине.

### 1.3.1 Характеристики и режимы при независимом возбуждении, $U = \text{const}$

При использовании в электроприводе постоянного тока двигателя с независимым возбуждением – рисунка 1.9 с питанием от источника напряжения  $U = \text{const}$  уравнение электромеханической характеристики  $\omega(I)$  получится подстановкой (1.15) в (1.16) и решением относительно  $\omega$ :

$$\omega = \frac{U - IR}{k\Phi} \quad (1.18)$$

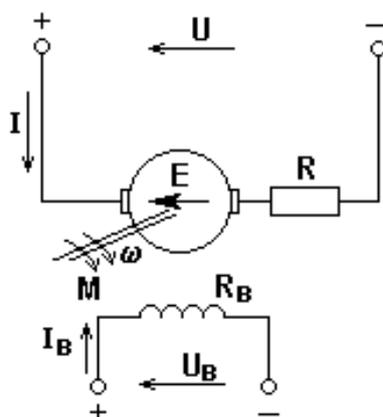


Рисунок 1.9 – Схема двигателя постоянного тока независимого возбуждения

Механическую характеристику  $\omega(M)$  получим, подставив в (1.18) ток, выраженный из (1.13):

$$\omega = \frac{U}{k\Phi} - \frac{MR}{(k\Phi)^2}. \quad (1.19)$$

Для данной А, В и R уравнения (18) и (19) однозначно определить, что. Отношения между М и I во всех режимах Характеристики и прямая, проходящая через две различные точки  $M = 0$  и  $\omega = 0$ ,  $I_{я} = I_{сз}$ ,  $M = M_{кз}$ ; Если  $F = \text{Const}$  только в масштабе они отличаются по горизонтальной оси. Скорость (рисунок 1.10) эквивалентно идеального холостого хода:  $M = 0$ ,  $E = U$  и в противоположном направлении.

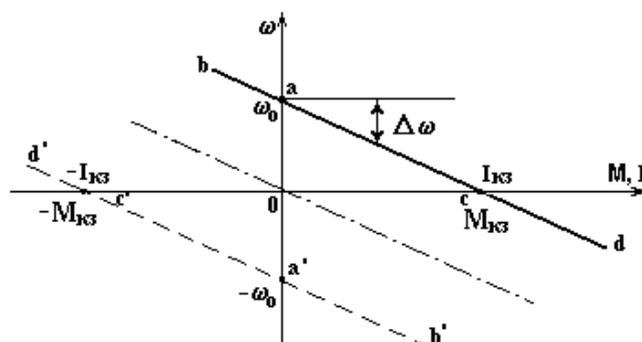


Рисунок 1.10 – Механические (электромеханические) характеристики электропривода постоянного тока независимого возбуждения при  $U = \text{const}$

Величина  $\Delta\omega = \frac{MR}{(k\Phi)^2}$  - перепад скорости под влиянием нагрузки.

Увеличение нагрузки, при определенных условиях, которые обсуждаются ниже, можно прийти при режиме короткого замыкания:  $\omega = 0$ ,  $I = \frac{U}{R} = I_{\text{кз}}$ ,  $M = k\Phi I_{\text{кз}} = M_{\text{кз}}$ .

Если полярность характеристической U принимает положение, показанное на рисунке 10 пунктиром.

Загородный дом между  $\omega = 0$  и  $M_{кз}$ , где знаки  $\omega$  и  $M$  совпадают, соответствуют, как было согласовано ранее, работу двигателя; Области с разными характерами и  $M$  - торможение.

Торможение - это работа генератора механической энергии, процесс с валом машины, преобразуется в электрическую энергию и передается через электрические клеммы машины. В зависимости от того, где подается электрической энергии, есть три режима торможения.

1.3.2 Торможение с отдачей энергии в сеть (рекуперативное) или генераторный режим работы параллельно с сетью

Если якорь двигателя от внешнего источника со скоростью большей, чем скорость идеального холостого хода, чтобы превратить двигатель ЭДС будет больше приложенного напряжения, в результате чего ток в обмотке двигателя и времени будет изменить знак. Механическая энергия подается на

валу двигателя преобразуется в электрическую энергию и чистых потерь в двигателе получают по сети.

Подходит для механических свойств тормозной энергии воздействия на сетевой части АВ и А'В '(рисунок 10).

1.3.3 Торможение противовключением или генераторный режим работы последовательно с сетью

В оппозиции, знак изменения скорости двигателя, сохраняя бренд или отметить время крутящий момент двигателя, в то время как знак скорости. Первое событие под воздействием активного момента статической нагрузки происходит в течение периода короткого замыкания на определенной функции.

В результате, изменяет знак скорость двигателя ЭДС с приложенным напряжением и током в матче выражением якорь:

$$I = \frac{U + E}{R} \quad (1.20)$$

Во втором случае, двигатель остановится при смене полярности напряжения, приложенного к его напряжения якоря.

Из-за механической инерции и скорости двигателя ЭДС остаются неизменными в начальный момент времени, в то время как ток равен:

$$I = \frac{-U - E}{R} \quad (1.21)$$

На механических свойств (рисунок 1.10), ингибирование оппозиции соответствуют части компакт-дисков и CD.

В обратного тока тормозного усилия к приводному механизму, и подается из сети, и резисторы и, в цепи якоря удалены; и в предыдущем случае, энергия передается от механизма к сети.

1.3.4 Динамическое торможение или генераторный режим работы независимо от сети

Если якорная цепь отключается от источника питания и внешнего резистора, когда двигатель от внешнего источника или якорная цепь инерции наведенной ЭДС и ток течет выполненными закрыт, создавая момент. Технические данные проходят через начало координат – двух пунктирная линия на рисунке 1.10.

Отдельные двигатели возбуждения широко используются в качестве систем автоматизации серводвигатели, используемые в качестве так называемого электромагнитного тормоза, а иногда.

## 1.4 Регулируемый электропривод постоянного тока с последовательным возбуждением. Область применения

### 1.4.1 Характеристики и режимы при последовательном возбуждении

Привода постоянного тока иногда используются с последовательным возбуждением, особенно если осуществляется через обмотки последовательно с обмоткой якоря на рисунке 1.11, соответственно.

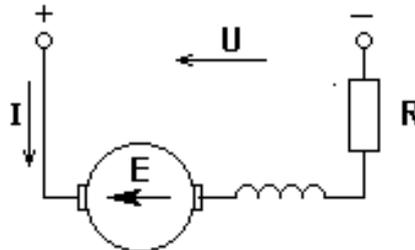
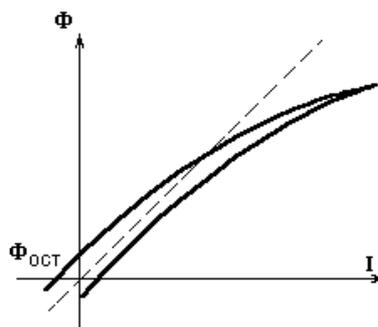


Рисунок 1.11 – Схема двигателя постоянного тока последовательного возбуждения

Для двигателя с последовательным возбуждением, а также других двигателей постоянного тока с источником напряжения якоря ( $U = \text{Const}$ ), уравнений (1.18) и (1.19), однако, когда независимый двигатель тока нагрузки, то поток возбуждения мотор серии с отдельным потоком возбуждения является функцией тока нагрузки.

Зависимость  $\Phi = \varphi(I)$  - характеристика намагничивания - нет простое аналитическое выражение, как показано на рисунке 1.12, его приближенной форме.



Рисунке 1.12 – Характеристика намагничивания машины постоянного тока

В первом приближении, зависимость между числом оборотов двигателя и разработать их в стационарном точке может быть получена путем предположении, что ток возбуждения и ток подключенного в якоря двигателя между линейную зависимость (пунктирная линия на рисунке 12) находятся:

$$\Phi = \alpha I . \quad (1.22)$$

Тогда

$$\omega = \frac{U}{k\alpha I} - \frac{R}{k\alpha} , \quad (1.23)$$

а поскольку

$$M = k\Phi I = k\alpha I^2, \quad (1.24)$$

То

$$\omega = \frac{U}{\sqrt{k\alpha M}} - \frac{R}{k\alpha} . \quad (1.25)$$

Таким образом, в предположении, механические свойства двигателя последовательного возбуждения представлена гиперболы (13); один из его асимптот у оси, а другой - линия, параллельная оси x,

$$\omega = -\frac{R}{k\alpha} . \quad (1.26)$$

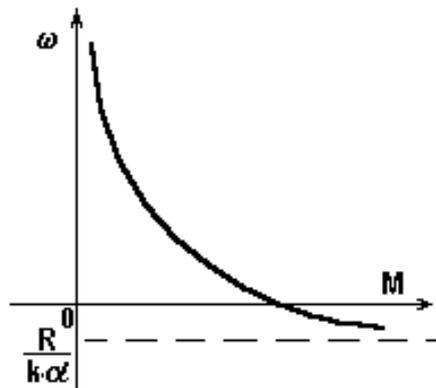


Рисунок 1.13 – Механическая характеристика двигателя последовательного возбуждения

Жесткость механической характеристики  $\beta = \frac{dM}{d\omega}$  двигателя последовательного возбуждения переменна и возрастает с увеличением нагрузки.

Эти уравнения дают лишь общее представление о характеристиках электродвигателя с последовательным возбуждением, так как в действительности магнитная система машины насыщена и кривая намагничивания что-нибудь, но легко. Таким образом, для практических целей, как правило универсальных свойств по ряду машин - встроенный рисунок 1.14 в относительном выражении, и  $I_r$ , и - уставки двигателя отходов

$$\omega^* = \frac{\omega}{\omega_H}, I^* = \frac{I}{I_H} \text{ и } M^* = \frac{M}{M_H}; \omega_H, I_H \text{ и } M_H - \text{номинальные величины двигателя, } R_{дон} = 0.$$

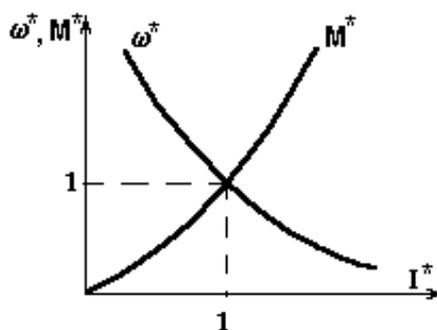


Рисунок 1.14 – Характеристики двигателя последовательного возбуждения в относительных величинах

Электродвигатели с текущего возбуждения в нормальной цепи ( $U = \text{Const}$ ), может работать в том же режиме питания, что приводит к отдельным двигателей возбуждения. За исключением идеальным холостого хода генератора и, работающих параллельно с источником (рекуперативного торможения), а нагрузка стремится к нулю, оно имеет тенденцию магнитный поток нулевой оси - асимптоты механических свойств.

Некоторые особенности в серии возбуждения динамического торможения. Когда якорь вращающейся машины отключается от источника питания и закрыть внешний резистор (рис 1.15, схема слева), то под действием остаточного магнетизма (кулак на рисунке 1.12) в проводниках якоря это некоторые ЭДС EOST, которые вызывают в закрытом тока замыкания. Этот ток течет ( $= 0 F$ ) и тормозной момент не генерируется обмотки возбуждения в противоположном направлении по отношению к исходной размагничивания машины.

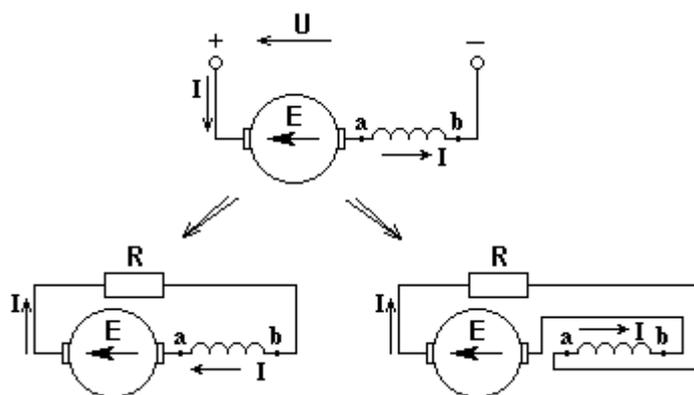


Рисунок 1.15 – К режиму динамического торможения с самовозбуждением

Чтобы получить тормозного момента способствуют выработки электроэнергии, должна осуществляться таким же образом, как и ранее, направление усиления магнитного потока, т.е. создание автоколебаний. Это условие выполняется, если переход к режиму торможения включается обмотка, как показано на рисунке 1.15, который представлял на рисунке справа.

Текущие изменения, вызываемые увеличением знак ЭМК будут направлены в момент против движения, то есть, будет тормозить. Рабочий ток машины является самостоятельной только при определенных условиях, а именно при такой скорости и сопротивления R контура якоря для равенства

$$E = IR, \quad (1.27)$$

Существованию этого равенства отвечает наличие точки пересечения кривых  $E = \varphi(I)$  (при данной скорости) и прямой  $IR = f(I)$  – рисунок 16. Очевидно, что чем больше R, тем при большей скорости произойдет самовозбуждение машины [3].

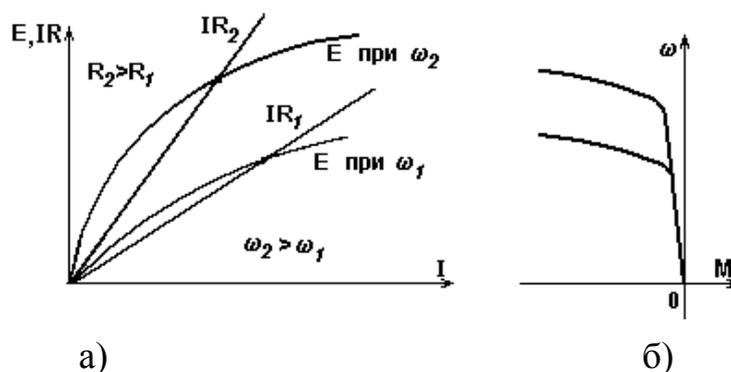


Рисунок 1.16 – Характеристики динамического торможения с

## самовозбуждением

Самая низкая скорость, с которой машина может быть самовозбуждением на  $R_{\text{доб}} = 0$ , то есть, короткое замыкание, когда якорная цепь машины.

Строительство механических свойств в режиме динамического торможения во время самовозбуждения на основе уравнения баланса мощности сделано.

Разработанная двигателя в динамическом режиме торможения власти, полностью рассеивается в сопротивлениях якорной цикла, то есть,

$$\omega = -\frac{I^2 R}{M}. \quad (1.28)$$

Зная  $R$ , и спрашивает, ток, определяются на универсальных свойств в соответствии с действующим момента  $M$ , рассчитанной скоростью, и т.д. типа зависит в режиме торможения с самовозбуждением показано на рисунке 1.16, б.

В двигателях постоянного тока привода иногда используются с двумя смешанными обмотками возбуждения поля, одно из которых, соединенных последовательно с цепью якоря и другой отдельный источник питания. Серия двигателя патоген может не только источником напряжения, о котором шла речь выше, но также подаваться от источника питания. Поскольку магнитный поток постоянен, и сохраненные основные электрические свойства ранее.

### 1.4.2 Двигатели с последовательным возбуждением

Применяют в тех случаях, когда необходимы большой пусковой момент или способность выдерживать кратковременные перегрузки, а также исключена возможность их полной разгрузки. Они оказались незаменимыми в качестве тяговых двигателей на электрическом транспорте (трамваи, троллейбусы, метро и электровозы), а также на подъемных кранах и для пуска двигателей внутреннего сгорания (стартеры) на автомобилях и авиационных двигателях.

## 1.5 Электропривод постоянного тока от источника тока

Тормозной момент, чтобы получить помощь для выработки электроэнергии должна осуществляться таким же образом, как описано выше, направление усиления магнитного потока, то есть генерация автоколебаний. Это условие выполняется, если переход к режиму торможения включается обмотка возбуждения показано на рисунке справа, как показано на рисунке 1.17.

В настоящее время за счет увеличения производства ДПТ признаки изменения будут рассмотрены в настоящее время против движения, т.е. замедляется.

Рабочий ток машины является самостоятельной только при определенных условиях, и на такой скорости, и сопротивление  $R$  цепи якоря на равенство.

Существование этого уравнения из наличия точки пересечения (при заданной скорости) и прямой  $I_g = F(I)$  - рис 16. Очевидно, что чем больше  $R$  выполняется, более высокую скорость, чем самовозбуждения машины  $I_d = \frac{I_2}{0,76}$ ,

$$U_d = \frac{U_2}{0,44}.$$

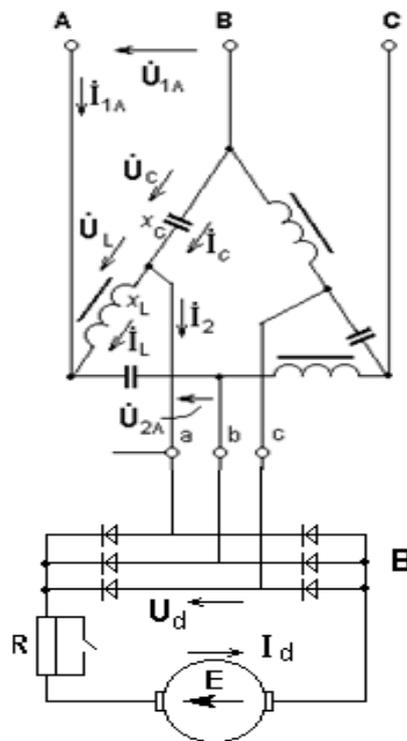


Рисунок 1.17 – Схема индуктивно-емкостного преобразователя с подключением двигателя

Принцип работы основан на явлении напряжения МЭП напряжения цепи LC резонансного контура на основе. Пусть  $U_{1л} = \text{const}$ ,  $f = \text{const}$ ,  $x_L = x_C = x_{р.э}$ , сопротивление реакторов и конденсаторов являются незначительными. В цепь является симметричной, независимо от фазы будет; Токов и напряжений в других фазах имеют одинаковую амплитуду, но не совпадают по фазе. Устройство легко решена, высокую надежность, высокие технико-экономические показатели, немного искажается при использовании трансформатора напряжения выпрямителя не надо договориться о напряжении питания и нагрузки.

Приводы с системой «источник тока – двигатель», практически не известные за рубежом, успешно применяются в отечественной практике в установках, транспортирующих гибкую ленту, полосу, нить, жилу кабеля с поддержанием натяжения при любой скорости (кабельная, текстильная промышленность, металлургия), в специальных лебедках с дозированным усилием, в нагрузочных устройствах испытательных стендов для создания заданных условий нагружения испытуемых двигателей, муфт, трансмиссий и т.п.

## 1.6 Системы подчиненного регулирования с двигателем постоянного тока

В силу достоинств систем подчиненного регулирования они также находят применение в системах регулирования скорости. Функциональная схема такого привода представлена на рисунок 1.18, где обозначено РТ – регулятор тока, ДТ – датчик тока, БО – блок ограничения,  $u_{от}$  – сигнал обратной связи по току.

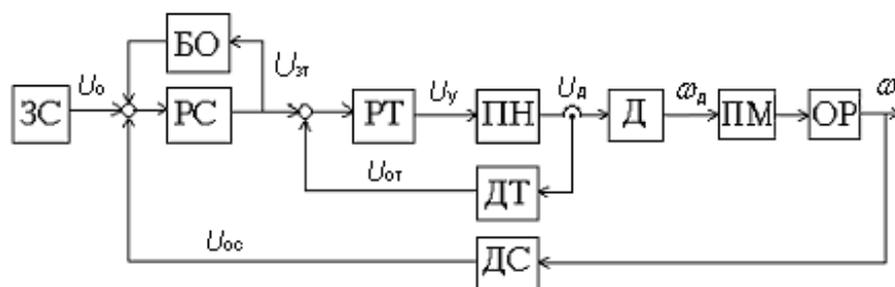


Рисунок 1.18 – Функциональная схема системы регулирования скорости с подчиненно-токовым управлением

Ограничение по току в данной системе осуществляется путем ограничения выходного напряжения регулятора скорости, т.е. ограничением сигнала задания тока  $u_{зт}$  за счет охвата регулятора скорости нелинейной обратной связью (блок БО), как это показано на рисунок 1.18. Структурная схема системы имеет вид рисунок 1.19.

При описании настройки регулятора тока, примем ток якоря непрерывным, и не будем учитывать ограничение тока. Отличие структурной схемы реального привода рисунок 19 от идеализированной схемы, на которой пояснялся принцип подчиненного регулирования, заключается в том, что на вход динамического звена, соответствующего якорной цепи, действует обратная связь по э.д.с. вращения  $e$ . Положив,  $\Delta u_{п} = 0$ ,  $m_c = 0$ , перенесем на структурной схеме рисунок 19 выход контура скорости (точка «а») на выход контура тока (точка «б»).

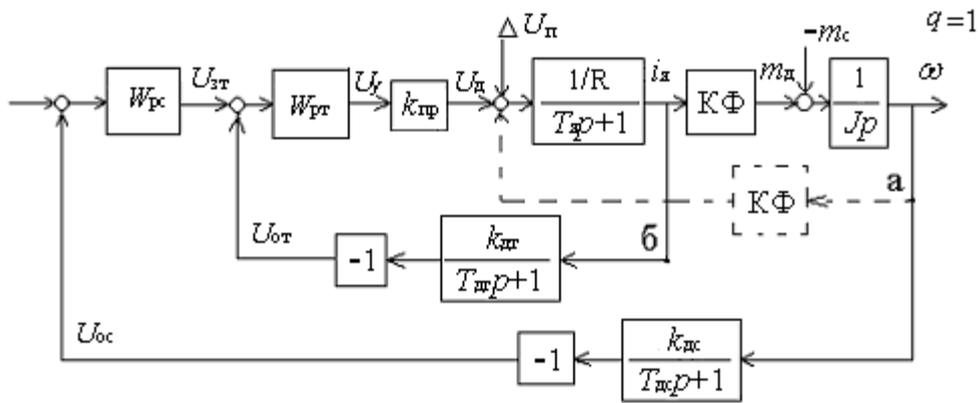


Рисунок 1.19 – Структурная схема системы подчиненного регулирования скорости

Передаточную функцию образовавшегося в контуре тока объекта с прямым каналом, имеющим передаточную функцию  $1/(R_c(T_{я}p + 1))$  и каналом обратной связи  $-(K\Phi)^2/(Jp)$  получим в виде:

$$W_{ia}(p) = \frac{1}{R_c(T_{\beta} \cdot \delta + 1) \left(1 + \frac{(\hat{E}\hat{O})^2}{JR_c p} \times \frac{1}{T_{\beta} \cdot \delta + 1}\right)} = \frac{1}{R_c(T_{\beta} \cdot \delta + 1)} A(p), \quad (1.29)$$

где

$$A(p) = \frac{\dot{O}_i \delta(T_{\beta} \cdot \delta + 1)}{\dot{O}_i \delta(T_{\beta} \cdot \delta + 1) + 1} \quad (1.30)$$

сомножитель, отражающий влияние обратной связи по э.д.с. двигателя.

Передаточная функция разомкнутого токового контура получит вид:

$$W_i(p) = W_{pT}(p) \frac{k_{AT} \cdot k_{i\delta}}{(T_{A\delta} \cdot \delta + 1)(T_{\beta} \cdot \delta + 1)R_c} A(p). \quad (1.31)$$

Если для настройки на оптимум по модулю использовать ПИ-регулятор тока, выбрав:

$$k_{\delta\delta} = \frac{T_{\beta} \cdot R_c}{2 \cdot \dot{O}_{A\delta} \cdot k_{i\delta} \cdot k_{a\delta}}, \quad \tau_{pT} = T_{я}, \quad (1.32)$$

можно записать  $W_i(p) = W_i^{opt}(p) A(p)$ . Здесь

$$W_i^{i\delta}(p) = \frac{1}{2 \cdot \dot{O}_{A\delta} \cdot \delta \cdot (T_{AN} \cdot \delta + 1)} \quad (1.33)$$

Передаточная функция разомкнутого токового контура, настроенного на оптимум по модулю при пренебрежении влиянием обратной связи по э.д.с. двигателя.

Чаще всего такое пренебрежение возможно, так как влияние э.д.с. можно рассматривать как возмущение для контура регулирования тока. Причем скорость изменения э.д.с. определяется электромеханической постоянной двигателя, а быстродействие контура регулирования скорости, как следует из выражения, определяется постоянной времени датчика тока, которая меньше постоянной якорной цепи и, следовательно, много меньше электромеханической постоянной. Таким образом, указанное возмущение по э.д.с. может быть отработано контуром регулирования тока без динамической ошибки, и его влиянием на динамические свойства привода можно пренебречь, приняв  $A(p) = 1$  и считая, что ток якоря определяется напряжением задания тока  $u_{зт}$ , поступающим с выхода регулятора скорости.

Для пояснения настройки регулятора скорости представим передаточную функцию неизменной части контура скорости в виде

$$W_{i\dot{v}}(p) = W_{i\dot{y}}(p) \frac{k_{\dot{A}\dot{v}}}{T_{\dot{A}\dot{v}} \cdot \delta + 1} \frac{K\hat{O}}{J_p}, \quad (1.34)$$

Где передаточную функцию замкнутого контура регулирования тока получим из выражения в соответствии с соотношением:

$$W_{i\dot{y}}(p) = \frac{W_i^{\dot{i}\dot{o}}(\delta) T_{\dot{A}\dot{o}} \cdot p + 1}{W_i^{\dot{i}\dot{o}}(\delta) + 1} \frac{1}{\hat{e}_{\dot{E}\dot{o}}} = \frac{1}{2 \cdot \dot{O}_{\dot{A}\dot{o}}^2 \cdot \delta^2 + 2 \cdot \dot{O}_{\dot{A}\dot{o}} \cdot \delta + 1} \frac{\dot{O}_{\dot{A}\dot{o}} \cdot \delta + 1}{\hat{e}_{\dot{A}\dot{o}}}, \quad (1.35)$$

В соответствии с принципом понижения порядка контура можно записать:

$$W_{i\dot{y}}(p) \approx \frac{1}{\hat{e}_{\dot{A}\dot{o}}} \frac{1}{T_{i\dot{y}} \cdot p + 1}, \quad (1.36)$$

где  $T_{i\dot{y}} = 2T_{дт}$  – эквивалентная постоянная контура тока.

Поскольку в данном случае объект контура скорости является интегрирующим звеном с передаточной функцией,

$$W_{0\omega}(p) = \frac{R_c}{(K\hat{O})^2} \frac{1}{T_m \cdot p}, \quad (1.37)$$

то для настройки на оптимум по модулю следует применять пропорциональный регулятор с передаточным коэффициентом:

$$\hat{e}_{\delta\bar{n}}^{\ddot{\omega}} = \frac{\dot{O}_i}{2 \cdot \dot{O}_{\mu\omega} \frac{R_{\bar{N}}}{(K\hat{O})^2} \frac{\hat{e}_{\bar{A}\bar{N}}}{\hat{E}\hat{O}}}, \quad (1.38)$$

где  $T_{\mu\omega} = T_{дс} + T_{iэ}$  – суммарная малая постоянная времени контура скорости.

При таком значении передаточного коэффициента регулятора в соответствии с рисунка 1.19 статическая ошибка системы по возмущению  $m_c$  определяется соотношением:

$$\Delta\omega = -\Delta m_c \cdot \frac{2 \cdot T_{\mu\omega} R_c}{T_m (K\hat{O})^2}. \quad (1.39)$$

Поскольку величина  $R_c / (K\Phi)^2$  характеризует ошибку разомкнутой системы, т.е. падение скорости двигателя на естественной характеристике, то ясно, что в замкнутой системе ошибка будет тем меньше, чем меньше  $T_{\mu\omega}$  по сравнению с  $T_m$ . Если эта ошибка велика, контур можно настроить на симметричный оптимум, применив ПИ-регулятор скорости с  $\tau_{рс} = 4T_{\mu\omega}$  и значением  $k_{рс}$ , определенным согласно (1.38).

### **Вывод**

Было весьма подробно рассмотрены электроприводы постоянного тока, несмотря на то, что они в последние годы заметно сдали свои позиции.

Вместе с тем, изучение электропривода постоянного тока позволяет лучше понять некоторые общие вопросы: энергетические режимы, регулирование координат, ограничения, накладываемые на координаты и тому подобное. К тому же в современных регулируемых электроприводах переменного тока с векторным управлением стараются приблизить свойства к свойствам электропривода постоянного тока и в этой части его изучение полезно.

Были проанализированы механические характеристики двигателей постоянного тока с различными схемами включения обмоток возбуждения.

Приведены методы регулирования скорости вращения двигателя постоянного тока изменением питающего напряжения, потока возбуждения и сопротивления в якорной цепи.

Определены особенности работы и применения электроприводов постоянного тока от источника тока, построенного на основе RLC цепей и управляемого выпрямителя, то есть на базе индуктивно – емкостного преобразователя.

## **Глава 2 Технология получения базальтовых строительных материалов**

### **2.1 Месторождения базальтовых горных пород в Республике Казахстан**

Развитие современной техники и технологий требует создание материалов, которые имеют малую объемную массу, хорошие прочностные характеристики, способные выдерживать температурные нагрузки, влияние агрессивных сред, а также высокую фильтрующую и поглощательную способности. Одним из видов таких материалов является базальтовое волокно.

В настоящее время большой интерес к мировым непрерывного базальтового волокна (БНВ) из-за ряда факторов:

- БНВ имеют ряд характеристик, которые отличают их от прочности волокна, химическая стойкость и температурах;
- его свойства БНВ занимает промежуточное положение между стеклянными волокнами и углеродных волокон;
- наличие и дешевизна базальта - сырья для производства КБК;
- "Базальтовые непрерывные волокна" подготовки исполнении одностадийной технологии;
- разработка технологии и оборудования для производства КБК в последние годы для обеспечения стоимости промышленного производства ниже уровня производства стекла.

Композиты из базальтовых волокон характеризуются высокой физико-механической и оптимального объема производства. Он определяет высокопроизводительные материалы из BV: высокое качество, долговечность и стабильность при воздействии влияний окружающей среды, высоких температур, агрессивных сред, устойчивость к вибрации, абсолютной негорючесть, то, что отличает эти материалы из стеклянных и минеральных волокон. Кроме того, сырьевая база для производства материалов и изделий из базальта доступна и практически не ограничена. Сочетание этих характеристик и свойств материалов, имеют большое BV (очень широкий) точки зрения применения в различных отраслях промышленности.

На территории Республики Казахстан широко распространены породы магматического происхождения типа базальта, диабаза, и амфиболита. Сравнительно небольшая температура плавления дает возможность использовать эти породы для производства штапельного волокна по упрощенной технологической схеме, исключая приготвление шихты.

Плавка пород происходит без стадии силиката, стеклообразования и осветления.

Балхашская группа объединяет месторождения: Гульшадское, Коунрадское, 8-й километр, Дайка средняя и Шайтантас, Карагандинская

группа: Майкудукское, Тентекское, а также Ставропольские месторождения в Кокчетавской области[2]. Эти месторождения показаны на рисунке 2.1.



Рисунок 2.1 – месторождения базальта в Республике Казахстан

## 2.2 Строительные материалы из базальта и область их применения

Производство строительных материалов:

- строительство конструкционные и облицовочные пластики, армирующая сетка;
- базальт арматура для строительства мостов, шпал тоннелей, метро.
- армирующих материалов: производство асфальтобетонного покрытия улиц, кварталов и пен.
- строительство водного хозяйства - армирующих материалов для строительства плотин, оросительных материалов для сельского хозяйства.
- строительство портовых сооружений, морских платформ - укрепление и строительных материалов базальта.

Хочу утвердить, что базальтовые волокна в отличие от стекловолокна может композиты на основе неорганических связующих, т.е. медленного горения и негорючих материалов. Этот новый класс композиционных материалов. Использование таких материалов важно при строительстве ответственных промышленных объектов с повышенной пожарной безопасностью, атомных электростанций, химических и нефтехимических предприятий, небоскребов, в судостроении, вагоностроение и автомобильной промышленности. Далее, рассмотрим использование базальта в других отраслях:

Машиностроение - теплоизоляция, отопительные трубы.

Авиация – теплозвукоизоляционный полотна, отделанные изоляционные материалы для тепловой и акустической изоляции электродвигателей динамических систем звукоизоляцией выхлопных газов канала.

Судостроение - теплозвукоизоляция техника, строительные материалы; малого судостроения - дизайн корпуса, надстройки.

Вагоны - теплозвукоизоляция автомобили и усиление структурных пластмасс, негорючие композиционные материалы.

Автомобилестроение - тепло и звукоизоляция материал для изготовления автомобильных глушителей, панелей, теплоизоляционных прокладок тепловых, экранов.

Энергия, пластмассы, усиливающий материал для производства тормозных колодок и дисков сцепления, конструкционных пластиков, негорючие композиционные материалы, шнуры для шин и других материалов. Теплоизоляция термического оборудования паровых котлов, турбин. Изоляционные материалы для основных несущих высоковольтных линий. Материалы для ядерной энергетики - негорючий изоляции и строительных материалов, базальт также хорошая защита антирадиактивный. Химическая и нефтехимическая промышленность - производство химически стойких труб, защитных покрытий, негорючих композиционных материалов.

Фильтр по БНВ для очистки отходящих газов от пыли и промышленных стоков.

Электронная промышленность - армирующий материал для изготовления печатных плат, корпусов электронного оборудования. Утилиты - Фильтрующие материалы для водоочистных сооружений. Металлургия - теплоизоляционные изделия для теплоизоляции, систем отопления, теплообменников, трубопроводов, коммуникаций. Фильтр для очистки выхлопных газов от пыли в рудах и металлургических заводов, сточные воды фильтры.

Криогенная техника - изоляционные материалы в производстве сжиженного нефтяного газа, жидкого кислорода, и другие.

### **2.3 Современные оборудования получения базальтовых материалов**

Технология производства базальтового волокна (рис 2.2) по всей внешне сходство отличаться от производства стеклянных волокон, что связано с несколькими факторами:

- базальты химический состав существенно отличается от диска;
- базальтовые расплавы не являются прозрачными для теплового излучения;
- базальты - законченный природного сырья, гомогенизированные по химическому составу;
- в процессе плавления базальтов нет ни одного работает, с варочной стекла.

Эти особенности базальтов определяют специфику технологии производства и технологического оборудования, соответственно, для производства БНВ.

До широкого использования относительной сложности и новизны промышленной технологии производственных ограничено базальтовых волокон.

В настоящее время благодаря последним разработкам специалистов компании на должном уровне отработаны технологии и оборудование для производства БНВ, решены вопросы экономической рентабельности промышленного производства.

Технологии, технологическое оборудование производства БНВ и основные узлы защищены собственными патентами на изобретения.

№ 77861 UA «Способ и устройство для производства волокон из базальтовых пород».

№ 12855 UA и 86186 UA «Щелевой фильерный питатель для производства волокон из расплавов базальтовых пород».

№ CN 16721 «Способ и устройство для производства непрерывных волокон из базальтовых пород», КНР.

Применение этих новых технологий и оборудования позволяет существенно снизить потребление энергоносителей на производство продукции (природного газа в 3 – 4 раза, электроэнергии в 7 раз), повысить производительность фильерного питателя в 2 раза.

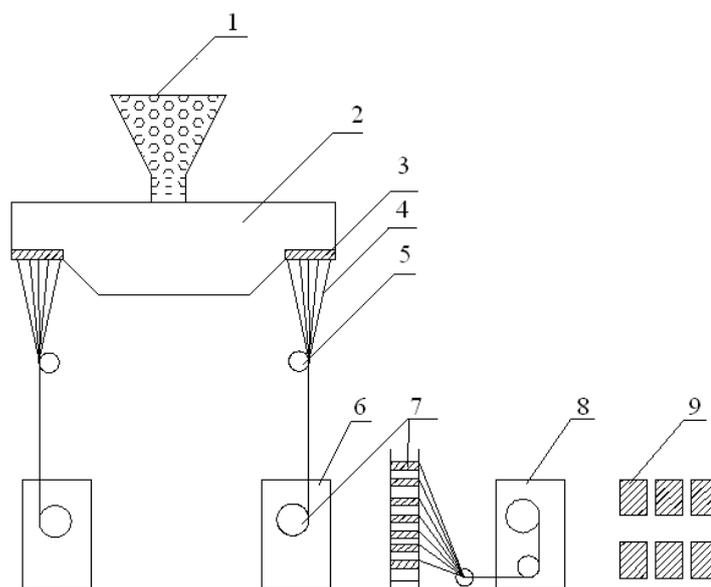


Рисунок 2.2 – Технологическая схема получения базальтовых нитей

Базальтовая порода измельчается до фракции 5 – 20 мм. Измельченный базальт через специальные загрузчики (1) подается в камнеплавильную печь (2). В печи при высоких температурах 1400 – 1600 °С происходит плавление базальта. Базальт превращается в расплав. Далее, расплав поступает в фильер

печи и проходит через множество отверстий фильерного питателя (3), который изготавливается из платинового сплава. С фильерного питателя элементарные базальтовые волокна (4) поступают на устройство нанесения замасливателя (5). Наматывающая машина (6) осуществляет намотку непрерывных волокон на бобины (7). Первичная нить с бобин (7) тростильной машиной (8) перематывается в бухты ровинга (9).

Преимущества технологий БНВ:

– Технологии производства БНВ являются энергосберегающими. Для производства БНВ использует один компонент, полученный от природы, экологически чистого сырья - базальта;

– базальтовые затраты на сырье является очень низким, а затраты на производство БНВ менее 5-7%;

– Технология этап - первичной переработки, расплавленный базальт и гомогенизируют природа проводятся;

– Базальт нагревается только один раз, что позволяет для восстановления целевого продукта - БФК.

Дальнейшая обработка БНВ в материалах, которые не связаны с потреблением энергии и сделан с "холодных технологий".

Исторические сведения о технологии производства КБК

Первые исследования базальтовых волокон производственных мощностей была начата в начале 60-х, то мы получим первые образцы НБВ. Затем последовали длительных исследований технологий производства, свойства базальтовых волокон и материалов на их основе. Промышленные технологии и оборудование для производства СВФ встретили в середине 80-х годов. До конца 90-х не было построено заводов. Тем не менее, эти технологии являются энергоемкими, и оборудование является довольно сложным и дорогим. Но поскольку базальтового волокна производства, особенно для нужд военной промышленности, стоимость не особенно думал. В 2000 году мы разработали новые технологии и производственные системы для производства КБК. Эти события дали толчок к развитию промышленного производства базальтовых волокон и позволили рыночный потенциал их применения значительно расширить.

На основе новых технологий в 2000 - 2002 он был перестроен для производства КБК компаний. Продукция компании по производству ВСФ материалов для автомобильной промышленности.

Опытные и промышленные установки для производства КБК были построены и запущен в Китае.

Применение более совершенных разработок позволило значительно уменьшить расходы энергоносителей и соответственно снизить себестоимость производства БНВ.

Себестоимость производства БНВ стала близкой к себестоимости производства стекловолокна. Запуск установок прошел успешно, было получено БНВ с применением базальтов Китая. Работы проводились в рамках

государственной программы Китая № 863 «Базальтовые непрерывные волокна и композиционные материалы на их основе».

В Китае на основе новых технологий и модульного оборудования, разработанных Осносом С.П., были организованы производства БНВ в Чанду компания «Chengdu Aerospace Tuoxim Science & Technology Co.,LTD», в Шанхае компания «Shanghai Russia Gold Basalt Fiber».

Компания «Chengdu Aerospace Tuoxim Science & Technology Co., LTD». В настоящее время компания производит 1800 – 2000 БНВ тонн в год. Шанхайская компания «Shanghai Russia Gold Basalt Fiber» производит 2000 тонн в год.

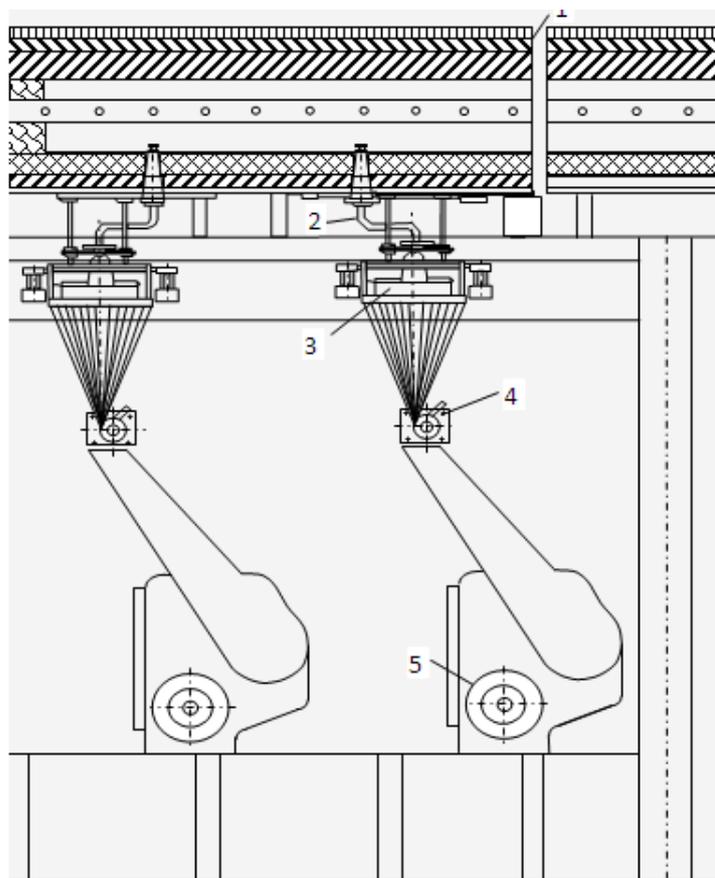
В России на основе технологической линии ТЕ ВСF 2000 организовано производство БНВ компания НПО «Вулкан». Проектная производительность завода в городе Оса Пермского края 1800 – 2000 тонн БНВ в год.

На основе технологий и модульного оборудования для производства БНВ с 2000 года специалистами компании организовано производство БНВ на семи заводах в Украине, Китае и России.

Компания проводит работы по развитию технологий и технологического оборудования производства БНВ. Работы направлены прежде всего на увеличение производительности оборудования, снижения потребления энергоносителей (природного газа, электроэнергии), по использованию вторичных энергоресурсов для плавления базальтов: попутного нефтяного газа (который в настоящее время в основном сжигается на нефтепромыслах), коксового газа (выделяемого при производстве кокса). Это позволяет существенно снизить себестоимость промышленного производства БНВ.

Компания является безусловным мировым лидером в этих вопросах. Разработки компании за последние годы позволили в 1.6 – 1.8 раза увеличить производительность фильерных питателей, снизить потребление газа в 3 раза и электроэнергии в 5 раз на производство 1 тонны БНВ.

Компания проводит работы по совершенствованию технологий производства БНВ направленные на повышение характеристик непрерывных волокон по прочности, эластичности, термической и химической стойкости волокон, которая показана на рисунке 2.3.



1 – фидер; 2 – струйный питатель; 3 – фильерный сосуд; 4 – нитесборник и замасливающее устройство; 5 – механизм вытяжки и намотки  
 Рисунок 2.3 – Схема получения непрерывного

Влияние температуры фильерного поля на обрывность элементарных волокон представлены на рисунке 2.4. Как видно из рисунка 2.5, оптимальный температурный интервал выработки базальтового непрерывного волокна, при котором наблюдается минимальная обрывность, составляет 1210-1230°C.

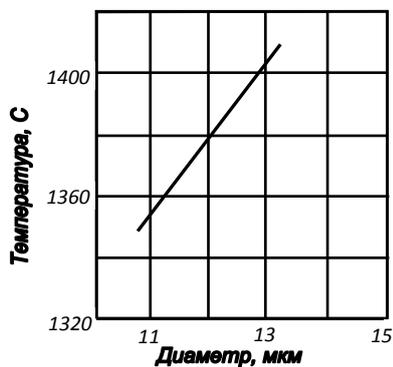


Рисунок 2.4 – Зависимость диаметра волокна от температуры фильерного поля

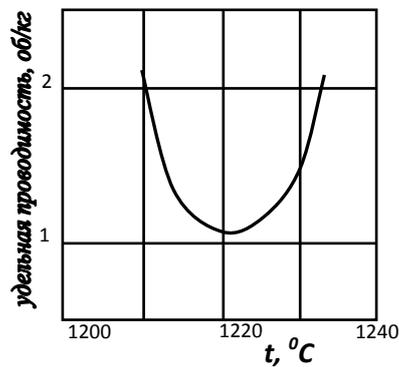


Рисунок 2.5– Влияние температуры фильерного поля на обрывность волокон

Получение волокна имеет следующий химический состав и массу %: SiO<sub>2</sub> – 50.6; TiO<sub>2</sub> – 0.7; M<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 16.2; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + FeO – 14.5; CaO – 9.6; MgO – 5.2; R<sub>2</sub>O – 3.0.

Зависимости прочности волокон на разрыв от их диаметров с увеличением диаметра показаны в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Зависимость прочности на разрыв базальтовых волокон от диаметра

Диаметр, мкм	Прочность, кгс/мм	Изменение прочности, %
13,0	202	0
14,0	185	-8
16,5	166	-18
20,6	148	-27

Для предварительного исследования выработки непрерывного волокна из диабазовых порфиритов Центрального Казахстана, была сконструирована и изготовлена установка для получения непрерывного волокна (рисунок 2.6). [1]

Лабораторная установка состояла из плавильного сосуда и наматывающего устройства. Плавильный сосуд, футерованный шамотным кирпичом, нагревался при помощи газовых горелок, вделанных в медное кольцо с 20 отверстиями. Горящей смесью служил бутан-пропан-кислород. Емкость сосуда с десятью фильерами составляла 50 см<sup>3</sup>.

Диаметры фильер были различными и составляли: 1,3; 1,6; 1,7 и 2,1 мм. Длина фильера составляла 2,5-3 мм.

Наматывающее устройство состояло из электродвигателя, барабана, реостата и металлического корпуса.

Скорость вращения барабана регулировалось реостатом.

Измельченный до крупности 0,2 мм исследуемый материал загружался в платиновый сосуд и расплавлялся. Температура расплава определялась оптическим пирометром и соответствовала 1260-12700С.

Под действием гидростатического давления расплавленная масса вытекала через фильтры, оттягивалась и наматывалась на вращающийся барабан.

На лабораторной установке было получено непрерывное волокно из диабазовых порфиритов Ставропольского месторождения различных диаметров.

В лабораторных условиях изучены технологические факторы, влияющие на прочность элементарного волокна, влияние уровня стекломассы на выработку непрерывного волокна, прочности и диаметра фильтр, а также диаметра волокна от диаметра фильтр.

Предварительно перед испытанием измерялся диаметр элементарного волокна на оптическом микроскопе. Испытания проводились при расстоянии между зажимами 30 мм. На приборе Шоппера было произведено определение

разрывной нагрузки на 50 образцах. Вычисление среднеквадратических отклонений производилось по формуле:

$$G = \pm \sqrt{\frac{\sum x^2}{n-1}}, \quad (2.1)$$

$$\gamma = \pm \frac{G}{P} \cdot 100\%, \quad (2.2)$$

где  $G$  - среднеквадратическое отклонение;

$\sum x^2$  - сумма квадратов отклонений;

$n$  - число измерений;

$\gamma$  - коэффициент вариаций;

$P$  - среднеарифметическая прочность.

На основе проведенных экспериментов установлено, что диаметр элементарного волокна зависит от скорости его вытяжки.

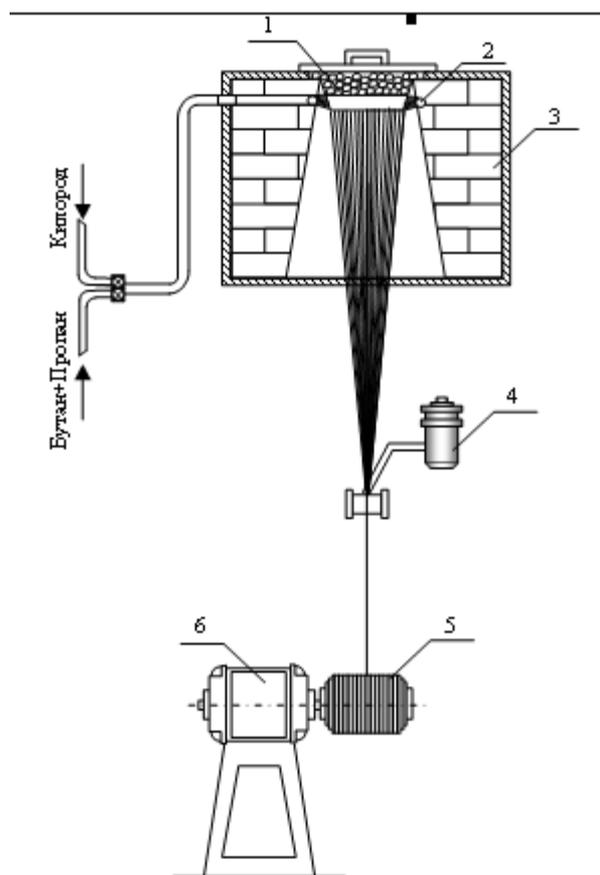
Ранее широкое применение базальтовых волокон сдерживалось относительной сложностью и новизной промышленных технологий их производства. В настоящее время благодаря последним разработкам специалистов компании на должном уровне отработаны технологии и оборудование для производства БНВ, решены вопросы экономической рентабельности промышленного производства.

Хочется еще раз подчеркнуть, что базальтовые волокна в отличие от стекловолокна позволяют производить композиционные материалы на основе неорганических связующих, т.е. материалов трудногорючих и негорючих. Это новый класс композиционных материалов. Применение именно таких материалов важно при строительстве ответственных промышленных объектов с повышенной пожарной безопасностью, атомных электростанций, химических и нефтехимических производств, высотных зданий, в судостроении, вагоностроении и автомобильной промышленности.

Результаты проведенных экспериментов сведены в таблицу 2.2.

Таблица 2.2 - Зависимость диаметра волокна от скорости вытяжки

Скорость вытяжки волокна, об/мин	Диаметр волокна, Микрон	Прочность элементарного волокна при растяжении, кг/мм <sup>2</sup>
1000	12,0	220
1600	10,2	270
2100	9,0	295
3000	7,5	315



1- платиновая чашечка; 2-медное кольцо горелки; 3-футеровка печи;  
4- замасливающее устройство;5- наматывающий барабан;6- электродвигатель  
Рисунок 2.6 – Технологическая схема получения базальтовых нитей

Из таблицы 2.2 видно, что скорость вытяжки волокна влияет на его диаметр.

Измерения прочности элементарного волокна на разрыв показали, что прочность волокна из стекол диабазовых порфиров при увеличении скорости вытягивания растет, как и для случая стеклянных волокон.

При определении влияния температуры выработки волокна на его свойства (прочность при растяжении) проведены эксперименты по выработке непрерывного стеклянного волокна на лабораторной однофильной установке при температурах, находящихся в интервале температур выработки волокна – 1260, 1280 и 1300С.

Эксперименты проводились на однофильном сосуде с  $d\phi=1,7$  мм, уровне стекломассы  $h=45$  мм.

Соответственно измерения прочности элементарного волокна на разрыв показали, что прочность волокна из стекол диабазовых порфиров при увеличении скорости вытягивания растет, как и для случая стеклянных волокон. При определении влияния температуры выработки волокна на его свойства, который были введены результаты исследований таблицу 2.3.

Таблица 2.3- Результаты исследований

Скорость вытяжки волокна, об/мин	Диаметр волокна, Микрон	Прочность элементарного волокна при растяжении, кг/мм <sup>2</sup>
	Режим T=12600C	
1000	11,0	170
1450	10,0	200,0
1700	9,5	240
2200	8,0	285
3000	7,5	295
	Режим T=12800C	
1000	13,0	150
1450	11,0	180
1700	9,0	240
2200	8,1	290
3000	7,2	310
	Режим T=13000C	
1100	12,0	160
1400	11,8	190
1700	10,8	230
2500	9,5	280
3000	-	-

Влияние температуры стекломассы на прочность при растяжении получены при изучении 100 образцов.

Из приведенных в таблице 2.3 данных можно предположить, что существенного влияния на прочность волокна температура выработки не оказывает, однако наибольшая прочность имеет место при 1280<sup>0</sup>C, скорости выработки 3000 м/мин и соответствует 310 кг/мм<sup>2</sup>.

Зависимость изменения диаметра волокна от диаметра фильер на однофильном сосуде с диаметром фильер 1,3; 1,6; 1,7 и 2,1 мм при различных скоростях вытягивания и уровне стекломассы в сосуде h=45 мм.

Скорость вытяжки замерялась тахометром и регулировалась скорость вращения через реостат.

Полученные результаты сведены в таблицу 2.4.

Таблица 2.4 – итоговые результаты

Скорость вытяжки, об/мин	Диаметры волокна в микронах при диаметре фильер, мм			
	2,1	1,7	1,6	1,3
1100	19,0	12,0	10,0	8,0
2000	14,0	8,5	8,0	-
3100	11,0	8,0	7,5	-

## **Вывод**

В данной главе были исследованы месторождения базальтовых руд в Республике Казахстан с определением прочностных характеристик по выдержке температурных нагрузок, с химическим составом.

Развитие современной техники и технологий требует создание материалов, которые имеют малую объемную массу, хорошие прочностные характеристики, способные выдерживать температурные нагрузки, влияние агрессивных сред, а также высокую фильтрующую и поглощательную способности. Одним из видов таких материалов является базальтовое волокно.

Анализируются особенности технологии получения базальтовых материалов и перспективы использования базальтовых руд в качестве инновационных строительных материалов.

Экспериментально установлено, что диаметр базальтовых нить зависит от скорости вытяжки связи с этим возникла необходимость в разработке регулируемых электроприводов постоянного тока на базе системы «источник тока – двигатель».

Производство базальтовых нить и других строительных материалов из базальтовых руд отвечает экологическим требованиям и является перспективным инновационным направлением в строительной промышленности.

## **Глава 3 Разработка и моделирование электропривода бобин для получения базальтовых нить**

### **3.1 Технология получения базальтовых нить**

Для производства минеральной ваты, есть целый ряд технологий. Например, метод нагрева и плавления различных пород электромагнитного поля с частотой в несколько мегагерц в "холодной" тигля позволяет остановки и перезапуска процесса без ущерба для тигля и значительной потери времени. Потребление энергии является относительно низким - менее 10 МДж на килограмм расплава. Применение тигля можно использовать для минеральной базальтовой ваты.

Вторичные волокна вспенивающие образованные прохождения расплава через фильеру, продукты сгорания газового потока - базальтового волокна могут быть получены струи холодного воздуха с использованием специальных насадок, либо путем так называемого процесса дуплексной известными способами, как выдувание из расплава.

Процедура получения базальтовых волокон. Тонкие и толстые нити пород находится слой хаотически расположенных волокон имеют диаметр 9-25 мм и 5-30 стека см длиной, от сил природы взаимосвязанную сцепление.

Штапельные волокна каменной (базальтовой) производится по вертикальной расплава дует воздуха струи (ВРВ) и изготовлен в виде картин проводных коврики.

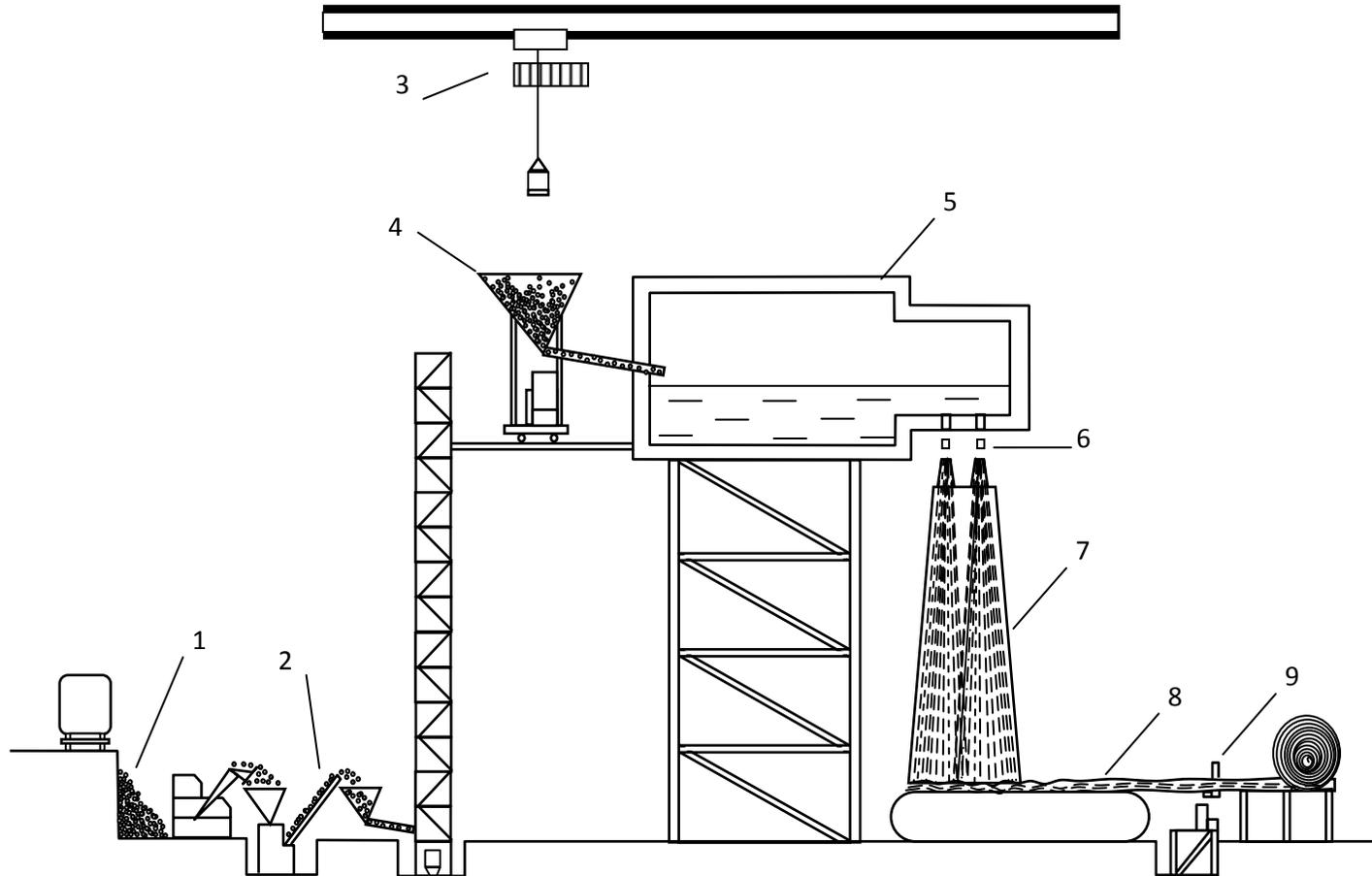
Технологическая схема получения тонких и утолщение базальтового волокна показано на рисунке 3.1.

Первоначальные исследования производства базальтовых волокон мощностью началось в начале 60-х, то мы получим первые образцы БНВ. Затем последовали длительных исследований технологий производства, свойства базальтовых волокон и материалов на их основе.

Технология отрасли и оборудование для производства БНВ встретили в середине 80-х годов. До конца 90-х не было построено заводов. Тем не менее, эти технологии являются энергоемкими, и оборудование является довольно сложным и дорогим. Но поскольку базальтового волокна производства, особенно для нужд военной промышленности, стоимость не особенно думал.

В 2000 году были разработаны новые технологии и технологическое оборудование для производства БНВ. Эти разработки дали импульс в развитии промышленного производства базальтовых волокон и позволили существенно расширить потенциальный рынок их применения.

На основе новых технологий в 2000 – 2002 году было построено предприятие по производству БНВ. Продукция предприятия используется для производства материалов БНВ для автомобильной промышленности.



1 – склад сырья; 2 – дробильное отделение; 3 – электротельфер; 4 – загрузчик; 5 – плавильная печь;  
 6 – узел раздува; 7 – камера волокноосаждения; 8 – приемный конвейер; 9 – прошивочная машина

Рисунок 3.1 – Технологическая схема производства тонких и утолщенных штапельных волокон из горных пород

Технологический процесс получения холста ВВ включает основные стадии:

- а) подготовка сырья и подача ее в печь;
- б) плавление горной породы в печи и получение его однородного расплава;
- в) формирование струи расплава в фильерном сосуде;
- г) вытягивание струи расплава в волокна воздушным потоком;
- д) формирование и пропитка холста связующим;
- е) сушка и отвержение связующего;
- ж) резка материала на полосы заданной ширины и намотка в рулон.

Установка для получения непрерывного волокна из горных пород состоит из следующих основных узлов и механизмов:

- а) ванной плавильной печи с фидерами;
- б) узлов формирования волокон;
- в) механизмов вытяжки намотки;
- г) узла приготовления и подачи замазливателя.

Для переработки первичной нити с бобин в бухты жгута используются жгутовые шины, при переработке в крученую нить – крутильное оборудование.

Одним из важнейших показателей непрерывного волокна является диаметр, уменьшение которого повышает эластичность, а, следовательно, позволяет осуществлять текстильную переработку. В связи с этим исследовалось влияние некоторых технологических параметров (температура фильерного поля и скорость вытягивания) на диаметр волокон. Как видно из рис.4 с повышением температуры фильерного поля диаметр увеличивается. С увеличением скорости вытягивания от 3000 до 4800 об/мин диаметр волокна уменьшается от 15 до 9 мкм.

Важным фактором, определяющим устойчивость производства непрерывного волокна, является обрывность элементарных волокон. На обрывность волокна в зоне формирования влияет температура выработки, которая должна соответствовать определенной вязкости а так же и равномерность распределения температур по длине фильерных пластин, однородность сырья по химическому составу и др.

Влияние температуры фильерного поля на обрывность определялось в интервале температур 1200-1240°C через каждые 10°C при температуре струйного питателя 1230°C.

### **3.2 Разработка электропривода бобин для намотки базальтовых нить на базе системы «источник тока - двигатель»**

В качестве исполнительного механизма для вращения намотки базальтовых нить применяют двигатель постоянного тока серии 4П080А2 УХЛ4 с независимым возбуждением, мощность которого составляет  $P=0,75$  кВт и

номинальный ток  $I_{я}=4,9$  А, а скорость вращения находится в пределах от 0 до 4000 об/мин(номинальная скорость вращения 3000об/мин).

Исходя из номинального тока рассчитываем силовые элементы трехфазного управляемого выпрямителя, который показан на рисунке 3.2.

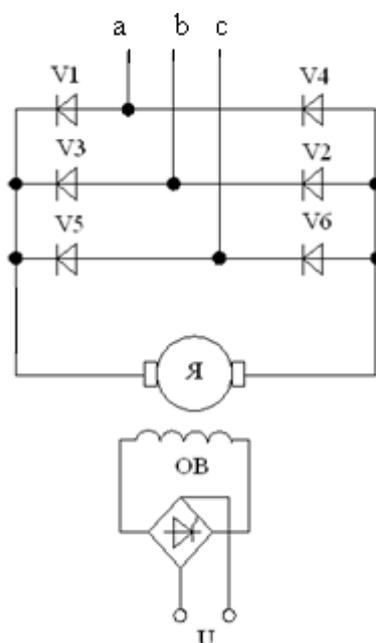


Рисунок 3.2 – Схема подключение двигателя

3.2.1 Расчет силовых элементов трехфазного управляемого выпрямителя  
Значение обратного напряжения и среднего значения тока через выпрямитель рассчитываем по формуле:

Среднее значение тока тиристора:

$$I_{\text{ср}} = \frac{I_{\text{н}}}{3} = \frac{4,9}{3} = 1,63 \text{ А},$$

где  $I_{\text{ср}}=I_{\text{н}}=4,9$ А.

Максимальное обратное напряжение  $U_{\text{обр.мах}}$  на тиристоре:

$$U_{\text{обр.мах}} = U_m = 1,05 \cdot U_{\text{н}} = 1,05 \cdot 361 = 380 \text{ В}$$

$$U_{\text{н}} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} U = 1,35 \cdot U = \frac{3 \cdot U_m}{\pi} = 0,95 \cdot U_m = 0,95 \cdot 380 = 361 \text{ В}$$

$$U_{\text{обр.мах}} = 1,05 \cdot U_{\text{н}} = 1,05 \cdot 361 = 380 \text{ В}$$

Таким образом выбираем тиристор 4 класса с номинальным током  $I_{\text{T}} > I_{\text{н}}$   
 $I=5$ А: КУ202М или КУ202Н.

При расчете источника тока учитываем максимальный ток через тиристоры, который показан на рисунке 3.3.

При этом трехфазная цепь с индуктивностями и емкостями включена в треугольник.

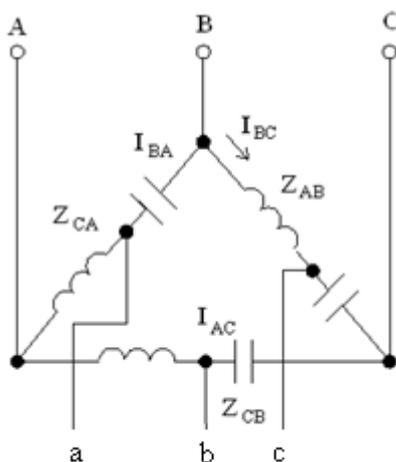


Рисунок 3.3 – Схема индуктивно-емкостного преобразователя

Напряжение  $U=U_{\text{л}}=380$  В.

Токи: 
$$\dot{I}_A = \dot{I}_{AB} - \dot{I}_{CA}; \quad (3.1)$$

$$\dot{I}_B = \dot{I}_{BC} - \dot{I}_{AB}; \quad (3.2)$$

$$\dot{I}_C = \dot{I}_{CA} - \dot{I}_{BC}; \quad (3.3)$$

$$I_{CA} = I_{AB} = I_{BC} = 5 \text{ A};$$

$$Z_{CA} = Z_{AB} = Z_{BC} = \frac{U_{\dot{E}}}{I_{\dot{O}}} = \frac{380}{5} = 72 \hat{\Omega} .$$

Из условия резонанса  $X_L=X_C$  определяем емкость и индуктивность источника тока

$$Z_{CA} = Z_{AB} = Z_{BC} = \sqrt{(X_L - \tilde{O}_C)^2} = 72 \hat{\Omega} ;$$

$$X_{\tilde{N}} = \frac{1}{\omega \cdot \tilde{N}}; \quad (3.4)$$

$$X_L = \omega \cdot L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L; \quad (3.5)$$

$$X_{\tilde{N}} = \frac{1}{\omega \cdot \tilde{N}} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot \tilde{N}} = 36 ;$$

$$\text{Отсюда } C = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 36} = 88,5 \text{ } \hat{i} \hat{O} ;$$

$$X_L = \omega \cdot L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L = 36 ;$$

$$L = \frac{36}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,115 \text{ } \tilde{A} \hat{i}.$$

### 3.3 Математическая модель электропривода бобин для намотки базальтовых нить на базе двигателя постоянного тока по системе «источник тока – двигатель»

Возможность регулирования скорости путем воздействия на поток двигателя используется в электроприводах по системе ИТ-Д, замкнутых по цепи возбуждения двигателя отрицательной обратной связью по скорости. В связи с этим способ регулирования скорости изменением магнитного потока имеет важное значение, и его особенности заслуживают самостоятельного рассмотрения.

Уравнения статических электромеханической и механической характеристик для анализа влияния изменений потока двигателя удобно записать в виде:

$$I_{\beta} = I_{\hat{E}\hat{C}} - \frac{\hat{e}\hat{O}_{\hat{A}}}{R_{f\Sigma}} \omega; \tag{3.6}$$

$$\dot{I} = \dot{I}_{\hat{E}\hat{C}} - \beta_f \omega = \beta_f (\omega_{0\hat{E}} - \omega), \tag{3.7}$$

где  $I_{кз} = U_{НОМ} / R_{яС}$  - ток короткого замыкания якорной цепи при номинальном напряжении;

$M_{кз} = k\Phi I_{кз}$  - момент короткого замыкания;

$\omega_{0и} = U_{НОМ} / k\Phi$  - скорость идеального холостого хода искусственной характеристики, соответствующей различным значениям потока;

$b_{и} = k^2 \Phi^2 / R_{яС}$  - модуль статической жесткости, соответствующий различным значениям потока при  $R_{доб} = 0$ .

Небольшая мощность цепи возбуждения определяет относительно небольшие габариты, массу и стоимость регулировочного реостата  $R_{доб}$ , что позволяет получить достаточно высокую плавность регулирования. Простота,

экономичность данного способа регулирования и благоприятные регулировочные характеристики определяют его широкое использование на практике. Рассмотрим, как влияет ослабление поля на динамические характеристики привода. Динамическая жесткость механической характеристики при ослаблении поля выражается соотношением:

$$\beta_{\text{дв}}(\delta) = \frac{\beta_E}{\delta + 1}. \quad (3.8)$$

Амплитудно-частотные характеристики динамической жесткости  $|b_{\text{дин}}| = f(W)$  во всем диапазоне частот имеют модуль жесткости, снижающийся при ослаблении поля, а ФЧХ при этом не изменяется. Передаточная функция двигателя имеет вид:

$$W = \frac{\omega(p)}{\omega_0(p)} = \frac{1}{T_{MN} p (T_H p + 1) + 1}, \quad (3.9)$$

Рассматривая (3.4), можно установить, что при ослаблении поля двигателя вследствие увеличения электромеханической постоянной  $T_{м.и}$  соотношение постоянных времени изменяется в сторону снижения показателя колебательности и увеличения коэффициента демпфирования переходных процессов. При большом моменте инерции механизма и значительном ослаблении поля электромагнитные переходные процессы могут протекать замедленно.

Для механизмов, момент нагрузки которых при регулировании скорости изменяется так, что мощность остается примерно постоянной, ослабление поля двигателя постоянного тока с независимым возбуждением является лучшим способом регулирования скорости. Именно этим объясняется разработка специальных серий двигателей, рассчитанных на глубокое ослабление поля. На основе их применения реализуются наиболее простые системы регулирования скорости в сравнительно широком диапазоне (до  $D=8$ ), в которых для управления пуском двигателя используется ступенчатое реостатное регулирование пускового тока и момента двигателя. При этом, если по технологическим условиям требуется более высокая стабильность заданной скорости электропривода, чем обеспечиваемая жесткостью  $\beta_{и}$  в разомкнутой системе, для увеличения точности регулирования могут использоваться системы автоматической стабилизации скорости, замкнутые отрицательной обратной связью по скорости, воздействующей на напряжение возбуждения двигателя.

Для осуществления автоматического регулирования по отклонению необходимо осуществить питание обмотки возбуждения двигателя от усилителя мощности, например от тиристорного возбудителя. Уравнения, описывающие работу этой схемы, если полагать характеристику

намагничивания двигателя линейной и однозначной и пренебречь влиянием вихревых токов в стали магнитопровода, имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} u_y &= \frac{1}{k_{TB}} (1 + T_{TB} p) u_B; \\ u_B &= \frac{R_B}{k_{\hat{\phi}}} (1 + T_B p) \hat{\phi}; \\ u_{\beta} &= \hat{e} \hat{\phi} \omega + R_{\beta\Sigma} (1 + T_{\beta} p) i_{\beta}; \\ \hat{e} \hat{\phi} i_{\beta} - M_c &= J_{\Sigma} p \omega. \end{aligned} \right\} \quad (3.10)$$

Вследствие того что регулирование осуществляется изменением потока двигателя, система (3.5) является нелинейной. Для решения задачи оптимизации данной схемы регулирования скорости методом последовательной коррекции необходимо ее линеаризовать. Полагая индуктивность  $L_{\beta}$  пренебрежимо малой и принимая  $M_c=0$  при  $U_{\beta}=U_{ном}=\text{const}$ , получаем

$$\left. \begin{aligned} \Delta u_y &= \frac{1}{k_{TB}} (1 + T_{TB} p) \Delta u_B; \\ \Delta u_B &= \frac{R_B}{k_{\hat{\phi}}} (1 + T_B p) \Delta \hat{\phi}; \\ \Delta \hat{\phi} &= -\frac{\hat{\phi}^0}{\omega^0} (1 + \hat{\phi}_{iE}^0 \delta) \Delta \omega, \end{aligned} \right\} \quad (3.11)$$

где  $\Delta u_y$ ,  $\Delta u_B$ ,  $\Delta \hat{\phi}$  и  $\Delta \omega$  - малые отклонения переменных от точки статического равновесия, определяемой значениями соответственно  $U_y^{\circ}$ ,  $U_B^{\circ}$ ,  $\hat{\phi}^{\circ}$  и  $\omega^{\circ}$ ;

$\Gamma_{ми}^{\circ} = J_{\Sigma} R_{\beta\Sigma} / k^2 \hat{\phi}^{02}$  - электромеханическая постоянная двигателя при  $\Phi = \hat{\phi}^{\circ}$ .

Структурная схема рассматриваемого объекта регулирования скорости с включенным на вход регулятором скорости. При практической реализации схемы необходимо учитывать, что в соответствии с (3.6)  $\Delta \hat{\phi}$  и  $\Delta \omega$  имеют противоположные знаки. С этой целью на вход регулятора скорости можно подать постоянное напряжение  $U^{\circ}_c$ , задающее номинальную скорость, и вычесть из него значение  $\Delta U_{3c}$ . Передаточная функция объекта, если принять  $T_m = T_{TB}$ , имеет вид:

$$W_{iD\tilde{N}} = \frac{\hat{e}_{\hat{\phi}} \omega^0 \hat{e}_{\hat{\phi}} / R_B}{\hat{\phi}^0 (\hat{\phi}_{\hat{A}}^0 \delta + 1) (\hat{\phi}_{iE}^0 \delta + 1) (\hat{\phi}_{\mu}^0 \delta + 1)}. \quad (3.12)$$

Для настройки на технический оптимум необходимо получить оптимальную передаточную функцию разомкнутого контура в виде:

$$W_{D\dot{A}C\dot{N}} = \frac{1/\hat{e}_{\dot{m}\dot{m}}}{2\dot{O}_{\mu}\dot{\delta}(\dot{O}_{\mu}\dot{\delta}+1)}. \quad (3.13)$$

Разделив (3.7) на (3.8), определим передаточную функцию регулятора скорости:

$$W_{D\dot{N}} = \frac{(\dot{O}_{\dot{A}}\dot{\delta}+1)(\dot{O}^0_{\dot{i}\dot{E}}\dot{\delta}+1)}{(\hat{e}_{\dot{m}\dot{m}}\hat{e}_{\dot{O}\dot{A}}\hat{e}_{\dot{O}}\omega^0/R_{\dot{A}}\dot{O}^0)2\dot{O}_{\mu}\dot{\delta}} = \frac{(\dot{O}_{\dot{A}}\dot{\delta}+1)(\dot{O}^0_{\dot{i}\dot{E}}\dot{\delta}+1)}{\dot{O}_{\dot{E}}\dot{\delta}} \quad (3.14)$$

Таким образом, для одноконтурной системы регулирования скорости и в данном случае необходим ПИД-регулятор. Благодаря наличию интегральной составляющей в (3.9) система обеспечивает астатическое регулирование скорости как по управляющему, так и по возмущающему воздействиям, а динамическая точность и быстродействие определяются значением  $2T_m$ . При этом неучтенная выше малая постоянная  $T_{\dot{A}}$  может быть учтена увеличением суммарной некомпенсированной постоянной контура  $\mathbf{T}_m = \mathbf{T}_{TB} + \mathbf{T}_{\dot{A}}$ .

При использовании нерегулируемого индуктивно-емкостного преобразователя схеме электропривода (рисунке 3.2) соответствует следующая система дифференциальных уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \hat{e}_{\dot{O}\dot{A}} &= (\dot{y}_{\dot{N}} - \hat{e}_{\dot{m}\dot{m}}\omega) = (1 + T_{TB}p)u_B; \\ \frac{u_B \hat{e}_{\dot{O}}}{R_{\dot{A}}} &= (1 + T_B p)\hat{O}; \\ kI_{\dot{m}\dot{m}} \hat{O} - \dot{I}_{\dot{N}} &= J_{\Sigma} p\omega. \end{aligned} \right\} \quad (3.15)$$

Уравнениям (3.10) соответствует структурная схема, приведенная на рисунке 3.3. С помощью (3.10), полагая  $T_{TB} \gg 0$ , получаем уравнение динамической механической характеристики:

$$\omega = \frac{U_{\dot{m}\dot{m}}}{\hat{e}_{\dot{m}\dot{m}}} - \frac{R_B(1 + \dot{O}_{\dot{A}}\dot{\delta})}{\hat{e}_{\dot{m}\dot{m}}\hat{e}_{\dot{O}\dot{A}}\hat{e}_{\dot{O}}I_{\dot{m}\dot{m}}} \dot{I}. \quad (3.16)$$

Отсюда динамическая жесткость механической характеристики определяется соотношением:

$$\beta_{\dot{A}\dot{E}\dot{i}\dot{m}\dot{m}} = -\frac{\hat{e}_{\dot{m}\dot{m}}\hat{e}_{\dot{O}\dot{A}}\hat{e}_{\dot{O}}I_{\dot{m}\dot{m}}}{R_B(1 + \dot{O}_{\dot{A}}\dot{\delta})} = -\frac{\beta_{\dot{C}\dot{A}\dot{i}}}{1 + \dot{O}_{\dot{A}}\dot{\delta}}. \quad (3.17)$$

Таким образом, при безынерционном преобразователе электропривод по схеме рисунка 3.4 обладает механической характеристикой, аналогичной характеристике двигателя с независимым возбуждением при  $U_{я} = \text{const}$ , однако отличается значительно большей инерционностью цепи формирования момента, так как  $T_{к} \gg T_{я}$ . Передаточная функция разомкнутого контура регулирования скорости в соответствии с рисунке 3.5 имеет вид:

$$W_{\delta \dot{\omega} \dot{m}} = \frac{1 / \hat{e}_{in}}{\dot{\omega}_{ie} \delta (1 + \dot{\omega}_{A} \delta)} \quad (3.18)$$

где  $T_{ми} = J_S / b_{зам}$  - электромеханическая постоянная электропривода на искусственной характеристике.

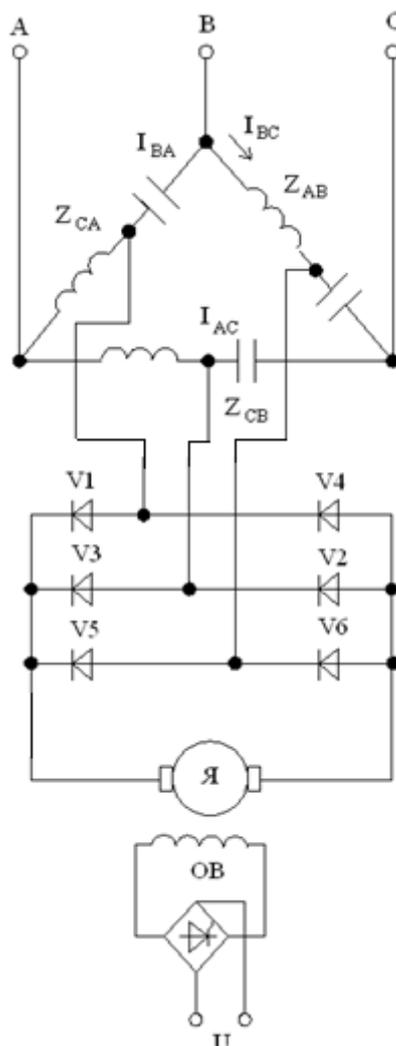


Рисунок 3.4 – Принципиальная схема системы «источник тока – двигатель»

Для получения удовлетворительного качества регулирования приходится ограничивать коэффициент обратной связи значениями, при

которых жесткость рабочего участка механических характеристик оказывается невысокой, либо вводить корректирующие обратные связи.

Примерный вид характеристик показан на рисунке 3.2. При их построении учтено, что напряжение возбудителя  $U_{Вmax}$  в  $a=2,4$  раза превышает номинальное напряжение возбуждения двигателя для форсирования переходных процессов. Поэтому обратная связь по скорости поддерживает скорость постоянной только в пределах линейного участка характеристики возбудителя, в конце которого ток возбуждения значительно превышает номинальный и с учетом насыщения магнитной цепи двигателя устанавливается поток, превышающий номинальный на 10-30%. Соответственно пусковой момент, составляет  $(1,1-1,3)M_{НОМ}$ .

Наличие в контуре регулирования большой постоянной времени обмотки возбуждения определяет целесообразность использования последовательной коррекции. При указанном выше значительном запасе по напряжению возбуждения ( $a=2-4$ ) полезно ввести ограничение максимального тока возбуждения в переходных процессах допустимым значением, а это наиболее удобно обеспечивается введением подчиненного контура регулирования тока возбуждения, как показано на рис.8.30.

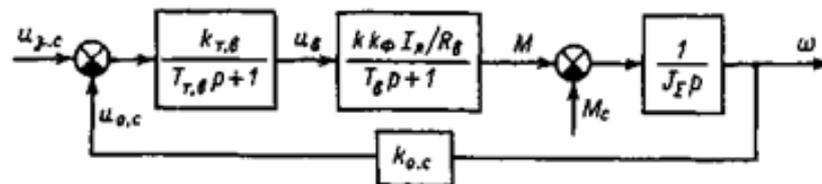


Рисунок 3.5 – Структурная схема системы «источник тока – двигатель» замкнутой связью по скорости

Передаточную функцию объекта регулирования тока возбуждения, если допустимо пренебречь влиянием вихревых токов и отнести инерционность тиристорного возбудителя к некомпенсированной  $T_m=T_{т,в}$ , можно записать в виде:

$$W_{OPTB} = \frac{K_{TB}}{R_B(1+T_B p)(1+T_{\mu} p)}. \quad (3.19)$$

Для получения оптимальной передаточной функции этого контура необходима следующая передаточная функция регулятора тока возбуждения:

$$W_{PTB} = - \frac{1+T_B p K_{oc} K_{TB} k k_{\phi} I_{НОМ}}{(K_{OT} K_{TB} / R_B) a_T T_{\mu} p}. \quad (3.20)$$

Таким образом, регулятор тока возбуждения должен иметь передаточную функцию интегрально-пропорционального звена. Передаточная функция объекта регулирования скорости состоит из передаточной функции замкнутого контура тока, которую упростим, отбросив в знаменателе член второго порядка, и передаточной функции механического звена:

$$W_{OPC} = \frac{1/\kappa_{OTB}}{1 + a_T T_\mu p} \frac{1}{J_\Sigma p}. \quad (3.21)$$

Регулятор скорости должен иметь передаточную функцию пропорционального звена:

$$W_{PC} = \frac{\kappa_{OTB} J_\Sigma}{1 + \kappa \kappa_\phi \kappa_{OC} I_{НОМ} a_c a_T T_\mu} = k_{yc} \quad (3.22)$$

### 3.4 Расчет и построение статических характеристик двигателя постоянного тока на базе системы «источник тока - двигатель» в различных магнитных потока

В каталогах на электрические машины постоянного тока приводятся следующие данные:

- мощность  $P_n = 0,75 \text{ кВт}$ ;
- напряжение  $U_n = 220 \text{ В}$ ;
- скорость вращения якоря  $n_n = 3000 \text{ об/мин}$ ;
- КПД  $\eta_n = 71,5\%$ ;
- Сопротивление обмотки якоря  $R_\alpha = 6,4 \text{ Ом}$ ;
- Сопротивление обмотки возбуждения  $R_B = 103 \text{ Ом}$ ;
- Индуктивность обмотки якоря  $L_\alpha = 104 \text{ мГн}$ . ный двигатель режим

Естественные электромеханическая и механическая характеристики двигателя постоянного тока с независимым возбуждением при пренебрежении реакцией якоря являются прямолинейными и описываются уравнениями:

$$n = \frac{U_{\hat{m}}}{\hat{n} \cdot \hat{O}_{\hat{m}}} - \frac{R_\beta}{\hat{n} \cdot \hat{O}_{\hat{m}}} \cdot I = \frac{220}{0,069} - \frac{6,4}{0,069} \cdot 2,14 = 2989,9,$$

$$n = \frac{U_{\hat{m}}}{\hat{n} \cdot \hat{O}_{\hat{m}}} - \frac{R_\beta}{\hat{e} \cdot \hat{n} \cdot \hat{O}_{\hat{m}}^2} \cdot \dot{I} = \frac{220}{0,069} - \frac{6,4}{0,069 \cdot 0,49} \cdot 2,4 = 2734,1 \text{ об/мин}.$$

Уравнения электромеханических и механических характеристик могут быть записаны и для скорости, если учесть, что

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 3000}{60} = 314 \text{ рад/с};$$

$$n = \frac{U_{\hat{m}}}{\tilde{n} \cdot \hat{O}_{\hat{m}}} - \frac{R_{\beta}}{\tilde{n} \cdot \hat{O}_{\hat{m}}} \cdot I \Rightarrow \tilde{n} \cdot \hat{O}_{\hat{m}} = \frac{U_{\hat{m}} - R_{\beta} \cdot I}{n} = \frac{220 - 6,4 \cdot 2,14}{3000} = 0,069,$$

где  $n$  – частота вращения двигателя, [об/мин];

$U_{\hat{m}}$  – номинальное напряжение сети, [В];

$R_{\beta}$  – сопротивление якоря двигателя, [Ом];

$c, k$  – конструктивные коэффициенты двигателя;

$\hat{O}_{\hat{m}}$  – номинальный магнитный поток двигателя, [В];

$\omega$  – скорость двигателя, [рад/с];

Номинальный момент:

$$\dot{I}_{\hat{m}} = 9550 \cdot \frac{D_{\hat{m}}}{n_{\hat{m}}} = 9550 \cdot \frac{7,5}{3000} = 2,4 \text{ А.}$$

В связи с прямолинейностью естественные характеристики могут быть построены по двум точкам, соответствующим номинальному и пограничному или пусковому режимам работы. Номинальному режиму работы отвечают точки с координатами:

$n = n_{\hat{m}}$  при  $I = I_{\hat{m}}$  для электромеханической характеристики;

$n = n_{\hat{m}}$  при  $M = M_{\hat{m}}$  для механической характеристики;

Вторые точки характеристик могут быть определены для пограничного или пускового режимов в естественных условиях.

Пограничному режиму соответствует  $I = 0$  ( $\dot{I} = 0$ ), поэтому пограничная частота вращения двигателя  $n_0$  как для электромеханической, так и для механической характеристик будет:

$$n_{\hat{n}0} = \frac{U_{\hat{m}}}{\tilde{n} \cdot \hat{O}_{\hat{m}}} = \frac{220}{0,069} = 3188,4 \text{ об/мин}$$

Имея в виду, что

$$n_{\hat{m}} = \frac{U_{\hat{m}} - I_{\hat{m}} \cdot R_{\beta}}{\tilde{n} \cdot \hat{O}_{\hat{m}}} = \frac{220 - 2,14 \cdot 6,4}{0,069} = 2989,9 \text{ об/мин}$$

Получим

$$n_{\hat{n}0} = n_{\hat{m}} \cdot \frac{U_{\hat{m}}}{U_{\hat{m}} - I_{\hat{m}} \cdot R_{\beta}} = 2989,9 \cdot \frac{220}{220 - 2,14 \cdot 6,4} = 3188,4 \text{ об/мин}$$

Пусковому режиму, в свою очередь, отвечает  $n = 0$ . Здесь на основании приведенных выше  $n = f(I)$  и  $n = f_1(M)$  можно написать:

$$I_{i\dot{a}} = \frac{U_{\dot{m}}}{R_{\beta}} = \frac{220}{6,4} = 34,375 \text{ \AA},$$

$$\dot{I}_{i} = \frac{U_{\dot{m}} \cdot \hat{e} \cdot \hat{O}_{\dot{m}}}{R_{\beta}} = \hat{e} \cdot \hat{O}_{\dot{m}} \cdot I_{i\dot{a}} = 0,49 \cdot 34,375 = 16,84 \text{ \AA}.$$

Значение  $\hat{e} \cdot \hat{O}_{\dot{m}}$  для последнего выражения можно определить из формулы:

$$\dot{I}_{\dot{m}} = \hat{e} \cdot I_{\dot{m}} \cdot \hat{O}_{\dot{m}} \Rightarrow \hat{e} \cdot \hat{O}_{\dot{m}} = \frac{\dot{I}_{\dot{m}}}{I_{\dot{m}}} = \frac{2,4}{4,9} = 0,49.$$

Характеристики следует строить для одного направления вращения в диапазоне от идеального холостого хода до режима стоянки под током.

3.4.1 Расчет и построение искусственных электромеханических и механических характеристик двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением.

Искусственные электромеханические и механические характеристики двигателя с параллельным возбуждением могут быть построены как естественные, по двум точкам характерных режимов работы, вычисленным по формулам электромеханической и механической характеристик для новых значений измененного параметра. Для этого по формулам  $n = f(I)$  и  $n = f_1(M)$  определяют ток (момент) стоянки при  $n = 0$  и пограничную частоту вращения при  $I = 0$  ( $M = 0$ ).

первая искусственная характеристика:

$$U_{\dot{m}} = U_{\dot{m}} ; R_{\beta} = R_{\beta} ; \hat{O}_{\dot{m}} = 0,8 \cdot \hat{O}_{\dot{m}} .$$

Пусковой ток двигателя:

$$I_{i_1} = \frac{U_{\dot{m}}}{R_{\beta}} = \frac{220}{6,4} = 34,375 \text{ \AA}.$$

Обороты идеального холостого хода:

$$n_{0_1} = \frac{U_{\dot{m}}}{\tilde{n} \cdot \hat{O}_{\dot{m}}} = \frac{220}{\tilde{n} \cdot 0,8 \cdot \hat{O}_{\dot{m}}} = \frac{220}{0,8 \cdot 0,069} = 3985,5 \text{ \AA/\dot{e}i}.$$

Пусковой момент двигателя:

$$\dot{I}_{i_1} = \frac{\hat{e} \cdot \hat{O}_{\dot{m}} \cdot U_{\dot{m}}}{R_{\beta}} = \frac{0,49 \cdot 0,8 \cdot 220}{6,4} = 13,475 \text{ \AA}.$$

Угловая частота двигателя:

$$\omega_{0_1} = \frac{\pi \cdot n_{0_1}}{30} = \frac{3.14 \cdot 3985,5}{30} = 417,15 \text{ ðää/ñ.}$$

Вторая искусственная характеристика:

$$U_{\hat{m}} = U_{\tilde{m}} ; R_{\beta} = R_{\beta} ; \hat{O}_{\tilde{m}} = 0,7\hat{O}_{\tilde{m}} .$$

Пусковой ток двигателя:

$$I_{i_1} = \frac{U_{\tilde{m}}}{R_{\beta}} = \frac{220}{6,4} = 34,375 \text{ Ä.}$$

Обороты идеального холостого хода:

$$n_{0_2} = \frac{U_{\tilde{m}}}{\tilde{n} \cdot 0,7\hat{O}_{\tilde{m}}} = \frac{220}{0,7 \cdot 0,069} = 3188,4 \text{ áá/ñí.}$$

Пусковой момент двигателя:

$$\dot{i}_{i_2} = \frac{\hat{e} \cdot 0,7\hat{O}_{\tilde{m}} \cdot U_{\tilde{m}}}{R_{\beta}} = \frac{0,49 \cdot 0,7 \cdot 220}{6,4} = 8,4 \text{ í.}$$

Угловая частота двигателя:

$$\omega_{0_2} = \frac{\pi \cdot n_{0_2}}{30} = \frac{3.14 \cdot 3188,4}{30} = 333,72 \text{ ðää/ñ.}$$

Третья искусственная характеристика:

$$U_{\hat{m}} = U_{\tilde{m}} ; R_{\beta} = R_{\beta} ; \hat{O}_{\tilde{m}} = 0,6\hat{O}_{\tilde{m}} .$$

Пусковой ток двигателя:

$$I_{i_3} = \frac{1,2 \cdot U_{\tilde{m}}}{R_{\beta}} = \frac{1,2 \cdot 220}{6,4} = 41,25 \text{ Ä.}$$

Обороты идеального холостого хода:

$$n_{0_3} = \frac{1,2 \cdot U_{\tilde{m}}}{\tilde{n} \cdot 0,6\hat{O}_{\tilde{m}}} = \frac{1,2 \cdot 220}{0,6 \cdot 0,069} = 3826,1 \text{ áá/ñí.}$$

Пусковой момент двигателя:

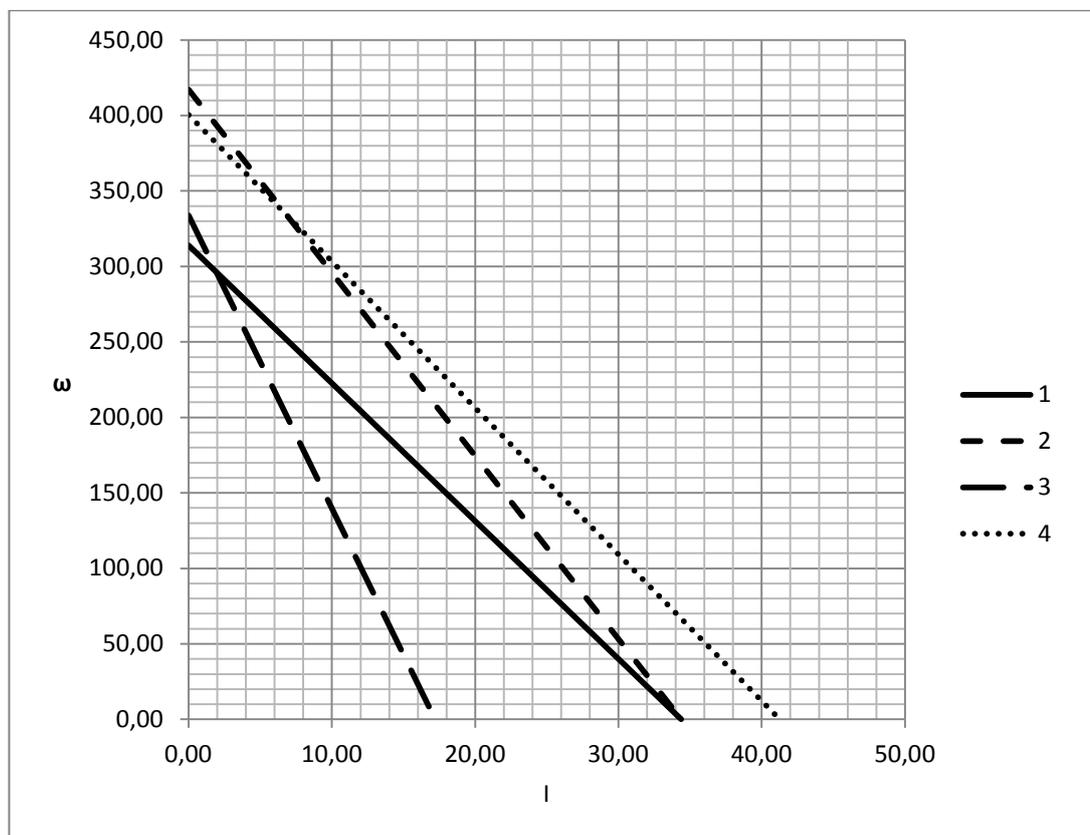
$$\dot{i}_{i_3} = \frac{\hat{e} \cdot 0,6\hat{O}_{\tilde{m}} \cdot U_{\tilde{m}}}{R_{\beta}} = \frac{0,49 \cdot 0,6 \cdot 220}{6,4} = 20,2 \text{ í.}$$

Угловая частота двигателя:

$$\omega_{0_3} = \frac{\pi \cdot n_{0_3}}{30} = \frac{3.14 \cdot 3826,1}{30} = 400,5 \text{ рад/с.}$$

Значения  $\hat{n} \cdot \hat{O}_{\hat{m}}$  и  $\hat{e} \cdot \hat{O}_{\hat{m}}$  рассчитываются для номинального режима работы машины. При одновременном изменении двух и большего числа параметров принцип расчета характеристик остается таким же.

По полученным значениям строят искусственные характеристики, каждая из которых отвечает случаю изменения, по сравнению с номинальными, только одного параметра, которые показаны на рисунке 3.16 и рисунке 3.17.

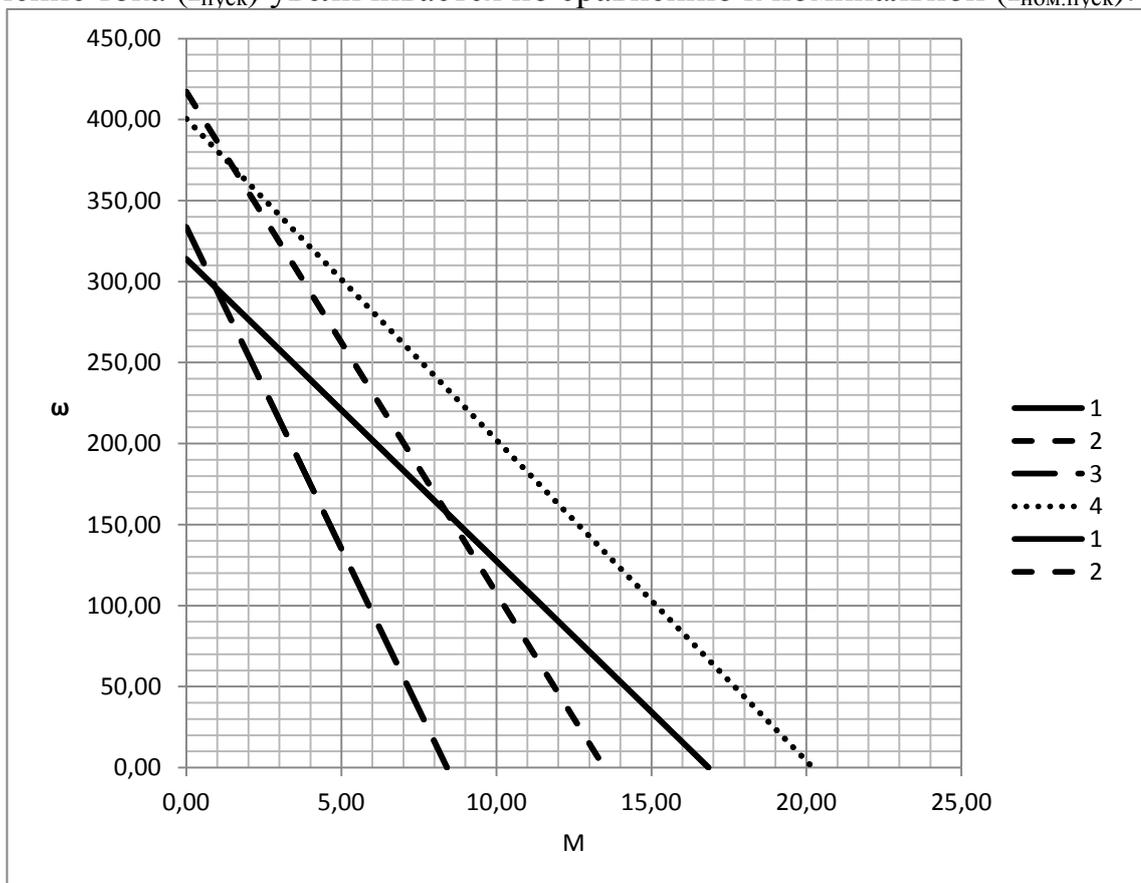


- 1 – Естественная характеристика, 2 – Искусственная характеристика при  $\hat{O} = 0,8 \cdot \hat{O}_{\hat{m}}$ , 3 – Искусственная характеристика при  $\hat{O} = 0,7 \cdot \hat{O}_{\hat{m}}$ ,  
4 – Искусственная характеристика при  $\hat{O} = 1,2 \cdot \hat{O}_{\hat{m}}$ ,

Рисунок 3.16 – Электромеханические характеристики двигателя постоянного тока при пуске

Как видно из графика, искусственных характеристик в 1 случаи, когда мы меняем  $\hat{O} = 0,8 \cdot \hat{O}_{\hat{m}}$ , то значение тока ( $I_{\text{пуск}}$ ) не меняется. Во 2 случаи,

когда мы меняем  $\hat{O} = 0.7 \cdot \hat{O}_{\hat{m}}$ , то значение тока ( $I_{\text{пуск}}$ ) уменьшается по сравнению к номинальной ( $I_{\text{ном.пуск}}$ ). В 3 случаи, когда мы меняем  $\hat{O} = 1,2 \cdot \hat{O}_{\hat{m}}$ , то значение тока ( $I_{\text{пуск}}$ ) увеличивается по сравнению к номинальной ( $I_{\text{ном.пуск}}$ ).



- 1 – Естественная характеристика, 2 – Искусственная характеристика при  $\hat{O} = 0.8 \cdot \hat{O}_{\hat{m}}$ , 3- Искусственная характеристика при  $\hat{O} = 0.7 \cdot \hat{O}_{\hat{m}}$ ,  
4- Искусственная характеристика при  $\hat{O} = 1,2 \cdot \hat{O}_{\hat{m}}$ ,

Рисунок 3.17 – Механические характеристики двигателя постоянного тока при пуске

Как видно из графика, искусственных характеристик в 1 случаи, когда мы меняем  $\hat{O} = 0.8 \cdot \hat{O}_{\hat{m}}$ , то значение момента ( $M_{\text{пуск}}$ ), то уменьшается по сравнению к номинальной ( $M_{\text{ном.пуск}}$ ). Во 2 случаи, когда мы меняем  $\hat{O} = 0.7 \cdot \hat{O}_{\hat{m}}$ , то значение момента ( $M_{\text{пуск}}$ ) уменьшается по сравнению к номинальной ( $M_{\text{ном.пуск}}$ ). В 3 случаи, когда мы меняем  $\hat{O} = 1,2 \cdot \hat{O}_{\hat{m}}$ , то значение момента ( $M_{\text{пуск}}$ ) увеличивается по сравнению к номинальной ( $M_{\text{ном.пуск}}$ ).

### 3.5 Компьютерное моделирование электропривода бобин на базе системы «источник тока - двигатель» с помощью Matlab

Моделирование режимов работы электропривода бобин для намотки базальтовых нить произведен на базе пакета прикладных программ Matlab в системе Simulink (Power system). Сама математическая модель показана на рисунке 3.6.

Рассматриваемая схема включает:

- машину постоянного тока (блок DC Machine из библиотеки Power System Blockset/Machines);
- прибор для измерения переменных состояний машины Display из библиотеки Simulink/Sinks;
- источник постоянного напряжения (блок DC Voltage Source для питания якоря двигателя из библиотеки Power System Blockset/Electrical Sources);
- источник сигнала (блок Step из библиотеки Sources);
- неуправляемые источники энергии (блок AC Voltage Source из библиотеки Power System Blockset/Electrical Sources);
- последовательные пассивные элементы LC (блок Series RLC Branch1 из библиотеки Library Power Elements);
- модель полупроводникового преобразователя (блок Universal Bridge из библиотеки Power Electronics);
- осциллоскоп для наблюдения временных зависимостей (блок Scope из библиотеки Simulink/Sinks).

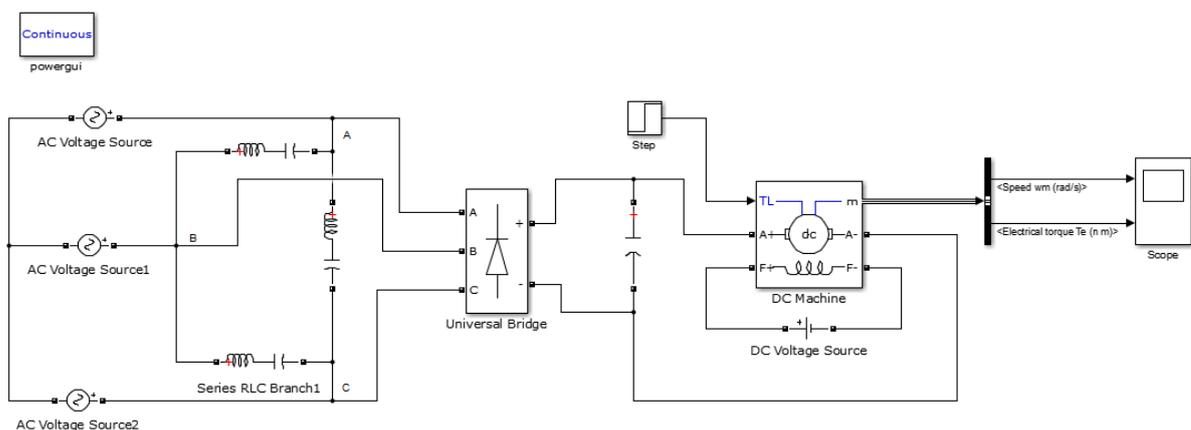


Рисунок 3.6 – Математическая модель электропривода с питанием от источника тока

В полях настройки задаются:

- параметры обмотки якоря –  $R_a$  [Ом],  $L_f$  [Гн];
- параметры обмотки возбуждения –  $R_f$  [Ом],  $L_f$  [Гн];

- взаимная индуктивность между обмоткой возбуждения и обмоткой якоря  $L_{af}$  [Гн];
- суммарный момент инерции машины и нагрузки –  $J$  [кг];
- коэффициент вязкого трения –  $B_m$  [Нмс];
- коэффициент сухого трения –  $T_f$  [Нм];
- начальная скорость [рад/с];

Параметры машины, вводимые в окно настройки, определяются из паспортных данных.

В каталогах на электрические машины постоянного тока приводятся следующие данные:

- мощность  $P_n=0,75$ кВт;
- напряжение  $U_n=220$  В;
- скорость вращения якоря  $n_n=3000$  об/мин;
- КПД  $\eta_n=71,5\%$ ;
- Сопротивление обмотки якоря  $R_{я}=6,4$  Ом;
- Сопротивление обмотки возбуждения  $R_B=103$  Ом;
- Индуктивность обмотки якоря  $L_{я}=104$  мГн.

Кроме перечисленных параметров, необходимо определить взаимную индуктивность между обмотками возбуждения и якоря.

Для машины от источника тока ее величина определяется последовательным расчетом, используя следующие выражения:

$$I_{\hat{A}} = \frac{U_{\hat{A}}}{R_{\hat{A}}} = \frac{220}{103} = 2,14 \text{ \AA};$$

$$\dot{I}_{\hat{I}} = \frac{P_{\hat{I}}}{\omega_{\hat{I}}} = \frac{30 \cdot P_{\hat{I}}}{\pi \cdot n_{\hat{I}}} = \frac{30 \cdot 750}{3,14 \cdot 3000} = 2,4 \text{ ;}$$

$$I_{\beta \hat{I}} = \frac{P_{\hat{I}}}{U_{\beta \hat{I}} \cdot \eta_{\hat{I}}} - I_{\hat{A}} = \frac{750}{220 \cdot 0,715} - 2,14 = 4,9 \text{ \AA};$$

$$L_{af} = \frac{M_{\hat{I}}}{I_{\beta \hat{I}} \cdot I_{\hat{A}}} = \frac{2,4}{4,9 \cdot 2,14} = 0,23 \text{ \AA}.$$

Индуктивность обмотки возбуждения при исследовании установившихся процессов может быть принята близкой к нулю. При исследовании переходных значение  $L_B$  для машин обычного исполнения выбирается из неравенства:

$$L_{\hat{A}} \geq (2 - 5) \frac{L_{\hat{y}} \cdot R_{\hat{A}}}{R_{\hat{y}}} = 2 \frac{104 \cdot 10^{-3} \cdot 103}{6,4} = 6,3 \text{ \AA}.$$

Момент инерции для двигателя обычного исполнения определяется из неравенства:

$$J \geq \frac{(5-10)L_{\dot{y}} \cdot D_i^2}{R_{\dot{y}}^2 \cdot \omega_i^2 \cdot I_{\dot{y}}^2} = 10 \frac{104 \cdot 10^{-3} \cdot 0,5625 \cdot 10^6}{6,4^2 \cdot 314^2 \cdot 4,9^2} = 10 \cdot 0,002 = 0,02$$

Момент сухого трения и коэффициент вязкого трения определяются из следующих соображений. Общие механические потери для машин обычного исполнения составляют  $P_{\text{мех}} = (0,5-2\%) \cdot P_{\text{н}}$ .

$$P_{\text{мех}} = (0,005-0,02) \cdot P_{\text{н}} = 0,01 \cdot 750 = 7,5 \text{ Вт.}$$

Кроме того эти потери равны  $P_{\text{мех}} = T_f \omega_{\text{н}} + B_m \omega_{\text{н}}^2$ . Если считать, что потери на трение и вентиляционные потери приблизительно равны, то

$$T_f = \frac{P_{\text{мех}}}{2 \cdot \omega_i} = \frac{30 \cdot P_{\text{мех}}}{2\pi \cdot n_i} = \frac{30 \cdot 750}{2 \cdot 3,14 \cdot 3000} 1,2;$$

$$B_m = \frac{P_{\text{мех}}}{2 \cdot \omega_i^2} = \frac{750}{2 \cdot 314^2} = 0,004.$$

После того как вычислили настраиваемые параметры машины вставляем их в окно настройки параметров машины.

Для анализа характера протекания переходных процессов во времени, были сняты также динамические характеристики  $\omega(t)$  и  $M(t)$ .

На рисунках 3.7-3.9 показаны переходные процессы для скорости вытяжки нити 3000 об/мин, которые получены при напряжении возбуждения ( $U=355\text{В}$ ) с набросом нагрузки  $M=M_{\text{НОМ}}$ ,  $M=0,5M_{\text{НОМ}}$ ,  $M=1,5M_{\text{НОМ}}$  соответственно.

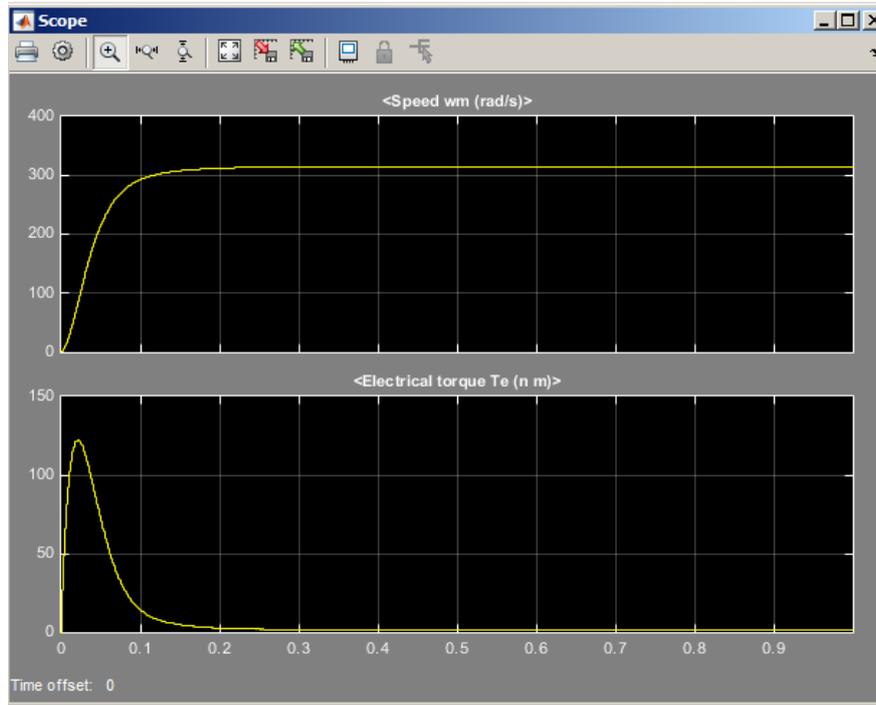


Рисунок 3.7 – Характеристика переходного процесса электропривода на холостом ходу:  $\omega=f_1(t)$ ,  $M=f_2(t)$

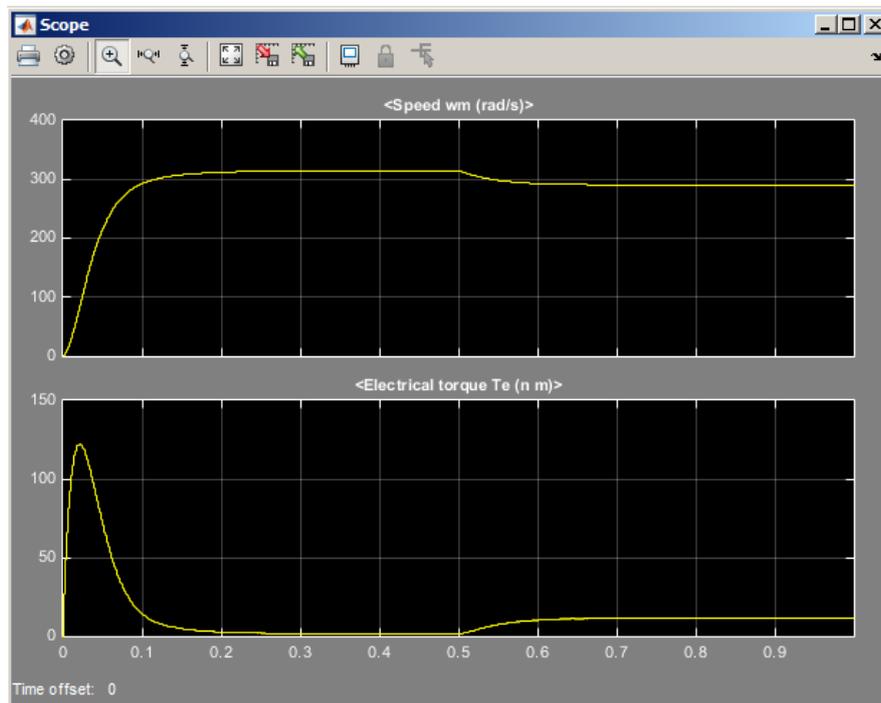


Рисунок 3.8 – Характеристика переходного процесса электропривода с набросом нагрузкой  $0,5M_{ном}$ :  $\omega=f_1(t)$ ,  $M=f_2(t)$

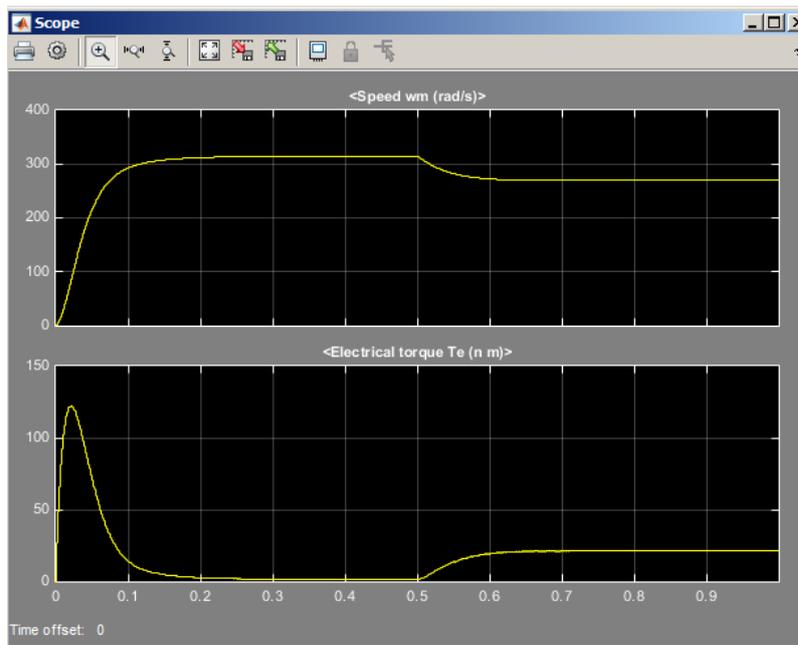


Рисунок 3.9 – Характеристика переходного процесса электропривода с набросом нагрузкой  $1,5M_{\text{НОМ}}$ :  $\omega=f_1(t)$ ,  $M=f_2(t)$

Из графиков переходных процессов видно, что с увеличением момента нагрузки угловая скорость уменьшается.

Графики переходных процессов электропривода для скорости вытяжки 2100 об/мин, которые получены при напряжении возбуждения ( $U=500\text{В}$ ) показаны на рисунках 3.10-3.12.

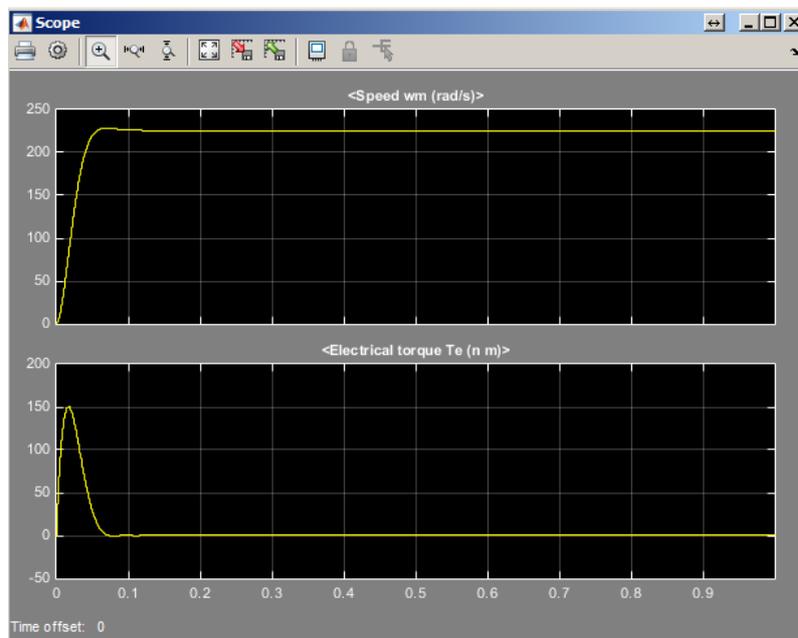


Рисунок 3.10 – Характеристика переходного процесса электропривода на холостом ходу для скорости вытяжки 2100 об/мин

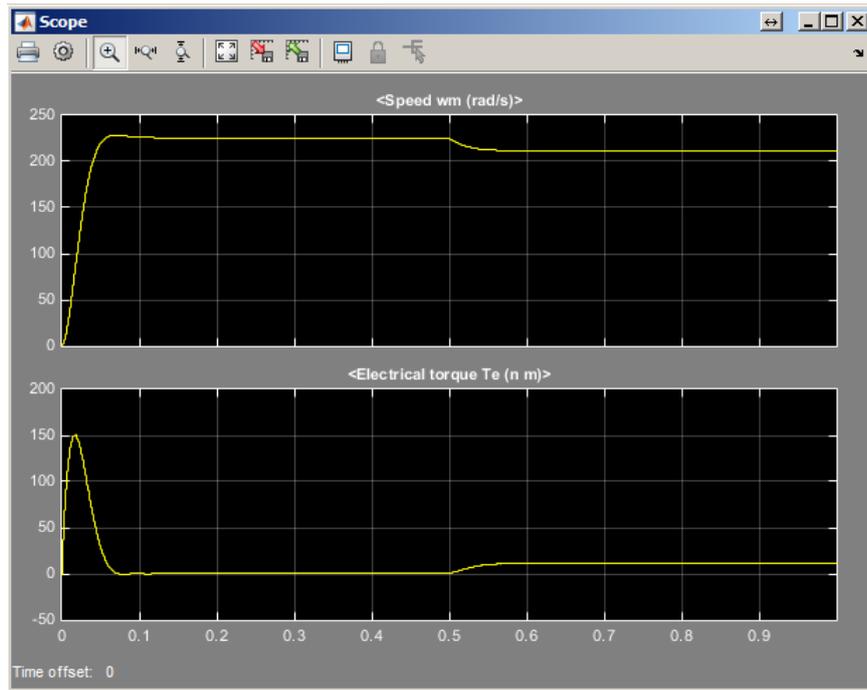


Рисунок 3.11 – Характеристика переходного процесса электропривода с набросом нагрузки  $M=0,5M_{\text{НОМ}}$  для скорости вытяжки 2100 об/мин

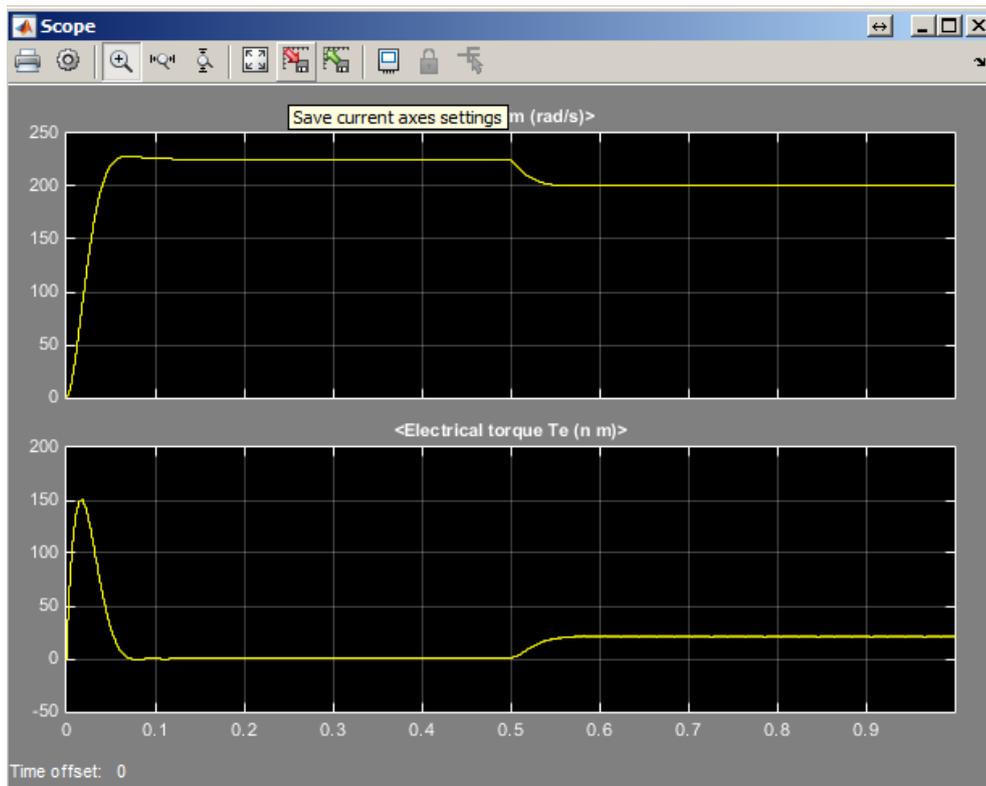


Рисунок 3.12 – Характеристика переходного процесса электропривода с набросом нагрузки  $M=1,5M_{\text{НОМ}}$  для скорости вытяжки 2100 об/мин

Из графиков переходных процессов видно, что с уменьшением частоты вытяжки нити уменьшается угловая скорость, а также с увеличением момента нагрузки на этой частоте вытяжки нити угловая скорость уменьшается.

График переходных процессов электропривода для скорости вытяжки 1600 об/мин, которые получены при напряжении возбуждения ( $U=670\text{В}$ ) показаны на рисунках 3.13-3.15.

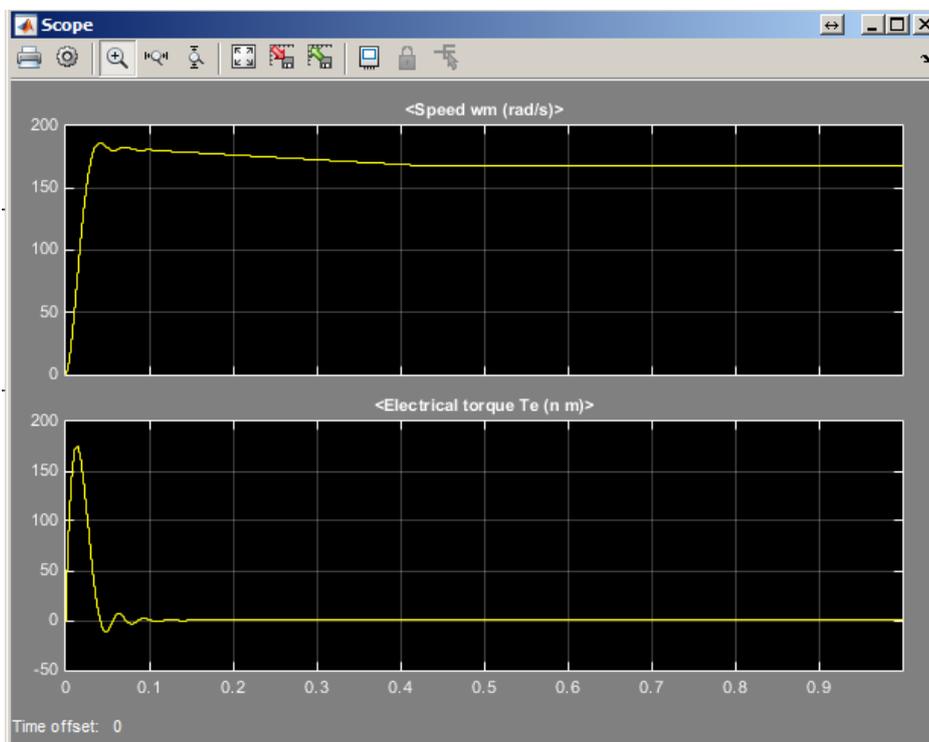


Рисунок 3.13 – Характеристика переходного процесса электропривода электропривода на холостом ходу для скорости вытяжки 2100 об/мин

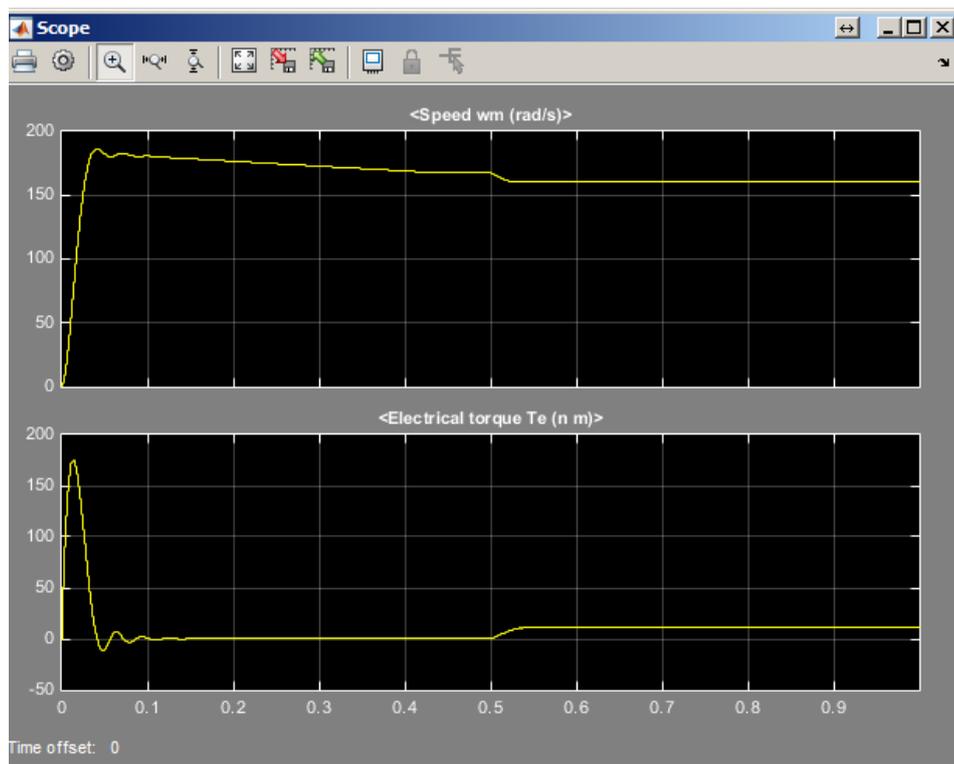


Рисунок 3.14 – Характеристика переходного процесса электропривода с набросом нагрузки  $M=0,5M_{\text{НОМ}}$  для скорости вытяжки 2100 об/мин

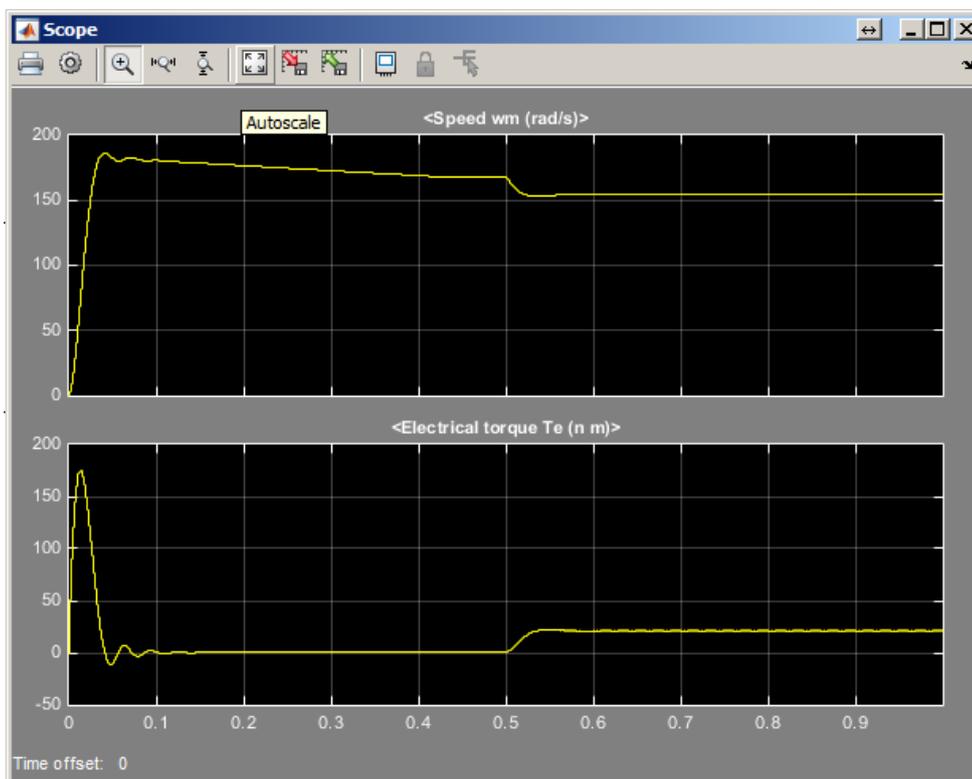


Рисунок 3.15 – Характеристика переходного процесса электропривода с набросом нагрузки  $M=1,5M_{\text{НОМ}}$  для скорости вытяжки 1600 об/мин

Из графиков переходных процессов видно, что с уменьшением частоты вытяжки нити уменьшается угловая скорость, а также с увеличением момента нагрузки на этой частоте вытяжки нити угловая скорость уменьшается.

### **Вывод**

В данной главе был анализирован технология получения базальтовых материалов. Вследствии, чего было принято необходимость в выборе электропривода бобин для намотки базальтовых нить выбрать на базе двигателя постоянного тока с системой «источник тока – двигатель».

Описана математическая модель электропривода бобин для намотки базальтовых нить выбрать на базе двигателя постоянного тока с системой «источник тока – двигатель». По описанной модели было построено математическое моделирование с помощью программы Matlab, которм была построена схема и рассчитаны параметры двигателя постоянного тока, а также сняты динамические характеристики этого электропривода.

Был также проведен расчет и построение статических характеристик, исходя из которых можно сделать вывод что выбранный электропривод бобин для намотки базальтовых нить на базе двигателя постоянного тока с системой «источник тока – двигатель» выбран верно.

## Заключение

Совершенствование систем автоматизированного электропривода с использованием новейших достижений науки и техники является одним из условий при решении задач всемерного повышения эффективности общественного производства, ускорения роста производительности труда и улучшения качества выпускаемой продукции.

В данной диссертации рассмотрены технологические особенности получения минеральных волокон из базальтовых пород и соединений.

Проведен краткий обзор существующих типов двигателей постоянного тока в различных областях промышленности.

Анализируются технологические свойства базальтовых руд с целью получения перспективных инновационных строительных материалов, таких как базальтовые нити. Описана технологическая схема получения базальтовых нитей. Экспериментально установлено, что диаметр базальтовой нити зависит от скорости ее вытяжки, т.е. от скорости вращения бобин для ее намотки. Поэтому для получения нитей с различными диаметрами, необходима регулируемый электропривод. Обоснована целесообразность применения регулируемого электропривода на базе двигателя постоянного тока с системой «источник тока – двигатель». Данная система выполнена на базе емкостно-индуктивного преобразователя и управляемого выпрямителя. В качестве электродвигателя выбран двигатель постоянного тока серии 4П080А2 УХЛ4 с независимым возбуждением, мощность составляет  $P=0,75$  кВт и номинальный ток  $I_n=4,9$  А, а скорость вращения находится в пределах от 0 до 4000 об/мин (номинальная скорость вращения 3000 об/мин).

Рассчитаны силовые элементы емкостно-индуктивного преобразователя и управляемого выпрямителя.

Составлена математическая модель двигателя постоянного тока с независимым возбуждением. Построены статические характеристики при различных нагрузках.

Составлена компьютерная модель электродвигателя с помощью Matlab и произведены исследования его динамических характеристики при различных нагрузках и скоростях.

Составлена структурная модель электропривода по системе «источник тока – двигатель».

Полученные статические и динамические характеристики и результаты моделирования показывают, что применение электропривода на базе системы «источник тока – двигатель» расширяет диапазон регулирования скорости вытяжки базальтовых нитей и тем самым обеспечивает получения нитей различных диаметров с высокими качествами.

Выбранный электропривод по системе «источник тока – двигатель» отличается простотой, высокой надежностью и хорошими технико-экономическими показателями, мало искажает напряжение сети при работе на управляемом выпрямителе.

## Список литературы

1. Сентяков Б.А., Тимофеев Л.В. Технология производства теплоизоляционных материалов на основе базальтового волокна: 2003 г.-210с.
2. Джигирис Д.Д. Основы производства базальтовых волокон, М: Теплоэнергетик, 2002 г.-412с.
3. Ильинский Н.Ф. Основы электропривода, М.: МЭИ, 3-е издание, 2007г.-224с.
4. Половко А.М., Бугусов П.Н. MATLAB для студента, Санкт-Петербург, «БХВ-Петербург», 2005 г.-320с.
5. Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0: Учебное пособие. – СПб.: Корона принт, 2001, -320 с
6. Терехов В.М. Система управления электроприводов, -М.: Академия, 2005.
7. Копылов И.П. Электрические машины. – М.: Энергоиздат, 2004.
8. Брускин Д.Э., Зерохович А.Е., Хвостов В.С. Электрические машины. Т. 1,2. – М.: Высш. шк., 1987.
9. Копылов И.П. Математическое моделирование энергетических машин. Учебник. – М.: Высш. шк., 2001.
10. Гольдберг, Свириденко Я.С. Проектирование электрических машин. Учебник для ВТУЗов. – М.: Высш. шк., 2001.
11. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины. – М.: Энергия, 1988.
12. Кацман М.М. Электрические машины. – М.: Энергоиздат, 1990.
13. Вольдек А.И. Электрические машины. – Л.: Энергия, 1984.
14. Башарин А.В., Новиков В.А., Соколовский Г.Г. Управление электроприводами: учебное пособие для вузов - Л. : Энергоиздат, 1982. - 392с.
15. Токарев Б.Ф. Электрические машины, – М.: Энергоиздат, 1990.
16. Чиликин М.Г., Сандлер А.С. Общий курс электропривода, М.: Энергоиздат, 1981.
17. Филиппов Б.А., Ильинский Н.Ф. Основы электропривода. М.: МЭИ, 1977.
18. Ильинский Н.Ф., Козаченко В.Ф. Общий курс электропривода: Учебник для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1992.
19. Токарев Б.Ф. Электрические машины: Учебник для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1990.
20. Справочник по электрическим машинам: В 2 т. / Под общ. Ред. И.П. Копылова и Б.К. Клокова. Т.1. - М.: Энергоатомиздат, 1988, - 456 с.
21. Заборщикова А.В., Мельников В.И. "Двигатели постоянного тока для автоматизированного электропривода": Учебное пособие. - СПб: Петербургский гос. ун-т путей сообщ., 1994. - 84 с.

22. Башарин А.В., Новиков В.А., Соколовский Г.Г. "Управление электроприводами": Учебное пособие для вузов. - Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. Отд-ние, 1982. - 392 с., ил.
23. Ключев В.И. "Теория электропривода": Учеб. Для вузов. - 2-е изд. Перераб. И доп. - М.: Энергоатомиздат, 2001. - 704 с.: ил.
24. Герман-Галкин С.Г. И др. Цифровые электроприводы с транзисторными преобразователями. - Л.: Энергоатомиздат. Ленинградское отделение, 1986. -246 с.
25. Справочник разработчика и конструктора РЭА. Элементная база: В 2 кн. / Масленников М.Ю., Соболева Е. А и др. - М.: Б.И., 1996. - 157-300с.
26. Бурков А.Т. Электронная техника и преобразователи: Учеб. Для вузов ж.-д. трансп. - М.: Транспорт, 1999. - 464 с.
27. Александров К.К., Кузьмина Е.Г. Электротехнические чертежи и схемы. - М.: Энергоатомиздат, 1990. - 288с.
28. Чиликин М.Г., Ключев В.И. «Теория автоматизированного электропривода».М.:Энергия.1979